

**POLITECNICO DI TORINO**

---

Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica

Tesi di Laurea Magistrale

**Macchine a riluttanza assistita:  
studio dei magneti per i rotori**



**Relatore**  
prof. Luca Ferraris

**Correlatore:**  
dott. ing. Emir Poskovic

**Laureando**  
Davide ROSSINI  
matricola: 239986

---

ANNO ACCADEMICO 2018 – 2019



# Indice

<b>1</b>	<b>Macchine elettriche a magneti permanenti</b>	<b>5</b>
1.1	Tipologie	5
1.1.1	Servomotori in DC	5
1.1.2	Motori Brushless	5
1.1.3	Motori a riluttanza assistita	7
1.2	Vantaggi e svantaggi	8
1.3	Applicazioni	9
1.4	Macchina a riluttanza assistita - Stato dell'arte	10
1.4.1	Il rotore	10
1.4.2	Lo statore	11
1.4.3	L'effetto dei magneti	12
<b>2</b>	<b>Studio di una macchina a riluttanza assistita: progettazione e dimensionamento</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>Tipologie di magneti utilizzate</b>	<b>23</b>
3.1	Scelta e produzione di magneti permanenti	23
3.1.1	Scelta del tipo di magnete	23
3.1.2	Plastomagneti	23
3.2	Plastoneodimio commerciale	26
3.2.1	Descrizione del prodotto di partenza	26
3.2.2	Realizzazione del campione	27
3.2.3	Magnetizzazione	34
3.2.4	Caratterizzazione magnetica	35
3.2.5	Elenco processi di stampaggio	39
3.3	Plastoferrite commerciale	41
3.3.1	Descrizione del prodotto di partenza	41
3.3.2	Realizzazione del campione	42
3.3.3	Magnetizzazione	45
3.3.4	Caratterizzazione magnetica	46
3.3.5	Elenco processi di stampaggio	47
3.4	Plastoneodimio preparato in laboratorio	49
3.4.1	Descrizione dei prodotti di partenza	49
3.4.2	Realizzazione del campione	50
3.4.3	Magnetizzazione e caratterizzazione magnetica	56

3.4.4	Elenco processi di mescolamento e di stampaggio . . . . .	58
<b>4</b>	<b>Simulazione e analisi con elementi finiti dei prototipi proposti</b>	<b>61</b>
4.1	Funzionamento del modello . . . . .	61
4.1.1	Introduzione . . . . .	61
4.1.2	Simulazioni . . . . .	63
4.2	Risultati della simulazione nei tre casi . . . . .	65
4.2.1	Ripple di coppia . . . . .	65
4.2.2	Tensione . . . . .	67
4.2.3	MTPA . . . . .	69
4.2.4	Flussi . . . . .	71
4.2.5	Mapping . . . . .	74
4.2.6	Densità di flusso . . . . .	77
4.3	Confronto con la macchina a riluttanza . . . . .	79
4.3.1	Ripple di coppia . . . . .	79
4.3.2	MTPA . . . . .	80
4.3.3	Flussi . . . . .	81
4.3.4	Mapping . . . . .	82
4.3.5	Densità di flusso . . . . .	83
<b>5</b>	<b>Assemblaggio dei prototipi</b>	<b>85</b>
5.1	Macchina a riluttanza . . . . .	85
5.2	Macchine a riluttanza assistita . . . . .	86
<b>6</b>	<b>Misure sperimentali e confronto dei risultati</b>	<b>91</b>
6.1	MQIP-M260 . . . . .	91
6.1.1	BEMF . . . . .	91
6.1.2	Coppie e contenuto armonico . . . . .	92
6.1.3	MTPA . . . . .	95
6.1.4	Curve di magnetizzazione . . . . .	96
6.1.5	Mapping . . . . .	97
6.2	FB23 . . . . .	98
6.2.1	Coppie e contenuto armonico . . . . .	98
6.2.2	MTPA . . . . .	100
6.2.3	Mapping . . . . .	101
6.3	CPPA6-10 . . . . .	102
6.3.1	Coppie e contenuto armonico . . . . .	102
6.3.2	MTPA . . . . .	104
6.3.3	Curve di magnetizzazione . . . . .	105
6.3.4	Mapping . . . . .	106
6.4	Motore a riluttanza . . . . .	107
6.4.1	Coppie e contenuto armonico . . . . .	107
6.4.2	MTPA . . . . .	110
6.4.3	Curve di magnetizzazione . . . . .	111
6.4.4	Mapping . . . . .	112
6.5	Confronto misure e simulazioni . . . . .	113

6.5.1	MTPA . . . . .	113
6.5.2	Ripple di coppia . . . . .	117
6.5.3	Curve di magnetizzazione . . . . .	120
6.5.4	Mapping . . . . .	124
<b>7</b>	<b>Considerazioni finali</b>	<b>129</b>
7.1	Commento sui risultati . . . . .	129
7.2	Problematiche riscontrate . . . . .	131
7.3	Sviluppi futuri . . . . .	132
	<b>Bibliografia</b>	<b>133</b>

# Capitolo 1

## Macchine elettriche a magneti permanenti

### 1.1 Tipologie

Le macchine elettriche a magneti permanenti differiscono dalle altre macchine elettriche per la presenza di materiali magnetici duri nel rotore, mentre lo statore è costruttivamente identico o simile alle normali macchine elettriche. Questo non vale però per le macchine elettriche a corrente continua, dato che la classica configurazione prevede l'utilizzo dei magneti nello statore. Esistono diverse tipologie di macchine a PM, con diversi principi di funzionamento, di seguito ne vengono elencate alcune.

#### 1.1.1 Servomotori in DC

Nei motori in corrente continua con magneti permanenti la struttura del rotore è isotropa. I magneti si occupano di creare un campo magnetico stazionario. In base al tipo di magnete utilizzato si possono avere differenti caratteristiche. Ad esempio la densità di coppia per magneti a base di ferrite è circa  $0.5 \frac{Nm}{kg}$ , mentre se si usano terre rare si avrà una densità di coppia pari a circa  $0.7 \frac{Nm}{kg}$ .

L'induttore della macchina può vedere variata la sua geometria in base alle caratteristiche geometriche del magnete.

Nella figura 1.1 sono mostrate quattro configurazioni possibili dello statore. A parte la configurazione *a*, che è eccitata elettricamente, le altre 3 rappresentano rispettivamente macchine a magneti permanenti *superficiali*, *interni* e *a concentrazione di flusso*.

#### 1.1.2 Motori Brushless

I motori brushless sono delle macchine sincrone dotate di magneti permanenti, posti nel rotore. Il flusso di eccitazione, anziché essere prodotto da un circuito di eccitazione nel rotore, con le relative spazzole, è generato dai magneti permanenti. Questo permette sicuramente un annullamento delle perdite Joule a rotore e inoltre rende più compatta e leggera la macchina. A differenza delle macchine a corrente continua in queste macchine

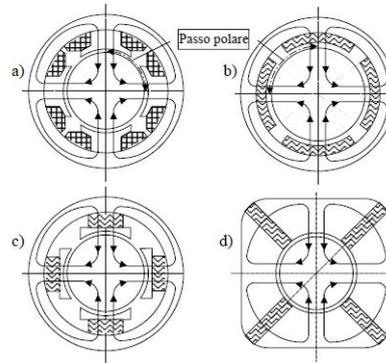


Figura 1.1: Strutture di motori a corrente continua a due coppie polari [1]

il campo creato dai magneti non è stazionario, bensì è rotante. I magneti possono essere posti superficialmente oppure internamente al rotore, come mostrato nella figura 1.2.

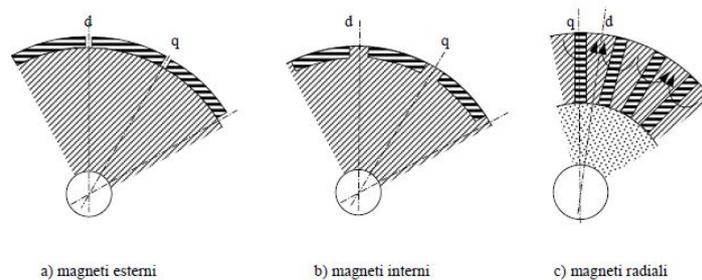


Figura 1.2: Strutture di rotori dei motori brushless [1]

Il tipo di controllo utilizzato e la struttura del rotore sono strettamente collegati. Le principali tecniche di comando per i motori brushless trifase sono due: la tecnica di controllo *trapezoidale* (o trapezia) e la tecnica di controllo *sinusoidale*. Tra loro differiscono in base alla forma d'onda delle correnti e della forza contro-elettromotrice di ogni fase. I brushless trapezi vengono anche chiamati *Brushless DC* perchè costruttivamente sono l'opposto delle macchine a corrente continua a magneti permanenti. Il caso isotropo *a* della figura 1.2 rappresenta un rotore *SPM*, vale a dire *Superficial Permanent Magnet*. Gli altri due casi invece sono anisotropi e sono chiamati anche *IPM*, cioè *Internal Permanent Magnet*. I motori brushless trapezi sono *SPM*, mentre i motori brushless sinusoidali possono essere sia *SPM* che *IPM*.

Una particolare categoria di motori brushless sono i motori a *flusso assiale*. Come dice il nome stesso sono caratterizzati da un flusso statore-rotore assiale e non radiale come normalmente accade nei motori elettrici. La particolare forma costruttiva permette di creare strutture a più stadi che migliorano la densità di coppia, di per se già elevata.

### 1.1.3 Motori a riluttanza assistita

In questa sezione non verrà approfondita la macchina, questo verrà fatto nel capitolo 1.4. Ci si limiterà a trattare la macchina di partenza, la macchina a riluttanza, e poi brevemente verrà chiarita l'importanza del motore a riluttanza assistita.

Esistono due tipi di macchine a riluttanza: "Switched Reluctance" (aventi sia rotore che statore con strutture anisotrope) e "Synchronous Reluctance", cioè dei motori sincroni a riluttanza (vengono anche chiamati *PMASR* o *PMaSynRM*, che sta per "Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor"). Questi ultimi sono come i brushless ma non hanno magneti permanenti e quindi la loro coppia deriva dall'anisotropia del rotore. Lo statore invece ha una struttura classica, come quella di un motore ad induzione, e ha lo scopo di generare una forza magnetomotrice sinusoidale al traferro. Il rotore è particolarmente compatto, data l'assenza di avvolgimenti e magneti. Esso è costruito in modo da formare dei "percorsi preferenziali" che il flusso magnetico prodotto al traferro può percorrere.

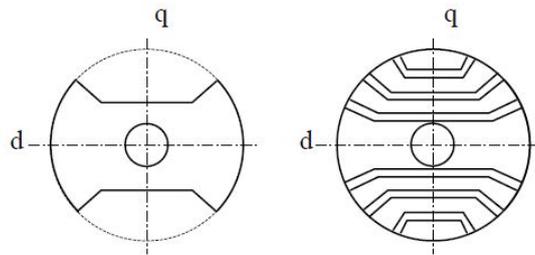


Figura 1.3: Strutture di rotori per macchine a riluttanza [1]

Nella figura 1.3 si possono vedere i due assi  $d$  e  $q$ , che rappresentano rispettivamente l'asse a minima e a massima riluttanza.

Le macchine a riluttanza assistita nascono da un motore sincrono a riluttanza, ad esso viene aggiunta una certa quantità di magneti nella direzione dell'asse " $q$ ", questo comporta la presenza di un flusso  $\bar{\lambda}_m$ , che è comunque una parte minoritaria del flusso totale. Il flusso totale è la somma di quello precedente e di quello fornito dai magneti:

$$\bar{\lambda}_{tot} = \bar{\lambda} + \bar{\lambda}_m$$

Questo motore risulta quindi adatto al deflussaggio, inoltre fornisce un altro grande vantaggio, cioè ha un rapporto  $\frac{kVA}{kW}$  più alti rispetto al motore a riluttanza e in alcuni casi anche rispetto al motore ad induzione. Questo permette di avere un risparmio anche in termini di elettronica di potenza, in quanto, a parità di potenza attiva, servirà un inverter di taglia inferiore rispetto al caso di un riluttanza semplice. I magneti di compensazione forniscono anche un incremento della coppia.

Nella figura 1.4 si possono notare due diversi modi di inserire magneti all'interno delle barriere di flusso del rotore. Nel primo caso i magneti sono semplicemente inseriti

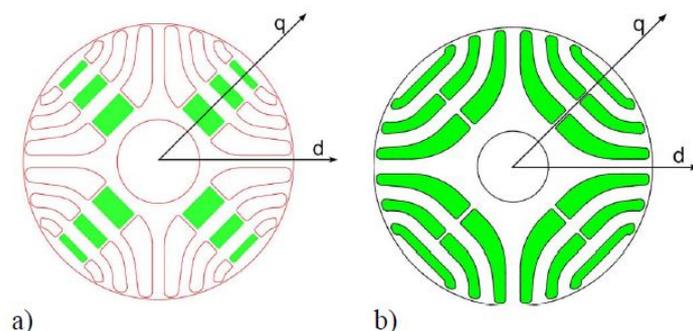


Figura 1.4: Strutture di rotori per macchine a riluttanza assistita [2]

meccanicamente, nel secondo caso si ipotizza l'iniezione di un plastomagnete a base di ferrite.

## 1.2 Vantaggi e svantaggi

Nei tradizionali motori a corrente continua e in quelli sincroni la presenza di un apparato di eccitazione è causa di perdite Joule. Questo apparato è formato da avvolgimenti che vengono percorsi da corrente, che quindi sono fonte di calore. Per cui, in alcuni casi, può risultare complicato dissipare a dovere il calore dall'interno della macchina. Inoltre la presenza di spazzole e lamelle, costantemente a contatto, aumenta l'attrito e rende più probabile la rottura di uno di questi componenti, soprattutto se la macchina lavora in ambienti sporchi.

Le macchine a magneti permanenti, invece, garantiscono un annullamento totale, o quasi totale, delle perdite Joule di eccitazione. In particolare, nelle macchine brushless e in quelle a riluttanza assistita, l'assenza del circuito di eccitazione nel rotore e la presenza dei magneti garantiscono una notevole compattezza e leggerezza. Pertanto sempre più spesso vengono scelte queste macchine in applicazioni automotive. L'assenza dei contatti striscianti permette ai motori brushless e a riluttanza assistita di ricevere minore manutenzione.

I motori brushless, rispetto ai motori a corrente continua, oltre ai sopracitati vantaggi meccanici, presentano anche un migliore rendimento e un campo di variazione della velocità più ampio. Mentre, rispetto ai motori ad induzione, hanno prestazioni dinamiche migliori e dimensioni minori a pari potenza, oltre a un rendimento migliore.

Un problema dei motori brushless è la cosiddetta *cogging torque*. La presenza delle cave di statore provoca un'ondulazione di coppia (anche se il motore non è alimentato) a causa della diversa "situazione locale" magnetica che si crea con la rotazione del rotore. Per compensare questo problema si adotta il metodo dello *skewing*, che consiste nel dare un'inclinazione allo statore o al rotore

I vantaggi dei motori a riluttanza assistita, rispetto a quelli a riluttanza, sono già stati accennati nel capitolo 1.1.3 e sono principalmente un  $\cos\phi$  più elevato e un aumento della coppia, dato che:

$$T \propto \bar{\lambda}_{tot} \wedge \bar{i}$$

Dove il modulo di  $\bar{\lambda}_{tot}$  è minore rispetto a quello di  $\bar{\lambda}$ , ma l’inserimento di  $\bar{\lambda}_m$  lungo l’asse  $-q$  fa sì che l’angolo tra  $\bar{\lambda}_{tot}$  e  $\bar{i}$  aumenti. Nonostante la coppia generata sia maggiore, la corrente magnetizzante necessaria alla formazione del flusso (ovviamente escluso il flusso dei magneti) è maggiore rispetto a quella richiesta da un brushless.

Il motore a riluttanza assistita presenta però un controllo piuttosto complesso. Infatti nel caso in cui si volesse invertire il segno della coppia non sarebbe possibile semplicemente invertire  $i_q$ , dato che essa deve sempre essere opposta a  $\bar{\lambda}_{mq}$ . La soluzione è quindi quella di invertire il segno della corrente in asse  $d$ , ma questo richiede più tempo di quanto se ne impiegherebbe invertendo il segno di  $i_q$ , perchè  $L_d \gg L_q$ . I motori IPM presentano un inconveniente nel momento in cui, ad alte velocità, quando  $\lambda_m \geq \lambda_{min}$  e in una condizione di emergenza, vengono aperti gli switch del convertitore: si ha il cosiddetto *U.G.O.*, che sta per *Uncontrolled Generator Operation*; cioè si è in uno stato in cui il motore si comporta da generatore non controllato, reimmettendo nel sistema delle forze elettromotrici che possono essere elevate. Questa condizione può danneggiare alcuni componenti del sistema, tra i quali il condensatore del DC-bus, che viene caricato dai diodi del convertitore. Per cui è necessario dotare il sistema di una protezione che controlli il rapporto  $\frac{\lambda_m}{\lambda_{min}}$ . Questo genere di macchine può imporre dei limiti riguardo alle condizioni di sovraccarico. Infatti esiste la possibilità che i magneti permanenti si smagnetizzino. Ad esempio nei motori brushless bisogna fare attenzione, nella condizione di rotore bloccato, a non superare circa il 50% della coppia nominale. Stesso discorso per i magneti dei motori a riluttanza assistita, che con alte correnti potrebbero subire una smagnetizzazione irreversibile. Nel caso più estremo, cioè proprio quello della smagnetizzazione irreversibile, la macchina elettrica risulta inutilizzabile.

Lo svantaggio principale dei motori con magneti permanenti, considerando che il motore ad induzione, i motori brushless e i motori a riluttanza assistita hanno statore identico, resta il costo. Infatti oltre al costo della materia prima bisogna anche aggiungere i costi di lavorazione per ottenere le forme adatte che spesso sono molto complesse.

## 1.3 Applicazioni

Gli azionamenti storicamente erano realizzati tramite l’impiego di servomotori in corrente continua, ma con l’evolversi dell’elettronica di potenza e con l’impiego di nuove tecnologie realizzative per i magneti e per i motori, l’uso di motori in corrente alternata è notevolmente cresciuto. Per cui motori sincroni ed asincroni in applicazioni automotive o di trazione, home appliances, in applicazioni di robotica e in ambiti industriali hanno subito un rapido e costante sviluppo.

I motori brushless ad esempio sono caratterizzati da prestazioni dinamiche notevoli, il che li rende adatti ad applicazioni di robotica o, più generalmente, di precisione, che sovente richiedono accelerazioni ed arresti continui, nonchè inversioni del senso di rotazione. Queste caratteristiche, unite al pregio di avere una coppia subito disponibile, li rende particolarmente adatti anche per il settore automotive (ad esempio nelle competizioni di Formula E

vengono usati motori brushless).

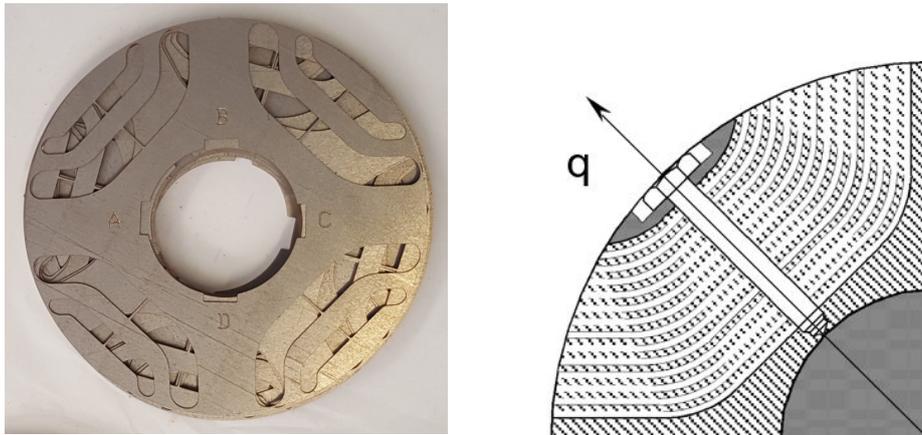
I motori PMASR hanno caratteristiche simili a quelle dei motori brushless, pertanto possono essere impiegati anch'essi in applicazioni di trazione o automotive. Ad esempio è frequente vederli utilizzati come macchina elettrica in un'applicazione mild-hybrid. Possono venire impiegati anche come pompe e in tutte le applicazioni che richiedano coppia in un ampio campo di velocità. Vengono frequentemente usati anche come motori in home appliances, come ad esempio lavatrici.

## 1.4 Macchina a riluttanza assistita - Stato dell'arte

### 1.4.1 Il rotore

I rotor PMASR derivano direttamente da quelli sincroni a riluttanza. Quindi per avere la più alta coppia possibile bisogna rendere il rapporto di anisotropia elevato. Per avere anisotropia a rotore si possono usare lamierini a grani orientati oppure è possibile realizzarlo in una forma che lo renda anisotropo, ma spesso si utilizzano entrambe le tecniche. Avere una struttura anisotropa vuol dire dividere il rotore in più segmenti, separati tra loro da materiale non magnetico (le cosiddette *barriere di flusso*). Questi rotor possono avere una laminazione *convenzionale* oppure *assiale*. Il primo è composto da lamierini (ad esempio Fe-Si) sovrapposti, interponendo uno strato isolante (carta, vernici o film isolanti) tra un lamierino e l'altro, con lo scopo di limitare la presenza di correnti parassite. I lamierini vengono posizionati trasversalmente all'albero, in modo tale da garantire la presenza di barriere di flusso, utili a garantire l'anisotropia. La laminazione assiale, detta anche "ALA" (Axially-Laminated Anisotropic), consiste nell'utilizzo di lamierini di forma diversa tra loro, installati assialmente all'albero del rotore. Questi lamierini sono alternati da uno strato di materiale amagnetico che funziona da barriera di flusso e il pacco di lamierini è tenuto insieme da un polo di fissaggio, anch'esso preferibilmente di materiale amagnetico. Questa struttura presenta una notevole anisotropia se dimensionata bene dato che è possibile realizzare un alto numero di barriere di flusso, ma non è molto utilizzata a causa dell'impossibilità di attuare lo skewing e soprattutto dal fatto che, data la sua complessità costruttiva, sia inattuabile una produzione in serie; bisogna precisare che l'alta anisotropia fa sì che il  $\cos\varphi$  sia mediamente alto e lo sarebbe anche l'efficienza, ma quest'ultima è limitata dalle grandi perdite nel ferro che questa struttura non aiuta ad attenuare. Inoltre le perdite nel ferro non sono trascurabili a causa della presenza di correnti parassite che non vengono attenuate dalla laminazione assiale. Nella figura 1.5a è possibile vedere dei lamierini utilizzati in un rotore a laminazione convenzionale. Si notino le barriere di flusso che aiutano a mantenere l'anisotropia magnetica del rotore.

Il ferro in corrispondenza della parte più esterna delle barriere di flusso e quello al centro delle barriere, viene chiamato *ponticello* (in inglese *rib*). In una macchina teorica essi non dovrebbero esserci perchè diminuiscono l'anisotropia del rotore, ma i ponticelli hanno una essenziale funzione meccanica, in quanto sono utili a mantenere la struttura rotorica compatta, dato che il rotore è soggetto a notevoli forze centrifughe. Resta comunque un punto critico che va progettato a dovere. I ponticelli vengono attraversati da un'induzione magnetica superiore rispetto a quella che si ha nel resto della superficie rotorica e, avendo un'area ridotta, vengono saturati. Inserendo dei magneti permanenti nelle barriere di flusso si ottiene una macchina a riluttanza assistita.



(a) Laminazione convenzionale: esempio di lamierini utilizzati per formare il rotore di un riluttanza o di un PMASR

(b) Laminazione assiale

Figura 1.5: Laminazione assiale e convenzionale

Un difetto tipico delle macchine a riluttanza e PMASR è la forte oscillazione di coppia, causata soprattutto dall'anisotropia rotorica che interagisce con le armoniche della forza magnetomotrice di statore. È noto che per ridurre il ripple di coppia si utilizza la tecnica dello skewing, ma purtroppo nei motori con magneti permanenti nel rotore è possibile attuare solamente uno *stepping* o step-skewing, vale a dire una inclinazione "discreta" del rotore, che riduce l'oscillazione di coppia di circa il 10%. Ma è possibile ridurre ulteriormente l'ondulazione di coppia tramite l'utilizzo di barriere di flusso che abbiano forme particolari. In pratica si alternano lamierini con due diversi profili di barriere di flusso per compensare le armoniche di coppia. Oppure si utilizza un solo tipo di lamierino che contiene due tipi diversi di barriere di flusso [4].

## 1.4.2 Lo statore

Lo statore adottato per le macchine a riluttanza e a riluttanza assistita è costruttivamente identico a quello usato per motori brushless e per motori a induzione, vale a dire un nucleo laminato con cave chiuse o semichiusate. Gli avvolgimenti possono essere *distribuiti* o a bobine *concentrate*, anche dette "bobine di dente". Quest'ultima tecnica di avvolgimento permette una riduzione della lunghezza dei conduttori e quindi una riduzione delle perdite Joule, ma soprattutto favorisce l'incremento delle auto-induttanze di ogni fase. La particolarità di questo tipo di avvolgimenti è che il numero di cave per polo e per fase non è un intero (es.  $q=0.5$ ), come invece avviene per gli statori con avvolgimenti distribuiti (es.  $q=1$ ). I motori a riluttanza assistita con avvolgimenti distribuiti sono soggetti a perdite nel ferro non trascurabili provocate dalle armoniche spaziali generate dai magneti presenti nel rotore, per cui si tenderebbe ad utilizzare le bobine concentrate, che però hanno lo svantaggio di ridurre la coppia di riluttanza.

### 1.4.3 L'effetto dei magneti

#### L'effetto dei magneti sulla coppia

I motori a riluttanza assistita, proprio come i rotorì IPM, generano una coppia che è il risultato della sovrapposizione dell'effetto di anisotropia e dell'effetto dei magneti. Una macchina a riluttanza assistita può essere definita come una macchina IPM in cui il flusso e la coppia prodotti dai magneti sono minori del flusso e della coppia prodotti dalla riluttanza. Come mostrato nel diagramma 1.6, i magneti sono posizionati in maniera tale che, con la rotazione del vettore corrente  $\vec{i}$  fino al suo allineamento con l'asse  $q$ , il flusso totale  $\lambda_{tot}$  finisce esattamente nell'origine [3].

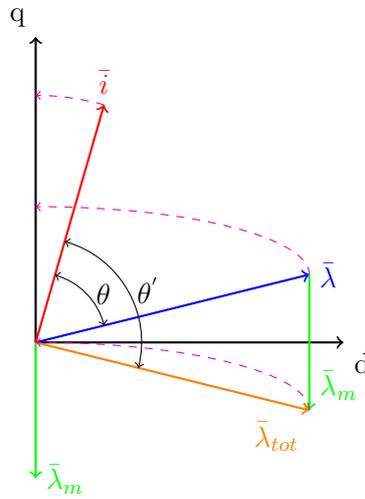


Figura 1.6: Diagramma vettoriale flussi e correnti in assi d e q

La coppia generata, esprimibile nel sistema di riferimento rotante sincrono, è:

$$T = \frac{3}{2} p [\lambda_d i_q - \lambda_q i_d]$$

Ma, sapendo che:

$$\lambda_d = L_d i_d \quad (1.1)$$

$$\lambda_q = L_q i_q - \lambda_m \quad (1.2)$$

Allora, considerando  $L_d$  e  $L_q$  costanti, la coppia è esprimibile come:

$$T = \frac{3}{2} p [\lambda_m i_d + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (1.3)$$

dove  $p$  sono i paia-poli.

Siccome questi motori sono quasi sempre alimentati e controllati tramite inverter a tensione impressa, può essere utile esprimere, a fini controllistici, la coppia in funzione dell'angolo di controllo della corrente di statore  $\gamma$  e della sua ampiezza  $I_s$ :

$$T = \frac{3}{2} p [\lambda_m I_s \cos\gamma - \frac{1}{2}(L_d - L_q) I_s^2 \sin(2\gamma)] \quad (1.4)$$

Dove:

$$i_d = -I_s \sin\gamma \quad (1.5)$$

$$i_q = I_s \cos\gamma \quad (1.6)$$

L'angolo  $\gamma$  è l'angolo della corrente in assi d e q in cui la posizione a  $0^\circ$  è coincidente all'asse q, mentre la posizione a  $90^\circ$  è coincidente all'asse -q. La coppia massima si ha in corrispondenza del cosiddetto MTPA (Maximum Torque Per Ampere), un punto di lavoro identificabile tramite un angolo di anticipo  $\gamma_{MTPA}$ , che per i motori PMASR assume valori di poco inferiori a  $45^\circ$ .

Come detto nel capitolo 1.2, la coppia è proporzionale al prodotto esterno tra il flusso totale e il vettore corrente,  $T \propto \bar{\lambda}_{tot} \wedge \bar{i}$ . Si vede dal diagramma vettoriale 1.6 che l'introduzione dei magneti lungo l'asse q favorisce una rotazione in senso orario del vettore flusso. Per cui la coppia aumenta dato che l'angolo  $\theta'$  tra  $\bar{\lambda}_{tot}$  e  $\bar{i}$  è maggiore dell'angolo  $\theta$ , tra  $\bar{\lambda}$  e  $\bar{i}$ .

### L'effetto dei magneti sulla potenza attiva

Nel diagramma vettoriale in figura 1.7 è possibile osservare che l'angolo  $\varphi$  tra il vettore tensione e il vettore corrente sia relativamente grande, ne consegue che il  $\cos\varphi$  sia invece basso. Questo è uno svantaggio dal punto di vista logistico ed economico, dato che l'inverter della macchina sarà sovradimensionato rispetto alla potenza attiva della macchina. Il  $\cos\varphi$  è una funzione del rapporto di anisotropia  $\zeta$ ; all'aumentare di quest'ultimo il  $\cos\varphi$  cresce, fino ad arrivare, nel migliore dei casi (non considerando la saturazione del ferro), a valori che si aggirano intorno allo 0.8.

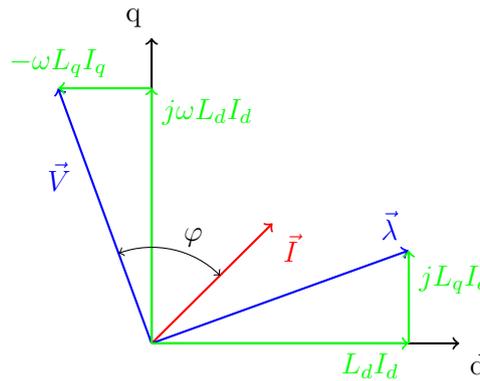


Figura 1.7: Diagramma vettoriale macchina a riluttanza

Inserendo dei magneti nelle barriere di flusso si hanno importanti benefici. Il primo è che una porzione del flusso dei magneti permanenti permette la saturazione dei ponticelli;

ciò porta ad un aumento del rapporto di anisotropia  $\zeta = \frac{L_d}{L_q}$ , dato che  $L_q$  decresce. Il secondo beneficio è la presenza di un flusso  $\lambda_m$  lungo l'asse -q. Questi due effetti fanno sì che il flusso  $\lambda_q = L_q i_q$  venga dapprima ridotto e poi compensato, facendo così ruotare il vettore flusso  $\vec{\lambda}$  in senso orario e di conseguenza avvicinando il vettore tensione  $\vec{V}$  al vettore corrente  $\vec{I}$ , come si può vedere dalla figura 1.8. I magneti permanenti quindi contribuiscono ad un incremento del  $\cos\varphi$ ; questo permette, confrontando una macchina a riluttanza e una macchina PMASR di pari potenza attiva, di utilizzare un inverter di taglia inferiore, guadagnandone in logistica e in costo.

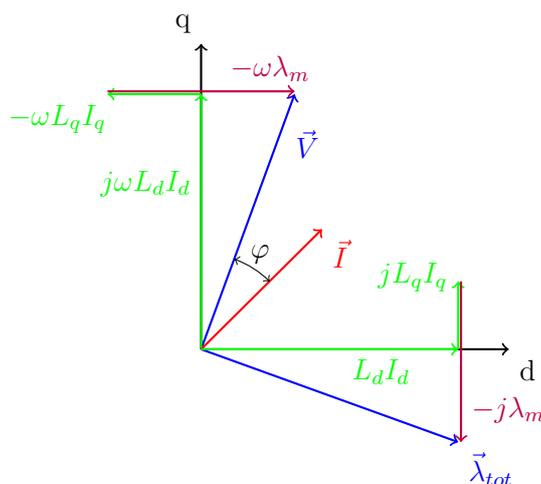


Figura 1.8: Diagramma vettoriale macchina a riluttanza assistita

### L'effetto dei magneti sul deflussaggio

Nei motori sincroni come i brushless o i motori PMASR, in cui non è possibile regolare direttamente il campo magnetico di eccitazione, è importante l'operazione di *deflussaggio*. Il deflussaggio è un'operazione che viene eseguita per utilizzare il motore a potenza costante per velocità superiori alla sua *velocità base*, che è la velocità fino a cui il motore funziona a coppia costante e a potenza lineare.

L'inserimento dei magneti permanenti permette di avere un deflussaggio ad una potenza più grande e, soprattutto, costante all'aumentare della velocità. La coppia invece è decrescente, ma è comunque più grande di quella che si avrebbe con un motore a riluttanza. Il fattore di potenza  $\cos\varphi$  cambia completamente comportamento. Infatti, mentre nel motore di partenza esso è decrescente, grazie all'utilizzo dei magneti esso assume un andamento crescente all'aumentare della velocità. Un particolare svantaggio di questi motori si verifica nel momento in cui si lavora a vuoto ad alta velocità.

Come si vede dal diagramma 1.10 esiste una componente *smagnetizzante* della corrente utile a ridurre il valore del flusso totale, dato che:

$$\lambda'_{tot} = \lambda_m - L_q i'_q \quad (1.7)$$

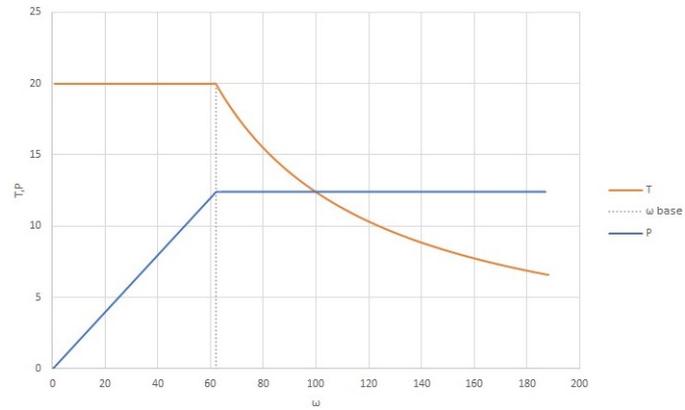


Figura 1.9: Andamenti generici di coppia e potenza: dopo aver superato la  $\omega_{base}$  la coppia decresce e la potenza rimane costante

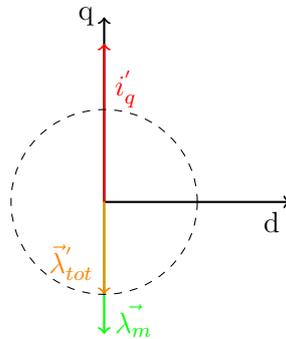


Figura 1.10: Funzionamento a vuoto della macchina PMASR

Questa corrente però deve essere limitata per evitare di avere perdite Joule troppo elevate e quindi il range di deflussaggio viene ridotto.



## Capitolo 2

# Studio di una macchina a riluttanza assistita: progettazione e dimensionamento

La progettazione e il dimensionamento della macchina di partenza sono stati eseguiti dal team di ricerca del professor Nicola Bianchi dell'Università di Padova, quindi in questa tesi se ne parlerà, solamente in maniera riassuntiva, per dare alcune informazioni sulle dimensioni.

Il motore è stato progettato a partire da una **densità di corrente** pari a **12A/mm<sup>2</sup>** ed è stato poi fatto funzionare con una corrente nominale pari a 3 A. Lo statore di un motore a riluttanza è dimensionato nello stesso modo in cui si dimensiona lo statore di un motore a induzione, per cui la parte interessante della progettazione è l'ottimizzazione della configurazione del rotore. Come visto nel capitolo precedente, la coppia è proporzionale alla differenza tra l'induttanza in asse d e quella in asse q, per cui l'ottimizzazione è basata nel rendere più grande questa differenza. Vengono di seguito elencati alcuni fattori costruttivi che partecipano alla variazione delle performance del motore [5].

- Numero di barriere di flusso
  - Aumentare il numero di barriere di flusso aumenta il rapporto di anisotropia  $\zeta$
  - Aumentare il numero di barriere di flusso è svantaggioso dal punto di vista meccanico
  - Avere un numero di barriere di flusso maggiore di 5 non porta particolari benefici
- Rapporto aria-ferro  $k_w = \frac{W_b}{W_g}$ 
  - $W_b$  è la somma dello spessore delle barriere di flusso
  - $W_g$  è la somma dello spessore del percorso dei flussi
  - Aumentare  $k_w$  fino a 0.8 migliora la coppia, oltre 0.8 la coppia diminuisce

- Traferro:
  - Più basso è, più la coppia aumenta
- Paia poli:
  - Il rapporto di anisotropia diminuisce con il numero di poli

Il rotore progettato ha 4 poli e di conseguenza ha 4 gruppi di barriere di flusso, che sono state progettate in modo tale da abbassare il ripple di coppia.

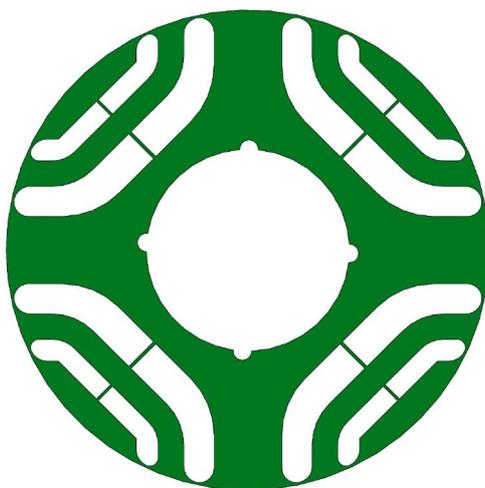


Figura 2.1: Rappresentazione di un lamierino che compone il rotore

<b>Coppie polari</b>	p	2
<b>Lunghezza pacco</b>	$L_{stk}$	40 mm
<b>Fattore di packaging</b>	$K_{pack}$	0.96

Tabella 2.1: Caratteristiche generali del motore

Da  $K_{pack}$  e  $L_{stk}$  è possibile ricavare la lunghezza di laminazione  $L_{Fe}$ :

$$L_{Fe} = L_{stk} \cdot K_{pack}$$

Da  $n_c$  e  $n_{pp}$  è possibile ricavare il numero di conduttori in serie per cava  $n_{cs}$ :

$$n_{cs} = n_c / n_{pp}$$

Nella tabella 2.3 sono elencate le dimensioni caratteristiche dello statore, che sono mostrate nell'immagine 2.2. Infine viene mostrata la sezione di statore e di rotore, considerando lo skewing, del motore di partenza (fig. 2.4).

<b>N. di conduttori in serie per cava</b>	$n_c$	100
<b>N. di circuiti in parallelo</b>	$n_{pp}$	1 %
<b>Fattore di riempimento di cava</b>	$K_{fill}$	0.45

Tabella 2.2: Caratteristiche di avvolgimento del motore

<b>N. totale cave</b>	$Q_s$	36
<b>Diametro esterno</b>	$D_e$	150 mm
<b>Diametro interno</b>	$D_s$	96 mm
<b>Larghezza dente</b>	$w_t$	4.45 mm
<b>Apertura cava</b>	$w_{so}$	2.5 mm
<b>Altezza cava</b>	$h_s$	13.85 mm
<b>Altezza apertura cava</b>	$h_{so}$	0.7 mm
<b>Isolante cava</b>	$h_{wed}$	1 mm
<b>Larghezza cava (ext)</b>	$w_s$	4.3 mm
<b>Larghezza cava (int)</b>	$w_{se}$	6.5 mm
<b>Angolo prima cava</b>		5°

Tabella 2.3: Dimensioni di statore

<b>Diametro esterno</b>	$D_{re}$	95.2 mm
<b>Diametro interno</b>	$D_{ri}$	36.05 mm
<b>Spessore magneti</b>	$t_m$	4.8 mm
<b>Lunghezza ponticello interno</b>	$h_{ri}$	6.92 mm
<b>Distanza PM-traferro</b>	$d_{bi}$	0.6 mm
<b>Lunghezza ponticello esterno</b>	$h_{re}$	4 mm
<b>Distanza PM-esterno</b>	$d_{be}$	0.5 mm

Tabella 2.4: Dimensioni di rotore

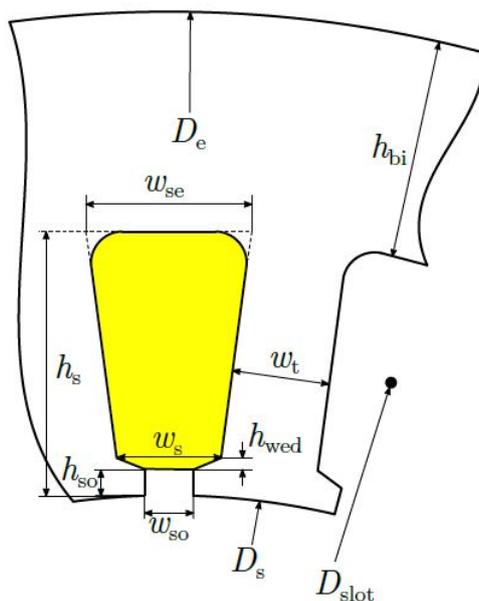


Figura 2.2: Quote e dimensioni per lo statore

Come già detto in precedenza, lo skewing in questo motore è stato progettato in modo tale da garantire una inclinazione di  $10^\circ$ . La presenza dei magneti permanenti ha imposto di attuare uno step-skewing, anziché uno skewing puro. Nell'immagine 2.3 è mostrata la sequenza di skewing per i pacchi di lamierini. Si hanno 8 gruppi da 10 lamierini, sfasati tra loro di  $1.25^\circ$ .

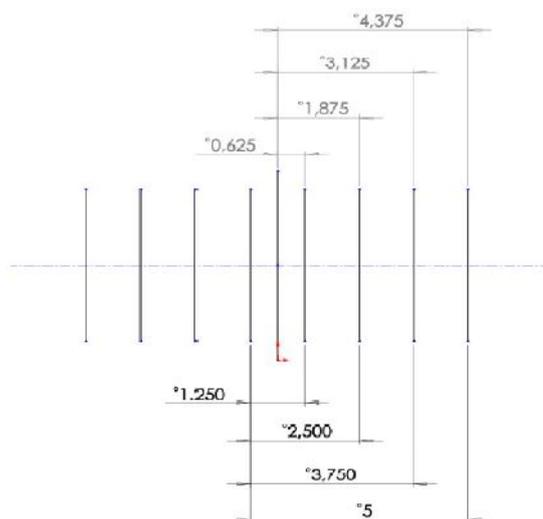


Figura 2.3: Schema dello skewing

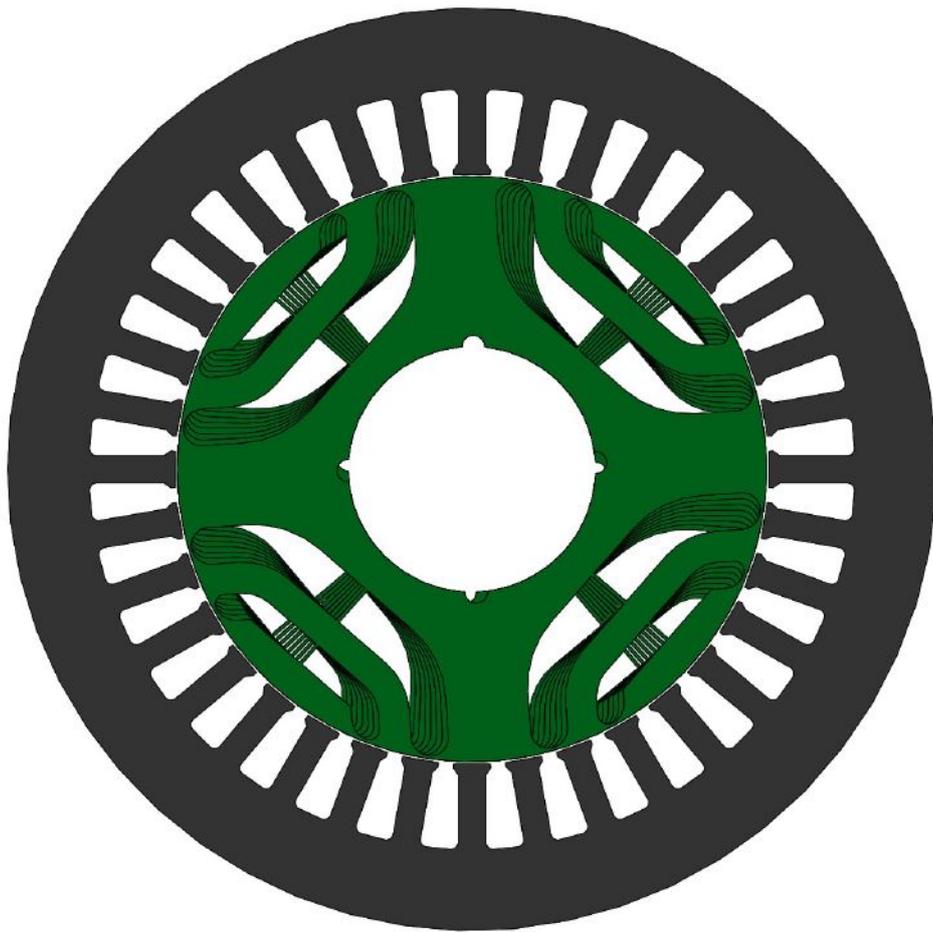


Figura 2.4: Rappresentazione di statore e rotore (con skewing)



## Capitolo 3

# Tipologie di magneti utilizzate

### 3.1 Scelta e produzione di magneti permanenti

#### 3.1.1 Scelta del tipo di magnete

Nelle macchine elettriche a magneti permanenti come i brushless si tende a utilizzare materiali ferromagnetici duri che garantiscano magneti permanenti dotati di un flusso magnetico rilevante, per cui si utilizzano terre rare come NdFeB o SmCo, che sono dotate di caratteristiche B-H tra le migliori rispetto a quelle dei materiali tipicamente utilizzati, come le ferriti. Dagli anni '80 l'utilizzo del NdFeB è andato crescendo, grazie alle ottime caratteristiche magnetiche e ad un costo non così elevato, se paragonato al Samario-Cobalto. I magneti in terre-rare sono però limitati dall'aver una temperatura di Curie bassa relativamente ad altri materiali usati per i magneti, come Alnico o SmCo, quindi per ovviare a questo inconveniente si aggiunge un'altra terra rara: il disprosio (Dy). Questa operazione incrementa di circa il 10% la temperatura di Curie del NdFeB ma ne aumenta anche il costo. Infatti la nota più negativa di questi materiali -neodimio e disprosio- è il costo e la sua variabilità nel tempo (variazioni di costo anche superiori al 2000%), perciò potrebbe risultare rischioso in investimenti a lungo termine.

Lo scopo dei motori a riluttanza assistita non è quindi quello di raggiungere prestazioni eccellenti a tutti i costi, ma di avere buone prestazioni con costi convenienti; per cui ha poco senso l'utilizzo di magneti permanenti pregiati e si preferisce utilizzare magneti più economici, come ad esempio i **plastomagnet**i.

#### 3.1.2 Plastomagnet

Le ferriti e le terre rare utilizzate per realizzare magneti permanenti vengono trattate mediante tecniche di "metallurgia delle polveri". Per metallurgia delle polveri si intendono tutti quei processi che vedono coinvolti "metalli polverizzati" in processi particolari come pressatura, sinterizzazione, iniezione, estrusione e altri, semplificando ed ottimizzando notevolmente i processi produttivi. Queste polveri vengono mescolate con un materiale polimerico (ad esempio poliammide) che funziona da "matrice", cioè da legante; esso può essere un materiale *termoindurente*, *termoplastico* o un *elastomero*. I primi una volta sottoposti al calore si rammoliscono e successivamente si induriscono; la forma viene conferita

tramite un processo di pressatura prima dell'indurimento. I materiali termoplastici invece vengono modellati dopo essere stati scaldati e successivamente si irrigidiscono. Gli elastomeri possono essere sia termoindurenti che termoplastici, ma sono molto deformabili ed elastici. In base al tipo di materia plastica si possono utilizzare determinati processi, ad esempio con i termoindurenti (come la fenolica) si attua la compressione, mentre con i termoplastici (come la poliammide o il poliestere) il prodotto può essere sottoposto a iniezione o estrusione. Gli elastomeri prevedono i processi di estrusione e calandratura. Nella tabella ?? è possibile vedere a quali processi sono compatibili le polveri metalliche comunemente utilizzate per realizzare magneti permanenti.

	<b>Compressione</b>	<b>Iniezione</b>	<b>Estrusione</b>	<b>Calandratura</b>
NdFeB	Sì	Sì	Sì	Sì
SmCo	Sì	Sì	No	No
Alnico	No	Sì	Sì	No
Ferrite	No	Sì	Sì	Sì
Ibridi	Sì	Sì	No	Sì

Tabella 3.1: Compatibilità tra i processi e i metalli magnetici



Figura 3.1: Esempio di polvere metallica usata per realizzare un magnete (NdFeB) [6]

Attorno ai plastomagnetici si sta concentrando un rapido sviluppo tecnologico, per determinate ragioni. Innanzitutto la versatilità dei processi con cui vengono creati questi magneti permette di realizzarli con le più variegate proprietà chimiche, meccaniche e magnetiche, ma anche grazie ai seguenti vantaggi:

- É possibile creare forme complesse
- Presentano buona resistenza agli sforzi (es. centrifughi) e alla corrosione
- Sono meno fragili dei magneti sinterizzati
- Contengono meno materiale prezioso, quindi costano meno dei normali magneti
- Hanno processi produttivi relativamente economici

In questa tesi ci si concentrerà sulla realizzazione di plastomagneti tramite il processo di iniezione o più propriamente **stampaggio ad iniezione**; esso consiste in tre principali azioni:

**Mescolamento** La polvere magnetica viene mescolata con il legante polimerico a determinate temperature e velocità del mixer. La polvere in alcuni casi può essere preventivamente cosparsa di un agente che favorisce l'accoppiamento tra essa e il legante.

**Granulazione** Si formano dei granuli, o più propriamente *pellet*, estrudendo il prodotto e successivamente tagliandolo.

**Iniezione nello stampo** Il prodotto sotto forma di granuli viene introdotto in un macchinario a vite e contemporaneamente scaldato, favorendo così il suo deposito all'interno di uno stampo

Il prodotto che si ottiene viene poi magnetizzato una volta raffreddato e rimosso dallo stampo. È possibile dare un orientamento magnetico al materiale quando è ancora nello stampo, sottoponendolo a un campo magnetico generato da magneti permanenti o da un circuito magnetico.

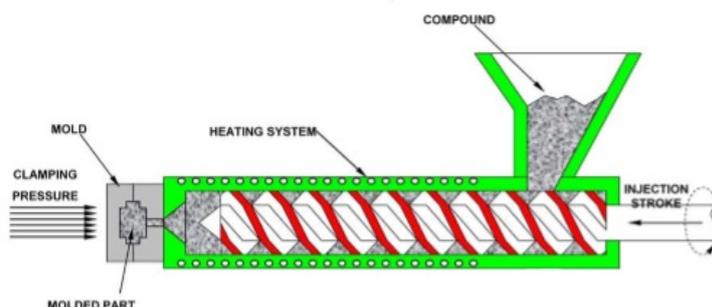


Figura 3.2: Processo di iniezione (Arnold Magnetic Technologies)

Tra i processi per realizzare plastomagneti, l'iniezione è la più utilizzata perchè permette di ottenere forme geometriche complesse con tolleranze che altri processi non riescono a raggiungere. Quindi non richiedono operazioni di rifinitura e questo permette di risparmiare sui costi di produzione, sebbene i macchinari utili a questo processo siano molto costosi. Quest'ultimo fattore rende la realizzazione di plastomagneti per iniezione più adatta a produzioni in serie, su larga scala. Nell'immagine 3.2 è rappresentato un iniettore: la vite al suo interno mescola il prodotto e lo spinge verso il foro d'uscita, mentre l'involucro riscalda favorisce il suo rammollimento. Infine sulla sinistra è presente lo stampo in cui il materiale si deposita.

In questa tesi sono state realizzate tre tipologie di plastomagneti in laboratorio, di cui due a base di NdFeB e una a base di ferrite. I primi due prototipi sono stati realizzati partendo da composti commerciali sotto forma di granuli, in cui polvere metallica e matrice polimerica sono già unite. Il terzo campione invece è stato interamente realizzato in laboratorio, partendo quindi da polvere metallica e pellet di polimero separati. Nei successivi capitoli 3.2, 3.3 e 3.4 verranno descritte le fasi di produzione dei tre prototipi.

## 3.2 Plastoneodimio commerciale

### 3.2.1 Descrizione del prodotto di partenza

Per la realizzazione di questo magnete si è utilizzato un composto isotropo, di produzione cinese, prodotto da *Toda Magnequench Magnetic Material*. Il composto si chiama **MQIP-M260** ed è venduto sotto forma di pellet, cioè polvere metallica e legante plastico sono già stati uniti. La polvere magnetica usata è **NdFeB**, mentre la matrice plastica usata è la **PA12**.

Quest'ultima è la più leggera tra le poliammidi, per cui viene sovente utilizzata anche in applicazioni automotive, aeronautiche, sportive e anche elettriche; altre importanti caratteristiche della PA12 sono:

- Basso assorbimento dell'acqua (il più basso tra le poliammidi)
- Ottima resistenza agli agenti ambientali
- Ottima resistenza agli agenti chimici
- Ottima resistenza agli urti

<b>Densità</b>	5.11	$g/cm^3$
<b>MFR</b>	524	$g/10min @ 270\text{ }^\circ\text{C}, 5kg$
<b>Umidità</b>	20	ppm
<b>Resistenza alla flessione</b>	104	MPa
<b>Resistenza alla trazione</b>	60	MPa
<b>Resistenza all'impatto (Izod)</b>	15	$kJ/m^2$
<b>Restringimento</b>	0.5	%

Tabella 3.2: Caratteristiche fisiche del prodotto MQIP-M260

Nella tabella 3.2 sono mostrate le caratteristiche fisiche del composto, dove MFR sta per Melt Flow Rate e cioè la velocità con cui si riesce a far fluire il polimero fuso. L'umidità è espressa in "ppm", che sta per "parti per milione" di acqua nel composto. Mentre per Izod si intende una particolare prova ad urto tramite pendolo, simile alla prova di Charpy.

<b>Temperatura processo</b>	230, 250, 265, 270	$^\circ\text{C}$
<b>Temperatura stampo</b>	80	$^\circ\text{C}$
<b>Velocità</b>	55	mm/s

Tabella 3.3: Parametri per l'iniezione di MQIP-M260

Nella tabella 3.3 sono espressi i parametri per il processo di stampaggio ad iniezione, in cui la temperatura di processo è la temperatura a cui deve essere portato il composto per avere un prodotto fuso e uniforme. A 80 °C quindi si può eseguire lo stampo, cioè si conferisce una forma al composto che si solidifica. L'ultimo dato esprime la velocità con cui si deve far proseguire il composto all'interno dell'iniettore.

$B_r$	0.521	T
$H_c$	368	kA/m
$H_{ci}$	954	kA/m
$(BH)_{MAX}$	48.5	$kJ/m^3$

Tabella 3.4: Caratteristiche magnetiche del prodotto: MQIP-M260

La tabella 3.4 mostra le performance magnetiche del prodotto già finito, sotto forma di magnete. La  $B_r$ , *induzione residua* o *rimanenza*, è il dato più rappresentativo di un magnete ed esprime l'induzione che rimane in un magnete quando viene azzerato il campo magnetizzante.  $H_c$  e  $H_{ci}$  sono, rispettivamente, il *campo coercitivo* e il *campo coercitivo intrinseco*. Il primo è il campo magnetico da applicare per annullare il flusso prodotto dal magnete, il secondo è il campo magnetico da applicare per smagnetizzare il magnete. L'ultimo dato,  $(BH)_{MAX}$ , rappresenta la massima energia che il magnete può immagazzinare.

### 3.2.2 Realizzazione del campione

#### Essiccazione

Il nylon (PA12) è un materiale *igroscopico*, cioè ha una predisposizione ad assorbire l'umidità presente nell'ambiente a lui circostante. È fortemente sconsigliato utilizzare questo polimero in ambienti molto umidi o in applicazioni che richiedano il contatto con l'acqua, perchè potrebbero non essere garantite le proprietà di stabilità dimensionale. In particolare, nel caso in esame, durante lo stampaggio potrebbero formarsi delle bolle nel materiale portato ad alta temperatura. In laboratorio per eliminare l'acqua all'interno del composto si avevano due scelte: una stufa sottovuoto oppure un essiccatore. È stato scelto quest'ultimo per questioni logistiche e di velocità del processo ed è stata impostata un'essiccazione a 80°C per 4 ore, prima di ogni lavorazione.

#### Stampaggio

L'obiettivo è quello di creare dei campioni simulando il processo di iniezione tramite una **pressa a piastre calde**. In laboratorio si è utilizzata una pressa *Collin* le cui piastre sono riscaldabili fino a 300 °C. La realizzazione del campione avviene tramite la posa dei pellet all'interno di una cornice, che è di rame perchè è un ottimo conduttore di calore e ciò garantisce una distribuzione del calore uniforme su tutti i lati a contatto con i granuli. Come mostrato nell'immagine 3.5, questa cornice (o stampo) viene appoggiata su un foglio



Figura 3.3: Essiccatore usato in laboratorio

di alluminio, che a sua volta è appoggiato su una piastra di rame che serve a distribuire il calore e la pressione sulla superficie del prodotto. Al di sopra dello stampo si ha nuovamente un foglio di alluminio e una piastra di rame per i medesimi motivi. Un importante passo è l'applicazione di spray distaccante su tutte le superfici di utilizzo per favorire il distacco del campione, in particolare dalla cornice e dai fogli di alluminio.



Figura 3.4: Piastre e stampo in rame. Lo stampo ha dimensioni: 60X60X6 mm

Il procedimento di iniezione simulata nella pressa Collin è abbastanza complesso e soprattutto è basato sull'esperienza. I primi campioni venivano creati tramite avvicinamento delle piastre, già a 275 °C, con successivo **degasaggio**. Questa fase veniva effettuata avvicinando e allontanando le piastre tra di loro ripetutamente con l'obiettivo di eliminare gas e vapori derivanti dal riscaldamento del materiale. Una volta conclusa la fase di degasaggio si è passati alla fase di **compressione**: le piastre della pressa sono state avvicinate tra loro in modo tale da esercitare sullo stampo una pressione di **200 bar**. Inizialmente il tempo di compressione a 200 bar è stato di **3.30 minuti**. I campioni risultanti da questo processo risultavano buoni sulle due superfici grandi, ma molto porosi e dall'aspetto fragile sulle superfici laterali. Successivamente la tecnica è stata affinata e cioè, prima della fase di degasaggio, le piastre in temperatura venivano avvicinate il più possibile, senza andare in pressione, per favorire una fusione più completa dei pellet. Si è rimasti in questo stato



Figura 3.5: Disposizione del prodotto nello stampo e preparazione allo stampaggio



Figura 3.6: Pressa a piastre calde Collin P200T

per **2 minuti** (3 minuti per gli ultimi campioni), dopo di che si è passati al degasaggio e alla compressione, abbassando i tempi di quest'ultima a 2 minuti.

La fase finale di ogni processo è avvenuta tramite raffreddamento forzato delle piastre, ad acqua fino a 90 °C e ad aria da 90 °C a 80 °C, per rimuovere eventuali residui di calcare lasciati dall'acqua nei condotti di raffreddamento che passano all'interno delle piastre e che alla lunga possono intasarli. A 80 °C il campione è stato prelevato (fig. 3.7)

I primi campioni mostrano una struttura più porosa (figura 3.8), con la presenza di alcune bolle molto grandi. Con l'affinamento della tecnica si è riusciti ad ottenere campioni più omogenei e simili tra loro, con una sostanziale diminuzione della porosità in quasi tutti i campioni, garantendo così una maggiore lavorabilità con la fresa.

### Spianamento e fresatura

Ovviamente con i mezzi a disposizione non è stato possibile realizzare uno stampo della forma voluta ma, come già detto, si è usato uno stampo a superficie quadrata di altezza 6 mm. Da questo stampo era necessario ricavare la forma esatta dei magneti che dovevano

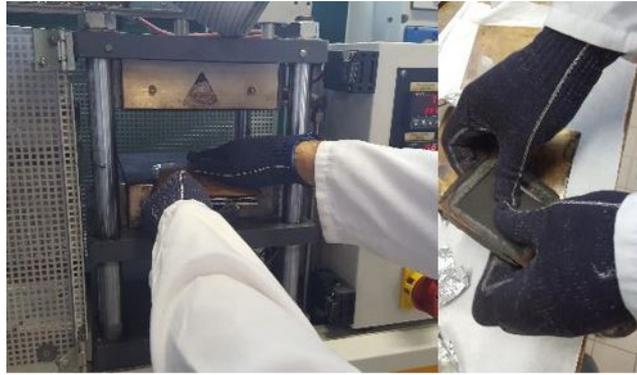


Figura 3.7: Rimozione dello stampo a 80 °C



Figura 3.8: Primo campione stampato di MQIP-M260, si noti la porosità sulla superficie laterale

incastrarsi esattamente all'interno delle barriere di flusso del rotore. Per fare ciò si è utilizzata una fresatrice a controllo numerico.

Siccome il pacco rotorico è diviso in gruppi da 10 lamierini, per un'altezza totale di 4.8 mm per gruppo, bisognava innanzitutto spianare la "mattonella", riducendone lo spessore. Per compiere questa operazione ci si è impiegato un giorno intero. Si è utilizzata una fresa a candela con diametro pari a 10 mm. Una volta definito il percorso con la fresatrice CNC si è proceduto allo spianamento. Due campioni risultano molto buoni, gli altri sono decenti ma comunque quasi tutti presentano dei solchi lungo le direzioni percorse dalla fresa, probabilmente dovuti al riscaldamento della stessa che ha provocato la fusione della matrice plastica del campione.

Per ottenere la forma utile del magnete si è cercato di ottimizzare il più possibile il numero di "tegolini" all'interno di ogni campione, tenendo conto del fatto che la fresa più sottile presente in laboratorio avesse diametro pari a 1 mm. Per realizzare una forma accettabile si è disegnato con Solidworks un modello che è stato poi convertito in un formato leggibile dalla fresa (formato IGES), partendo dal disegno in figura ?? che contiene

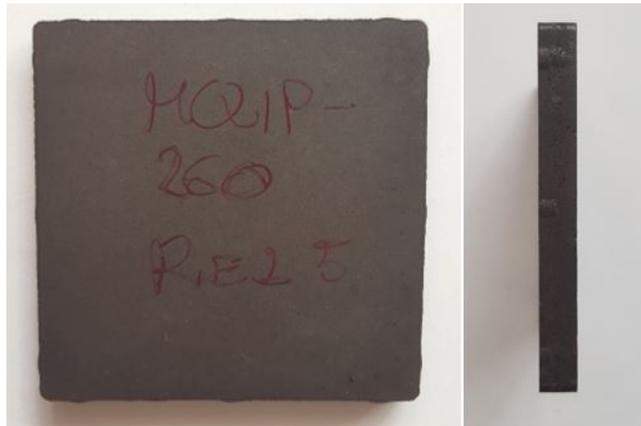


Figura 3.9: Quinto campione stampato di MQIP-M260, si noti come la porosità interna sia diminuita dopo aver cambiato alcuni passi del processo

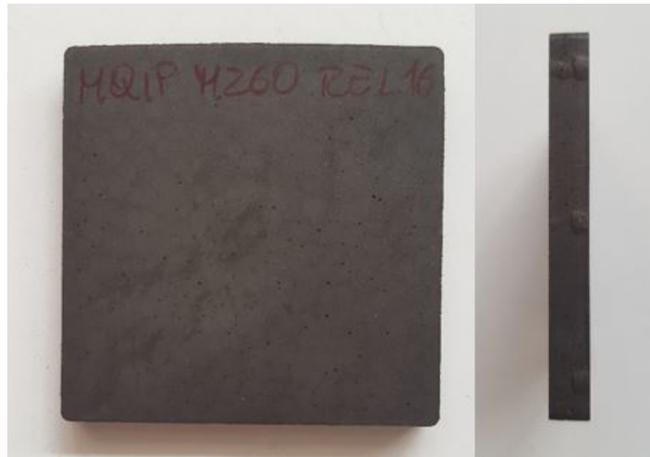


Figura 3.10: Ultimo campione stampato di MQIP-M260, presenta qualche poro sulla superficie frontale mentre la superficie laterale è quasi uniforme a prova dell'affinamento della tecnica di stampaggio

le misure e le tolleranze corrette. Le forme base dei magneti sono due, un tegolino piccolo ed uno grande, che sono stati adattati in due configurazioni partendo dalla mattonella spianata. La prima configurazione consiste in 8 tegolini grandi (configurazione A) e 4 tegolini piccoli, la seconda configurazione consiste in 16 tegolini piccoli (configurazione B). Considerando che per ogni pacchetto da 10 lamierini servono 8 tegolini grandi e 8 tegolini piccoli, considerando anche che ci sono in totale 8 gruppi di lamerini, servono in totale 64 tegolini grandi e 64 tegolini piccoli. Essi, quindi, si potrebbero ottenere fresando 8 campioni con la configurazione A e 2 campioni con la configurazione B, impiegando così solamente 10 mattonelle. In realtà però sono stati fresati 14 campioni per sicurezza e per avere dei campioni di riserva.



Figura 3.11: Spianamento di un campione con la fresatrice

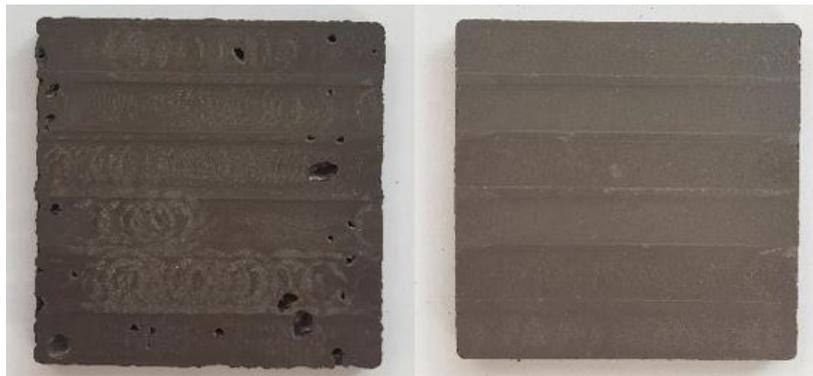


Figura 3.12: Campione 1 e 5 spianati. É visibile la differenza di qualità, in quanto il campione 1 ha molti fori causati dalla presenza di bolle al suo interno

Entrambe le configurazioni sono provviste di "isole" in ogni vertice della superficie frontale, cioè porzioni di superficie atte a mantenere il campione fermo durante la fresatura tramite l'utilizzo di viti che fungono da morsa. Tra un tegolino e l'altro e tra un tegolino e un'isola sono presenti dei ponticelli meccanici alti 2 mm, che hanno la funzione di mantenere la struttura solida durante il processo di fresatura. Il campione, una volta fresato, è stato rimosso dal supporto e i singoli tegolini sono stati recuperati spezzando manualmente i ponticelli meccanici e, sempre manualmente tramite lime di diversa grana, sono stati limati per poter eliminare i residui dei ponticelli.

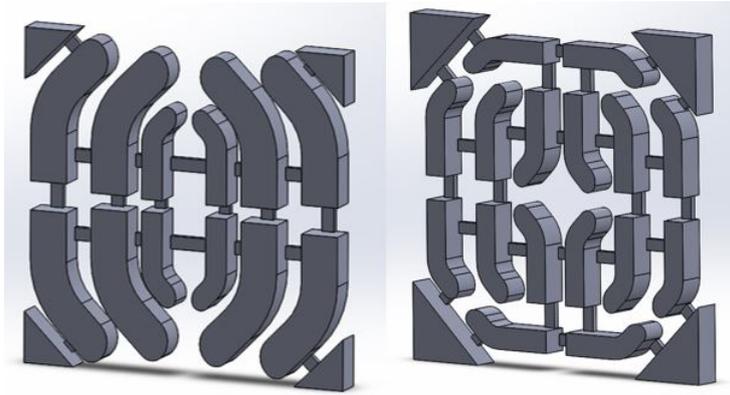


Figura 3.13: Configurazioni A e B, realizzate con Solidworks, partendo dalle misure della figura ??



Figura 3.14: Fresatura di un campione di MQIP-M260



Figura 3.15: Risultato della fresatura

In ultimo luogo i campioni sono stati cosparsi su ogni lato con lo spray "Colors" della *Motip Dupli*. Esso è uno smalto trasparente, a base acrilica, che serve per creare uno strato protettivo sui magneti, che aiuti ad evitare l'ossidazione in caso di contatto con l'acqua o in caso di utilizzo in ambienti umidi (figura 3.16)



Figura 3.16: Copertura dei tegolini con spray protettivo

### 3.2.3 Magnetizzazione

Una volta completata la realizzazione dei tegolini, essi possono finalmente diventare dei magneti. Si è proceduto quindi alla magnetizzazione dei tegolini tramite l'uso di un magnetizzatore della *Siemens*. Il magnetizzatore in questione concettualmente è composto da 3 elementi:

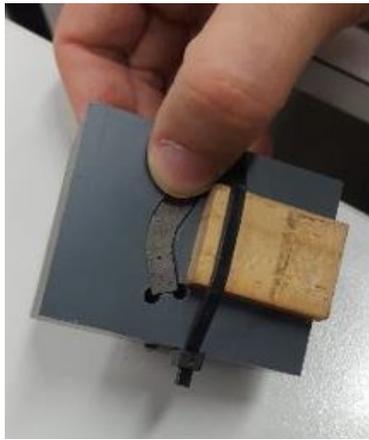
- Un raddrizzatore di interfacciamento con la rete
- Un banco di condensatori che vengono caricati accumulando energia
- Una bobina

Il banco di condensatori, dopo essere stato caricato tramite il raddrizzatore, cede la sua energia ad una bobina, al cui interno è presente il campione da magnetizzare, secondo la relazione:

$$\frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}CV^2$$

Questa bobina quindi genera un forte campo magnetico verso l'alto che magnetizza i tegolini.

Come si può vedere dalle immagini i tegolini sono stati sistemati in un blocco forato di materiale plastico, posizionandone otto grandi e otto piccoli per volta.



(a) Posizionamento dei tegolini nel blocco di plastica, che vengono tenuti fermi da un blocco di legno e una fascetta



(b) Posizionamento del blocco di plastica all'interno della bobina del magnetizzatore

Figura 3.17: Magnetizzazione dei tegolini

Sono state effettuate 4 magnetizzazioni con il blocco verso l'alto e 4 magnetizzazioni mantenendo il blocco verso il basso, per ottenere le 2 orientazioni magnetiche Nord e Sud. Dalle foto è possibile osservare la presenza di due componenti in legno ai lati del blocco di plastica: essi servono ad evitare che, dopo la magnetizzazione, i campioni vengano proiettati in direzioni opposte sotto l'effetto della forza repulsiva da loro generata, precludendo così ogni possibilità di rottura dei magneti.



Figura 3.18: Strato di magneti completo: polo Nord e polo Sud

### 3.2.4 Caratterizzazione magnetica

Le misure magnetiche sono state effettuate tramite l'utilizzo di un **isteresigrafo** del produttore *Laboratorio Elettrofisico*; questo strumento è in grado di misurare l'induzione residua  $B_r$  (con precisione  $\pm 1\%$ ), l'intensità di magnetizzazione  $J$ , il campo coercitivo  $H_{cb}$  o semplicemente  $H_c$ , il campo coercitivo intrinseco  $H_{cj}$  o  $H_{ci}$  ( $\pm 1.5\%$ ), la massima energia

$(BH)_{MAX}$  ( $\pm 2\%$ ) e la permeabilità magnetica relativa  $\mu_r$  di magneti in Alnico, Ferrite, NeFeB, SmCo e plasmomagnetni.

- un flussometro
- un elettromagnete
  - un polo Sud solidale con il piano di lavoro
  - un polo Nord mobile, utile a modificare il traferro
- una bobina di misurazione LJT-42



(a) Elettromagnete con la bobina tra i due poli



(b) Corpo dell'isteresigrafo

Figura 3.19: Isteresigrafo

Tra le piastre dei due poli dell'elettromagnete viene collocato il magnete da misurare, attorno ad esso è posizionata la sonda di misurazione LJT-42, che è composta da una bobina compensata, che ha uno spessore di 25 millimetri, il cui foro ha forma circolare con un diametro interno di 42 millimetri, e può effettuare rilevazioni a temperature fino a 220 °C. Le due piastre su cui viene appoggiato il campione possono essere riscaldate: questa opzione risulta molto utile nel caso in cui si vogliono conoscere le caratteristiche magnetiche di materiali utilizzati nelle macchine elettriche, simulando così una situazione di "carico" della macchina.

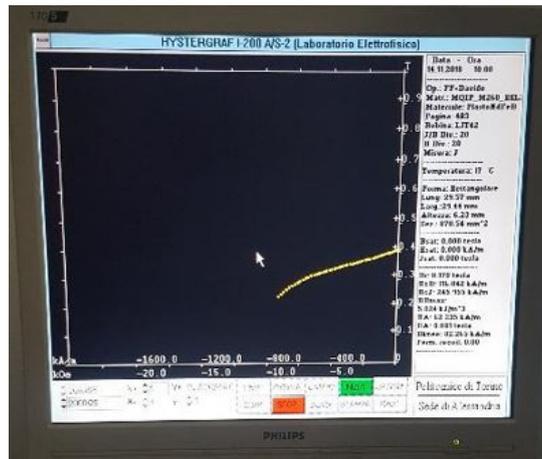


Figura 3.20: Tracciamento della caratteristica B-H del materiale

L'isteresigrafo è un tracciatore automatico di curva di isteresi, cioè della caratteristica B-H. Per tracciare questa curva si utilizzano i due elettromagneti introdotti precedentemente, si posa tra essi il magnete e attorno a lui la sonda Hall, avvicinando i due poli in modo da chiudere il circuito magnetico. Al variare del campo magnetico H (che si misura tramite la sonda Hall) si otterranno dei valori di induzione B, che vengono misurati tramite la bobina. I dati trovati vengono inviati, rispettivamente, agli assi x e y di un plotter.

Per poter misurare la caratteristica dei magneti si è presa una mattonella di materiale ed è stata divisa in 4 parti identiche, per poter inserire il campione all'interno della bobina di misura. Prima di tutto il campione è stato magnetizzato nel magnetizzatore e poi è stato sottoposto alla caratterizzazione magnetica. Dopo la misura ci si è trovati un magnete completamente smagnetizzato perchè questo strumento deve misurare anche  $H_{cj}$ , cioè il campo magnetico per cui il magnete viene completamente smagnetizzato.

La caratterizzazione magnetica è stata effettuata a temperatura ambiente (17 °C) e a 100 °C, quest'ultima si avvicina alla condizione di carico a cui possono essere sottoposti i magneti all'interno di una macchina. I dati ottenuti sono riportati nelle due tabelle 3.5 E ??.

<b>Temperatura</b>	17	°C
<b>B<sub>r</sub></b>	0.409	T
<b>H<sub>c</sub></b>	286.6	kA/m
<b>H<sub>cj</sub></b>	928	kA/m
<b>(BH)<sub>MAX</sub></b>	28.93	$kJ/m^3$
<b>μ<sub>r</sub></b>	1.137	

Tabella 3.5: Risultati della caratterizzazione magnetica di MQIP-M260 a 17 °C

<b>Temperatura</b>	100	°C
<b>B<sub>r</sub></b>	0.365	T
<b>H<sub>c</sub></b>	255.3	kA/m
<b>H<sub>cj</sub></b>	682	kA/m
<b>(BH)<sub>MAX</sub></b>	23.11	<i>kJ/m<sup>3</sup></i>
<b>μ<sub>r</sub></b>	1.139	

Tabella 3.6: Risultati della caratterizzazione magnetica di MQIP-M260 a 100 °C

Il grafico nella figura 3.21 mostra il ginocchio e la caratteristica magnetica creata tramite i dati ottenuti dalla misurazione con l'isteresigrafo

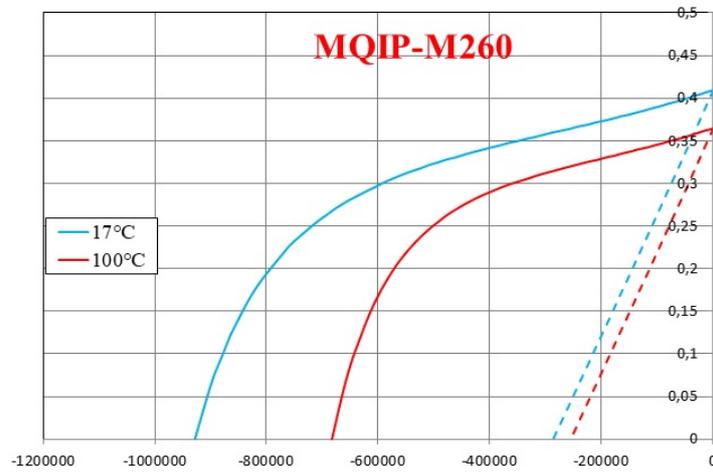


Figura 3.21: Caratteristica magnetica misurata di MQIP-M260

### 3.2.5 Elenco processi di stampaggio

In questa sezione sono elencati i dati dei processi per ogni campione realizzato. I primi due campioni sono stati realizzati con un metodo primitivo, senza usare la **prefusione** (cioè avvicinando le piastre per favorire la fusione dei pellet), la massa finale è molto vicina a quella iniziale ma purtroppo i campioni sono ricchi di bolle. Dal terzo campione in poi si è usata la prefusione e i campioni risultano migliori. In particolare nel quinto campione, tramite un errore umano, la prefusione è stata prolungata di un minuto e si è ottenuto il miglior campione. Da qui in poi tutti i campioni sono stati realizzati con 3 minuti di prefusione e 2 minuti di compressione. La temperatura di fusione ottima è 275 °C, sebbene il primo campione sia stato creato a 265 °C. Per quanto riguarda la pressione, il primo campione è l'unico che non è stato realizzato a 200 bar, bensì a 150 bar; probabilmente questo può aver influito sulla non uniformità del campione ottenuto, ma comunque anche gli altri campioni iniziali avevano una struttura ugualmente porosa. Il campione MQIP-M260 REL15 è stato fatto a 285 °C ma la quantità di materiale perso è stata troppo alta, per cui si è ritornati a 275 °C.

La massa iniziale invece è stata valutata a partire dal volume dello stampo:

$$V = 60.05 \cdot 60.11 \cdot 6.16 = 22.235 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Da qui sapendo che la densità del materiale è  $\rho = 5.334 \text{ g/cm}^3$

$$m_{iniziale} = V \cdot \rho \simeq 118 \text{ g}$$

Che però non stanno nello stampo, per cui si caricheranno dapprima 100 grammi e poi 110 grammi, come mostrato dalla tabella 3.7.



Figura 3.22: Pesatura del materiale

<b>Campione</b>	<b>m<sub>in</sub></b> [g]	<b>P</b> [bar]	<b>T<sub>fus</sub></b> [°C]	<b>t<sub>prefusione</sub></b> [min]	<b>t<sub>press</sub></b> [min]	<b>m<sub>fin</sub></b> [g]
MQIP-M260 REL1	100.86	150	265	NO	3	93.12
MQIP-M260 REL2	100.48	200	275	NO	3	93.5
MQIP-M260 REL3	110.02	200	275	2	2	91.10
MQIP-M260 REL4	100.01	200	275	2	2	77.08
MQIP-M260 REL5	110.05	200	275	3	2	91.98
MQIP-M260 REL6	110.01	200	275	3	2	96.94
MQIP-M260 REL7	110.01	200	275	3	2	94.09
MQIP-M260 REL8	110.03	200	275	3	2	93.40
MQIP-M260 REL9	110.04	200	275	3	2	91.96
MQIP-M260 REL10	110.02	200	275	3	2	91.21
MQIP-M260 REL11	110.03	200	275	3	2	82.10
MQIP-M260 REL12	110.05	200	275	3	2	92.67
MQIP-M260 REL13	112.13	200	275	3	2	93.97
MQIP-M260 REL14	110.08	200	275	3	2	92.27
MQIP-M260 REL15	110.05	200	285	3	2	88.40
MQIP-M260 REL16	110.06	200	275	3	2	94.97

Tabella 3.7: Caratteristiche magnetiche del prodotto: MQIP-M260

### 3.3 Plastoferrite commerciale

#### 3.3.1 Descrizione del prodotto di partenza

Questo plastomagnete è stato realizzato partendo da un prodotto commerciale della *Hangzhou Maglastic Technology Company*, chiamato MagLastic FB23 o più semplicemente **FB23**. Proprio come il prodotto visto nel capitolo 3.2, anche questo è composto da una polvere magnetica e da una matrice plastica, ma mentre la matrice plastica è la stessa (PA12), la polvere magnetica è diversa. Essa infatti è una ferrite, in particolare una ferrite di stronzio. Per cui è più economica ma le sue prestazioni sono inferiori a quelle delle terre rare.

<b>Densità</b>	3.83	$g/cm^3$
<b>MFR</b>	50	$g/10min @ 270\text{ °C}, 10kg$
<b>Resistenza alla trazione</b>	40	MPa
<b>Resistenza all'impatto (Izod)</b>	9	$kJ/m^2$
<b>Restringimento</b>	0.6	%

Tabella 3.8: Caratteristiche fisiche del prodotto FB23

Nella tabella 3.8 sono mostrate le caratteristiche fisiche del composto. Rispetto al precedente prodotto, la Hangzhou Maglastic Technology Company fornisce dati leggermente diversi nei suoi datasheet.

<b>Temperatura essiccazione</b>	105-110	°C
<b>Tempo essiccazione</b>	4 ~ 8	°C
<b>Temperatura processo</b>	250 ~ 270, 260 ~ 280, 270 ~ 290	°C
<b>Temperatura stampo</b>	80	°C
<b>Velocità</b>	50 ~ 80	V%
<b>Pressione</b>	60 ~ 80	bar

Tabella 3.9: Parametri per l'iniezione di FB23

Nella tabella 3.9 sono espressi i parametri per il processo di stampaggio ad iniezione, in cui la temperatura di processo è la temperatura a cui deve essere portato il composto per avere un prodotto fuso e uniforme. A 80 °C quindi si può eseguire lo stampo, cioè si conferisce una forma al composto che si solidifica. L'ultimo dato esprime la pressione che deve esserci all'interno del condotto. La velocità questa volta è espressa in termini percentuali.

La tabella ?? mostra le performance magnetiche del prodotto già finito, sotto forma di magnete. Si noti come questi dati siano inferiori a quelli del precedente prodotto. Ad

$B_r$	0.308	T
$H_c$	191	kA/m
$H_{ci}$	230	kA/m
$(BH)_{MAX}$	18.56	$kJ/m^3$

Tabella 3.10: Caratteristiche magnetiche del prodotto: FB23

esempio la  $B_r$  della ferrite è inferiore al 60 % della  $B_r$  di MQIP-M260, mentre addirittura la  $H_{ci}$  di FB23 vale meno del 25 % di quello di MQIP-M260.

### 3.3.2 Realizzazione del campione

#### Essiccazione

L'essiccazione del prodotto è necessaria anche in questo caso, anche perchè è presente lo stesso polimero. Seguendo il datasheet del produttore si esegue una essiccazione ad 80 °C per 4 ore, in maniera identica a quanto fatto per MQIP-M260.

#### Stampaggio

Utilizzando la stessa pressa a piastre calde usata in precedenza, si è proceduto allo stampaggio del campione. Il procedimento è pressochè identico, cioè si è utilizzato lo stesso stampo, le stesse piastre e si sono inseriti sempre dei fogli di alluminio tra i pellet e le piastre di rame. Il prodotto in questo caso appariva diverso rispetto al MQIP-M260. Infatti, se quest'ultimo è caratterizzato dall'avere dei pellet tondeggianti e ruvidi come si può vedere nella figura 3.5, il FB23 ha pellet con forma cilindrica e molto più lisci



Figura 3.23: FB23 disposto nello stampo

Per realizzare le cosiddette mattonelle si è partiti utilizzando il metodo suggerito dall'esperienza con lo stampaggio del MQIP-M260, cioè applicando una prefusione tramite l'avvicinamento delle piastre calde, per 3 minuti e successivamente 2 minuti di compressione a 200 bar.



Figura 3.24: Primo campione stampato di FB23

Il primo campione (figura 3.24) appare liscio sia sulle superfici frontali che sulle superfici laterali, quindi il processo e lo riempimento dello stampo è corretto. Purtroppo però dal quarto campione (figura 3.25) si è iniziata a verificare, sulla superfici frontali dei campioni, la presenza di irregolarità, forse riconducibili a bolle di vapore nate con l'aumento della temperatura. Probabilmente questo fenomeno è stato causato dalla presenza di umidità che nel giro di qualche ora è stata assorbita dai granuli, nonostante fosse stata eseguita la procedura di essiccazione.

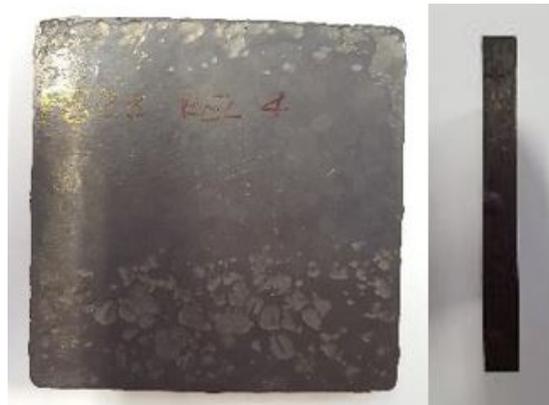


Figura 3.25: Quarto campione stampato di FB23

Per cercare di migliorare l'aspetto dei campioni (e non più di tanto la massa finale, perchè in ogni campione essa è molto vicina alla massa iniziale) dal sesto campione, fino all'undicesimo, il tempo di prefusione è stato innalzato a 4 minuti, mantenendo sempre a 2 minuti il tempo di compressione a 200 bar.



Figura 3.26: Settimo campione stampato di FB23

La temperatura del processo impostata nella realizzazione dell'undicesimo campione è stata di 285 °C, alzandola quindi di 5 °C rispetto agli altri campioni, ma non si sono notati particolari cambiamenti. Il dodicesimo, il tredicesimo e il quattordicesimo campione invece sono stati realizzati ad una temperatura di 270 °C, invece che a 280 °C e tutti e tre i campioni presentano superfici quasi lisce. Questo comportamento potrebbe essere dato dal fatto che il processo, per come è stato fatto in laboratorio e ad una temperatura di 280 °C, portasse ad un leggero deterioramento del composto.



Figura 3.27: Dodicesimo campione stampato di FB23

### Spianamento e fresatura

Per risparmiare tempo nel processo di spianamento, questa volta è stata usata una fresa frontale a 4 lame del diametro di 40 millimetri. Ciò ha garantito di ridurre il percorso della fresatrice, che così ha compiuto solamente due passaggi per superficie. L'effetto è simile a quello dello spianamento del campione di MQIP-M260, con la presenza di solchi che forse sono stati provocati dalla fusione di una parte del materiale durante il passaggio della fresa. È possibile apprezzare nella figura 3.28b come il campione al suo interno sia omogeneo, senza la presenza di fori creati da eventuali bolle interne.



(a) Spianamento di un campione di FB23



(b) Dettaglio della superficie spianata di un campione di FB23

Figura 3.28: Spianamento



Figura 3.29: Configurazioni A e B fresate di FB23

Dalla figura 3.29 si può notare la diversa fattura di FB23 paragonato a MQIP-M260, il primo è molto più liscio e rimane più compatto rispetto al secondo. Questo è dovuto al fatto che la ferrite di per se è un **materiale ceramico**, ciò porta anche ad avere una ottima resistenza alla corrosione o alla ruggine e quindi non è necessario ricoprirli con uno strato protettivo.

### 3.3.3 Magnetizzazione

La magnetizzazione dei tegolini di FB23 è identica a quella effettuata per i campioni di plastroferrite. Ma mentre la magnetizzazione di quest'ultimo è stata perfetta, la magnetizzazione di FB23 non lo è stata, cioè i campioni non sono stati magnetizzati in maniera perfettamente ortogonale alla superficie mostrata in figura 3.30. Ciò è probabilmente dovuto dal fatto che, per facilitare l'inserimento dei magneti nelle barriere di flusso durante

l'assemblaggio del rotore, si è deciso di limare maggiormente i tegolini tramite l'utilizzo di una lucidatrice per metalli (figura 3.31), questo può aver causato uno spostamento dei tegolini all'interno del blocco di plastica che viene collocato all'interno della bobina del magnetizzatore, causando così una magnetizzazione obliqua. Oppure la magnetizzazione non perfetta può essere stata causata da una distribuzione non uniforme del materiale. Questo inconveniente avrà quindi un effetto penalizzante sulle performance del motore, ampliando quindi la differenza tra i risultati ottenuti tramite le simulazioni e quelli ottenuti dalle misure.



Figura 3.30: Campioni di FB23 magnetizzati e relative linee di flusso



Figura 3.31: Lucidatrice per metalli utilizzata per limare la superficie attorno ai magneti

### 3.3.4 Caratterizzazione magnetica

Anche la caratterizzazione magnetica segue lo stesso procedimento visto in precedenza, con due misurazioni, sempre a 17 °C e 100 °C. Le due tabelle 3.11 e 3.12 mostrano i risultati della misura.

<b>Temperatura</b>	17	°C
<b>B<sub>r</sub></b>	0.170	T
<b>H<sub>c</sub></b>	116	kA/m
<b>H<sub>cj</sub></b>	246	kA/m
<b>(BH)<sub>MAX</sub></b>	5.02	<i>kJ/m<sup>3</sup></i>
<b>μ<sub>r</sub></b>	1.163	

Tabella 3.11: Risultati della caratterizzazione magnetica di FB23 a 17 °C

<b>Temperatura</b>	100	°C
<b>B<sub>r</sub></b>	0.146	T
<b>H<sub>c</sub></b>	105.6	kA/m
<b>H<sub>cj</sub></b>	280.2	kA/m
<b>(BH)<sub>MAX</sub></b>	3.88	<i>kJ/m<sup>3</sup></i>
<b>μ<sub>r</sub></b>	1.098	

Tabella 3.12: Risultati della caratterizzazione magnetica di FB23 a 100 °C

### 3.3.5 Elenco processi di stampaggio

In questa sezione sono elencati i dati dei processi per ogni campione realizzato.

La massa iniziale invece è stata valutata a partire dal volume dello stampo:

$$V = 60.05 \cdot 60.11 \cdot 6.16 = 22.235 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Da qui sapendo che la densità del materiale è  $\rho = 3.83 \text{ g/cm}^3$

$$m_{iniziale} = V \cdot \rho \simeq 85.16 \text{ g}$$

Per cui si è cercato di riempire lo stampo con una quantità di materiale quanto più vicina a 85.16 g. L'elenco dei processi è riassunto nella tabella [3.13](#).

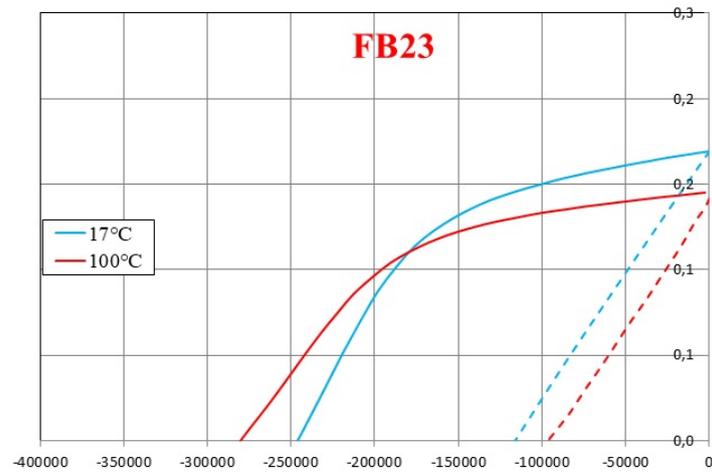


Figura 3.32: Caratteristica magnetica misurata di FB23

Campione	$m_{in}$ [g]	P [bar]	$T_{fus}$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$t_{prefusione}$ [min]	$t_{press}$ [min]	$m_{fin}$ [g]
FB23 REL1	85.17	200	280	3	2	84.08
FB23 REL2	85.14	200	280	3	2	83.98
FB23 REL3	85.19	200	280	3	2	84.28
FB23 REL4	85.17	200	280	3	2	84.11
FB23 REL5	85.19	200	280	3	2	84.24
FB23 REL6	85.17	200	280	4	2	84.50
FB23 REL7	85.15	200	280	4	2	84.54
FB23 REL8	85.17	200	280	4	2	84.75
FB23 REL9	85.18	200	280	4	2	84.88
FB23 REL10	85.18	200	280	4	2	84.94
FB23 REL11	85.19	200	285	4	2	84.82
FB23 REL12	85.15	200	270	4	2	84.96
FB23 REL13	85.19	200	270	4	2	84.89
FB23 REL14	85.15	200	270	4	2	84.90

Tabella 3.13: Elenco processi FB23

## 3.4 Plastoneodimio preparato in laboratorio

### 3.4.1 Descrizione dei prodotti di partenza

#### Polvere magnetica

La realizzazione di questo tipo di campione è differente dalle altre due. In questo caso non si è partiti direttamente da un prodotto sotto forma di granuli e quindi pronto per il processo di iniezione, ma si è partiti da polvere magnetica e polimero separati tra loro. La polvere metallica utilizzata è a base NdFeB e niobio (Nb), prodotta dalla *Magnequench* e denominata **MQP-14-12**, con una densità teorica pari a  $\rho = 7.62 \text{ g/cm}^3$ . Nella tabella 3.14 sono elencate le caratteristiche magnetiche.

$B_r$	0.820 - 0.850	T
$H_c$	550	kA/m
$H_{ci}$	940 - 1050	kA/m
$(BH)_{MAX}$	107 - 120	$kJ/m^3$
$T_{Curie}$	305	°C
$T_{max,esercizio}$	140 - 180	°C
$T_{max,processo}$	250	°C

Tabella 3.14: Caratteristiche magnetiche del prodotto: MQP-14-12

#### Matrice plastica

La matrice plastica utilizzata è una PA 6 del produttore *LANXESS* e il nome del prodotto è **Durethan B30S 000000**. Nella tabella 3.15 sono elencate le caratteristiche fisiche, mentre nella tabella 3.16 vi sono le proprietà per il processo di iniezione.

Densità	1.13	$g/cm^3$
Umidità residua	0.03 - 0.12	%
Resistenza alla flessione	110	MPa
Resistenza alla trazione	3200	MPa
Resistenza all'impatto (Izod)	< 10	$kJ/m^2$
Restringimento parallelo	1.02	%
Restringimento trasversale	1.16	%

Tabella 3.15: Caratteristiche fisiche del prodotto PA6

Temperatura essiccazione	80	°C
Tempo essiccazione	2 - 6	°C
Temperatura processo	260 - 280	°C
Temperatura stampo	80 - 100	°C

Tabella 3.16: Parametri per l'iniezione di PA6

### 3.4.2 Realizzazione del campione

#### Mescolamento dei due prodotti

Come primo passo per la realizzazione del composto si è essiccato il materiale polimerico PA6 per gli stessi motivi per cui erano stati essiccati MQIP-M260 e FB23. Successivamente si è usato un mixer dell'azienda *Brabender* in grado di unire i due prodotti (figura 3.38).



(a) Mixer



(b) Regolazione della temperatura del mixer

Figura 3.33: Brabender

Sapendo che il volume del mixer è  $V = 38.7 \text{ g/cm}^3$  e che la massa totale di composto deve essere formata, in peso, dal 90 % di metallo e dal 10 % di polimero, conoscendo quindi le densità dei due materiali, si ottiene una densità finale stimata di  $\rho = 4.37 \text{ g/cm}^3$ , per cui:

$$m_{tot} = \rho_{fin} \cdot Vol = 4.37 \cdot 38.7 = 169.31 \text{ g}$$

Quindi, sapendo che:

$$m_{PA6} = 0.1 \cdot m_{tot} \quad (3.1)$$

$$m_{NdFeB} = 0.9 \cdot m_{tot} \quad (3.2)$$

Allora:

$$m_{PA6} = 16.93 \text{ g} \quad (3.3)$$

$$m_{NdFeB} = 152.38 \text{ g} \quad (3.4)$$

Per cui si è cercato di caricare il Brabender con queste dosi, ad ogni lavorazione. I primi 4 campioni sono stati realizzati impostando una temperatura del mixer troppo bassa, 240 °C, a causa di un errore di lettura. Anche il primo campione realizzato per iniezione è stato effettuato alla stessa temperatura. Si sono ottenuti così dei campioni non omogenei, con una buona densità di materiale nella zona centrale delle mattonelle ma spigoli poco riempiti e di conseguenza anche fragili.



Figura 3.34: Pesatura di PA 6 e MQP 14-12



Figura 3.35: Versamento di PA 6 e MQP 14-12

Come mostra la figura 3.35 è stato versato all'interno del mixer la PA 6, con i cilindri che ruotavano ad una velocità pari a circa 20 rpm. Una volta che esso si è completamente

fuso è stato possibile versare all'interno del mixer anche la polvere metallica, dopo di che il mixer è stato chiuso e si è alzata la velocità di rotazione dei cilindri a 60 rpm (figura 3.36). In realtà non si arriverà mai a questa velocità a causa della viscosità del composto fuso.



Figura 3.36: Composto fuso e successiva chiusura del mixer

Dopo alcuni secondi, utili a far sì che la macchina mescoli omogeneamente i due materiali, il mixer è stato spento e si è proceduto alla rimozione del materiale utile, come mostrato nella figura 3.37.



Figura 3.37: Rimozione del materiale dal mixer

Come si vede nell'immagine 3.38a, il composto una volta raffreddato ha una forma troppo grezza che non può stare all'interno dello stampo. Per cui va tritурata, attraverso l'uso di un grinder (figura 3.38b), per poter ottenere dei granuli. L'effetto finale è ritratto nell'immagine 3.38c. In realtà questi granuli sono stati nuovamente tritурati con un frullatore industriale per poter avere dei granuli dal diametro medio ancora più basso.

Dal quarto mescolamento in poi la procedura seguita è rimasta la stessa, con la differenza che la temperatura del processo è stata innalzata a 270 °C così come suggerisce il



(a) Stato del composto prima di essere macinato



(b) Grinder



(c) Stato del composto dopo essere stato macinato



(d) Stato del composto dopo essere stato frullato

Figura 3.38: Macinatura

datasheet del polimero. Come si vedrà poi i campioni stampati risulteranno più omogenei. Nell'immagine 3.38d si può notare la presenza di un pellet non fuso, probabilmente a causa dell'errore nella scelta della temperatura.

Il materiale ottenuto è stato chiamato **CPPA6-10**, che sta per "campione plastomagnete PA6" e il "10" finale sta per la percentuale in peso del polimero PA6.

## Stampaggio

Come già spiegato, i campioni creati con il prodotto derivante dalla prima serie di mescolamento (cioè quelli creati a 240 °C), sono stati anche stampati ad una temperatura inferiore rispetto a quella suggerita dal datasheet e presentano una struttura poco uniforme e ciò è mostrato nell'immagine 3.39a. Si noti come negli spigoli la superficie frontale sia diversa e come, sulla superficie laterale, si notino crepe e granuli non fusi completamente. Questi campioni però, una volta fresati, mostrano una buona densità in corrispondenza della zona centrale. per cui questi campioni non sono stati scartati, bensì sono stati usati per realizzare alcuni tegolini.

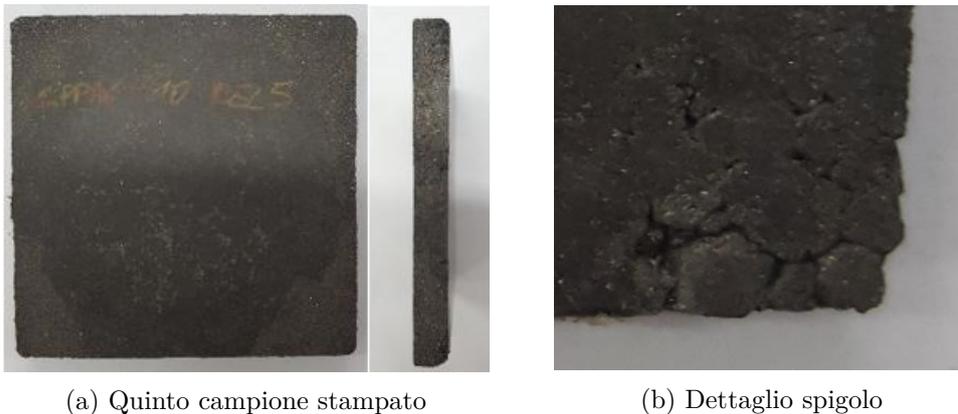


Figura 3.39: Campioni stampati e mescolati a 240 °C

La seconda fase di mescolamento è stata fatta correttamente a 270 °C, così come lo stampaggio. Per cui si sono ottenuti campioni mediamente migliori rispetto ai primi, sebbene in alcuni di essi fosse presente ancora una disomogeneità strutturale, seppur minima (fig. 3.40).



Figura 3.40: Undicesimo campione stampato di CPPA6-10

### Spianamento e fresatura

Lo spianamento delle mattonelle di CPPA6-10 è stato effettuato con la stessa fresa frontale a 4 lame usata per FB23, assicurando un processo più rapido. Questo materiale però ha reagito meglio allo spianamento. Infatti non ci sono solchi molto visibili come succedeva per FB23, seppur presenti. Ciò potrebbe essere dato dal fatto che il materiale ha diversa natura, unitamente al fatto di aver ridotto leggermente la velocità di rotazione della fresa.



Figura 3.41: Campione spianato di CPPA6-10

La fresatura non ha dato problemi, come per gli altri materiali si è formato un ricciolo lungo le superfici causato dalla fusione locale del campione (figura 3.42).



Figura 3.42: Campione di CPPA6-10 durante fresatura

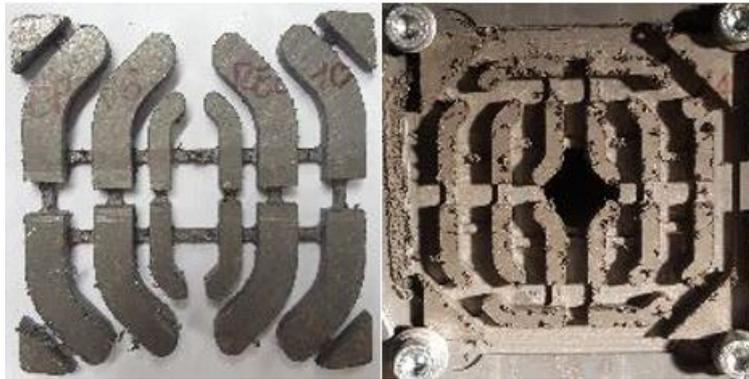


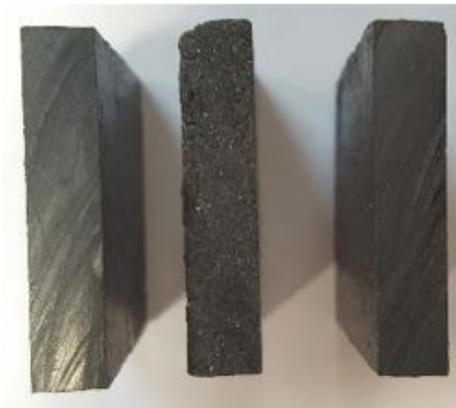
Figura 3.43: Configurazioni A e B fresate di CPPA6-10

### 3.4.3 Magnetizzazione e caratterizzazione magnetica

Gli strumenti usati per la magnetizzazione e la caratterizzazione sono gli stessi usati in precedenza. Quindi per le misure magnetiche si è dovuta dividere in quattro parti una mattonella, al fine di poter inserire il campione all'interno della bobina dell'isteresigrafo (figure 3.44a e 3.44a).



(a) Processo di molatura



(b) Campioni molati

Figura 3.44: Molatura di un campione di CPPA6-10

La caratterizzazione magnetica è stata effettuata come al solito a temperatura ambiente (22 °C) e a 100 °C. Le tabelle 3.17 e 3.18 mostrano i risultati della caratterizzazione magnetica.

<b>Temperatura</b>	22	°C
<b>B<sub>r</sub></b>	0.440	T
<b>H<sub>c</sub></b>	291.5	kA/m
<b>H<sub>cj</sub></b>	679.7	kA/m
<b>(BH)<sub>MAX</sub></b>	32.25	<i>kJ/m<sup>3</sup></i>
<b>μ<sub>r</sub></b>	1.202	

Tabella 3.17: Risultati della caratterizzazione magnetica di CPPA6-10 a 22 °C

<b>Temperatura</b>	100	°C
<b>B<sub>r</sub></b>	0.400	T
<b>H<sub>c</sub></b>	255.1	kA/m
<b>H<sub>cj</sub></b>	502.3	kA/m
<b>(BH)<sub>MAX</sub></b>	26.02	<i>kJ/m<sup>3</sup></i>
<b>μ<sub>r</sub></b>	1.247	

Tabella 3.18: Risultati della caratterizzazione magnetica di CPPA6-10 a 100 °C

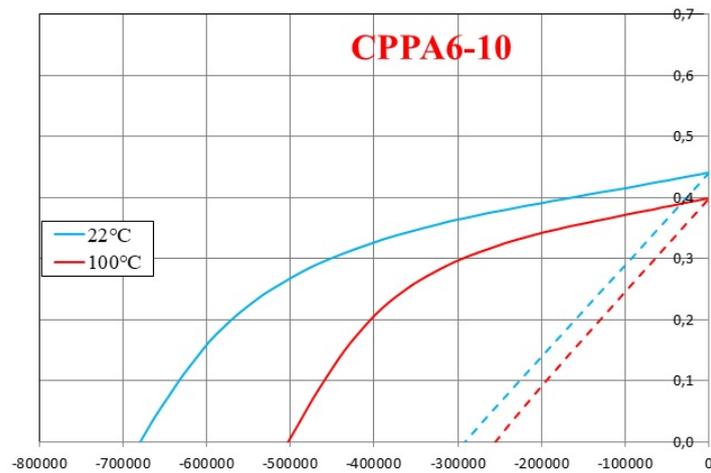


Figura 3.45: Caratteristica magnetica misurata di CPPA6-10

### 3.4.4 Elenco processi di mescolamento e di stampaggio

La tabella 3.19 mostra tutti i passaggi svolti nella fase di mescolamento. Si vede come dal quinto campione la temperatura del processo sia stata alzata da 240 °C a 270 °C. Le masse finali variano molto perchè parte del prodotto rimaneva all'interno del mixer e veniva poi recuperato con i campioni successivi.

Campione	$m_{PA6}$ [g]	$m_{NdFeB}$ [g]	$T_{processo}$ [°C]	$m_{fin}$ [g]
1	16.9	152.4	240	154.0
2	16.9	152.4	240	168.1
3	16.9	152.4	240	165.8
4	16.9	152.4	240	172.9
5	16.9	152.4	270	161.2
6	16.9	152.4	270	166.1
7	16.9	152.4	270	168.2
8	16.9	152.4	270	165.5
9	16.9	152.5	270	170.5
10	16.9	152.5	270	165.6

Tabella 3.19: Elenco processi di mescolamento CPPA6

La tabella 3.20 mostra l'elenco dei passaggi eseguiti nella fase di stampaggio. La prima stampata è stata eseguita a 240 °C ma siccome il campione ottenuto non era omogeneo si è alzata la temperatura. Dal secondo campione si è utilizzata la temperatura suggerita dal datasheet, 270 °C, però il problema non era la temperatura di stampaggio, ma la temperatura con cui era stata mescolata la sostanza. L'ultimo campione creato con la polvere mescolata a 240 °C è l'ottavo, dove si è impostata la temperatura di stampaggio a 280 °C. Dal nono campione in poi si sono ottenuti ottimi risultati anche grazie ad un migliore riempimento dello stampo, aggiungendo il 5%, in peso, di materiale. Inizialmente la massa iniziale era stata valutata a partire dal volume dello stampo:

$$V = 60.05 \cdot 60.11 \cdot 6.16 = 22.235 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

E sapendo che la densità stimata del materiale fosse  $\rho = 4.37 \text{ g/cm}^3$  si è ottenuto:

$$m_{iniziale} = V \cdot \rho \simeq 97.17 \text{ g}$$

Aggiungendo il 5% di materiale:

$$m'_{in} = 1.05 \cdot m_{in} = 97.17 + 0.05 \cdot 97.17 \simeq 102.03$$

Quindi si è cercato di riempire lo stampo con circa 102.03 grammi di materiale.

<b>Campione</b>	<b>m<sub>in</sub></b> [g]	<b>P</b> [bar]	<b>T<sub>fus</sub></b> [°C]	<b>t<sub>prefusione</sub></b> [min]	<b>t<sub>press</sub></b> [min]	<b>m<sub>fin</sub></b> [g]
CPPA6-10 REL1	97.18	200	240	3.30	2	96.86
CPPA6-10 REL2	97.18	200	270	3.30	2	96.97
CPPA6-10 REL3	97.18	200	270	3.30	2	96.94
CPPA6-10 REL4	97.18	200	270	3.30	2	96.97
CPPA6-10 REL5	97.19	200	270	4	2	96.71
CPPA6-10 REL6	97.19	200	270	4	2	96.94
CPPA6-10 REL7	97.19	200	270	4	2	96.85
CPPA6-10 REL8	97.17	200	280	4	2	96.66
CPPA6-10 REL9	102.03	200	280	4	2	100.95
CPPA6-10 REL10	102.03	200	280	4	2	101.45
CPPA6-10 REL11	102.09	200	280	4	2	101.24
CPPA6-10 REL12	102.03	200	280	4	2	100.12
CPPA6-10 REL13	102.07	200	280	4	2	100.56
CPPA6-10 REL14	102.08	200	280	4	2	100.81
CPPA6-10 REL15	102.05	200	280	4	2	100.54
CPPA6-10 REL16	102.03	200	280	4	2	101.12

Tabella 3.20: Elenco processi stampaggio CPPA6-10



## Capitolo 4

# Simulazione e analisi con elementi finiti dei prototipi proposti

### 4.1 Funzionamento del modello

#### 4.1.1 Introduzione

Per le simulazioni si è utilizzato un tool chiamato FeRaL (Finite Element Rapid Analysis Lab) elaborato dal professor Nicola Bianchi e dall'ingegner Cristian Babetto del dipartimento di ingegneria industriale dell'Università di Padova. Come dice il nome stesso, il tool si basa principalmente sull'uso degli elementi finiti utilizzando il software freeware FEMM (Finite Element Method Magnetics), accompagnato da altri software come Octave o Matlab (in questa tesi è stato usato il secondo). Questo tool applica uno studio bidimensionale e quindi gli effetti 3D non vengono considerati in esso, ma a parte e poi vanno inclusi nella soluzione finale. Quindi la densità di corrente  $J$  e il vettore potenziale magnetico  $A$  hanno solo la componente normale al piano, rispettivamente  $J_z$  e  $A_z$ . Mentre invece il campo magnetico  $H$  e l'induzione magnetica  $B$  hanno solo le componenti tangenziali al piano di studio:  $(H_x, H_y, 0)$  e  $(B_x, B_y, 0)$ . Si considerano il rotore e lo statore nella loro lunghezza, inserendola nei parametri iniziali. Le sezioni del rotore e dello statore devono essere disegnati tramite l'uso di punti, linee e archi. Così è possibile realizzare le forme dei lamierini, delle cave, dei magneti permanenti, delle barriere di flusso e del traferro. Ogni superficie chiusa deve essere contrassegnata con un *etichetta*, utile a identificare il tipo di oggetto, il tipo di materiale di cui esso è composto (con le relative caratteristiche) e di conseguenza anche la densità di corrente che lo attraversa. Queste etichette prendono il nome del materiale che compone la superficie contrassegnata [7].

- Tutto ciò che non è magnetico viene contrassegnato con l'etichetta "Air", che indica quindi le stesse caratteristiche magnetiche dell'aria.
- Gli avvolgimenti possono essere contrassegnati con l'etichetta "Cu" se sono in rame, oppure, nel caso di una gabbia rotorica a pressofusione in alluminio, "Al"

- I lamierini sono composti di materiale ferromagnetico, per cui l'etichetta da applicare alle loro superfici è "Fe".
- I magneti permanenti vengono contrassegnati con il loro materiale, ad esempio se si considera il primo plasmagnete realizzato bisogna applicare l'etichetta "MQIP-M260"

Gli oggetti contrassegnati vengono divisi in gruppi e ogni gruppo è contrassegnato da un numero.

- Statore: gruppo 1000
- Traferro: gruppo 0 o 1
- Rotore: gruppo 10

### Condizioni al contorno

Nello studio devono essere impostate delle **condizioni al contorno**:

- Dirichlet: assegna un valore al vettore  $A_z$  lungo un segmento, tipicamente  $A_z = 0$
- Neumann (default): impone che le linee di flusso siano normali ad un segmento
- Periodica: è assegnata a due segmenti e impone che  $A_z$  sia identico sui due segmenti
- Anti-periodica: è come la periodica, ma i  $A_z$  sui due segmenti sia uguale e opposto.

### Sorgenti

Si definisce la presenza di un circuito per ogni cava di statore e, di conseguenza, si definisce una corrente per ogni cava, assegnando a queste correnti segno positivo se sono concordi con l'asse  $Z$ , altrimenti il segno negativo. In alternativa si può assegnare una densità di corrente ai diversi materiali, che ovviamente può dipendere anche dalla densità di corrente per ogni fase e dal tipo di avvolgimento. La densità di corrente di picco per una cava è calcolata come:

$$\hat{J}_{slot} = k_{fill} \cdot \sqrt{2} \cdot J_c$$

$k_{fill}$  è il fattore di riempimento della cava, mentre  $J_c$  è il valore efficace della densità di corrente nel conduttore.

### Avvolgimenti

Per capire come sono fatti gli avvolgimenti della macchina si definisce una matrice di dimensioni  $m \times Q$ , dove  $m$  è il numero di fasi e  $Q$  è il numero di cave di statore. Questa matrice ha degli elementi che danno l'informazione sullo riempimento di una cava da parte di una fase. Ad esempio l'elemento  $k_{2,5}$  mi dice quanto è riempita la cava 5 dalla fase 2. Gli elementi  $k_{m,q}$  possono avere segno sia positivo che negativo, questo se le correnti hanno verso uscente o entrante.

## Meshing

Il meshing, in italiano "magliatura", è il processo che consiste nello riempimento con elementi finiti della superficie studiata; in FEMM gli elementi finiti sono dei triangoli. È possibile infittire alcune zone, aumentando la quantità di triangoli; quest'azione viene compiuta quando in alcuni punti ci si aspettano gradienti di campo più alti.

## Calcoli

Una volta trovata la soluzione di campo, il software compie alcune azioni e calcoli:

- Traccia le linee di flusso: utile a dare un'idea della densità di flusso e della saturazione magnetica
- Calcola le grandezze locali: in ogni punto è possibile conoscere le grandezze elettriche e magnetiche (A,B,H,J)
- Calcola il flusso magnetico nel traferro:

$$\Phi = L_z \int_{line} B_n dl$$

dove  $B_n$  è la componente normale dell'induzione magnetica rispetto alla linea mediana del traferro.  $L_z$  è la lunghezza lungo l'asse z.

- Calcola i flussi concatenati:

$$\Lambda_m = n_c L_z \frac{1}{S_{slot}} \sum_{q=1}^Q \int_{S_{slot,q}} k_{m,q} A_z dS$$

dove  $\Lambda_m$  è il flusso concatenato rispetto a una generica fase "m" e  $k_{m,q}$  è un generico elemento della matrice introdotta precedentemente.

- Calcola l'energia magnetica:

$$W_m = L_z \int_{S_{all}} \left( \int H dB \right) dS$$

In questo calcolo va considerata tutta la struttura.

### 4.1.2 Simulazioni

#### Motor Data file

Il file *MOTOR\_DATA.m* è lo script in cui vanno inseriti i dati del motore, tra cui i dati **generali**, come:

- Paia poli
- Lunghezza del pacco rotorico, in millimetri

- $k_{pack} = \frac{Lunghezza\ ferrolaminato}{Lunghezza\ motore}$

O i dati di **avvolgimento**:

- Numero di conduttori in serie, per cava
- Numero di circuiti in parallelo
- Fattore di riempimento di cava

Sono importanti da specificare i dati dello statore, come il gruppo di appartenenza dei componenti, le dimensioni dello statore e delle cave, in millimetri, e l'angolo della prima cava. I dati del rotore da inserire invece sono il gruppo, le dimensioni esterne e le dimensioni dei magneti permanenti, dei ponticelli e delle barriere di flusso. Altre informazioni importanti, come lo spessore del traferro, vengono ricavate dai dati già inseriti.

Ovviamente è essenziale specificare anche le caratteristiche dei materiali. Ad esempio per i conduttori, che hanno l'etichetta "Cu" o "Al", bisogna specificare la conduttività elettrica e la densità del materiale. Per i lamierini, oltre alla conduttività elettrica e alla densità del materiale, bisogna aggiungere:

- La frequenza di riferimento (quasi sempre 50 Hz)
- L'induzione di riferimento (in Tesla)
- Coefficiente delle perdite per isteresi
- Coefficiente delle perdite per correnti parassite
- Perdite nel ferro specifiche (a  $f_{rif}$  e  $B_{Fe,rif}$ )
- Coefficienti di perdite dati dalla costruzione dei lamierini
- Dimensioni dei lamierini

Mentre invece per i magneti permanenti basta specificare il valore dell'induzione residua, del campo coercitivo e della conduttività elettrica. Infine è necessario specificare le dimensioni degli elementi finiti, per ogni materiale.

Ai fini della simulazione è importante anche specificare le **variabili di simulazione**:

- Il fattore di skewing
- L'angolo meccanico del rotore
- L'ampiezza del vettore corrente
- La fase del vettore corrente

### **Simulazioni in cui si varia la posizione del rotore**

La procedura `sim_var_thetam.m` fa partire delle simulazioni con diverse posizioni del rotore, ottenendo così le forme d'onda di flusso e coppia.

### Ricerca dell'angolo della MTPA

In questo caso si utilizza la procedura `sim_var_alphaie.m`; essa ha lo scopo di trovare i punti, per ogni valore della corrente di picco, che formano la curva della MTPA. Infine viene plottata la coppia in funzione dell'angolo di corrente.

### Caratteristica di magnetizzazione

In questo caso si usa la procedura `sim_dq_flux.m`, che permette di calcolare le induttanze differenziali degli assi d e q, ma soprattutto plotta le caratteristiche di magnetizzazione, vale a dire i flussi in funzione della corrente.

### Mapping

In ultimo è possibile eseguire le procedure `sim_mapping.m` e `calc_mapping.m`, utili a elaborare e plottare: il luogo delle iso-coppie, delle iso-flusso, della MTPA, del deflussaggio (MTPV)

- Il luogo di:
  - iso-coppie
  - iso-flusso
  - MTPA
  - deflussaggio (MTPV)
- La caratteristica meccanica ( $T-\omega_m$ )
- La caratteristica  $P-\omega_m$

## 4.2 Risultati della simulazione nei tre casi

### 4.2.1 Ripple di coppia

Il ripple di coppia è stato ottenuto tramite la procedura `sim_var_theta.m`, effettuando in totale 8 simulazioni per ogni motore, dato che è stato attuato lo skewing. Quindi, per ogni simulazione si è impostata la lunghezza di stack pari a 5 millimetri, anziché 40 millimetri e il l'angolo di skewing è stato modificato di volta in volta. Sommando gli otto angoli inseriti si ottiene, ovviamente, un angolo totale pari a  $10^\circ$ . È stato imposto, nella simulazione, di calcolare un valore di coppia ogni  $3^\circ$ , da  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , ottenendo così 61 valori di coppia, per ogni step di skewing; in totale quindi si hanno 8 stringhe (una per ogni step di skewing), ognuna con 61 valori di coppia (un valore ogni  $3^\circ$ ). È stata applicata quindi una somma elemento per elemento, così da ottenere una sola stringa da 61 elementi, che è stata quindi plottata.

Nelle immagini 4.1, 4.2 e 4.3 è possibile vedere il ripple di coppia per i motori che dotati rispettivamente dei magneti MQIP-M260, FB23 e CPPA6-10, in funzione dell'angolo meccanico. Nei grafici, oltre al ripple derivante dalle simulazioni, vi è anche il ripple di coppia misurato al banco prova.

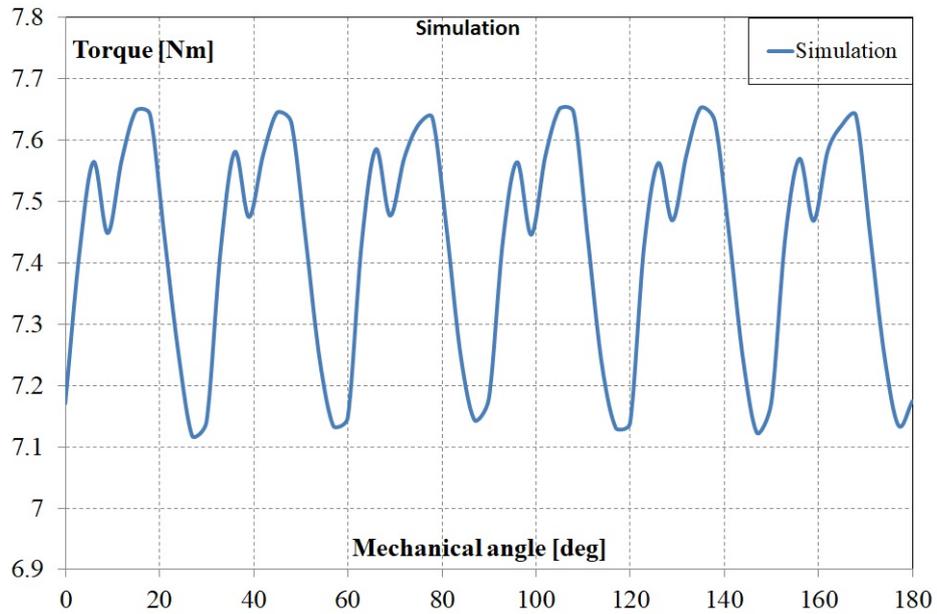


Figura 4.1: Ripple di coppia in funzione dell'angolo meccanico, per il motore con MQIP-M260

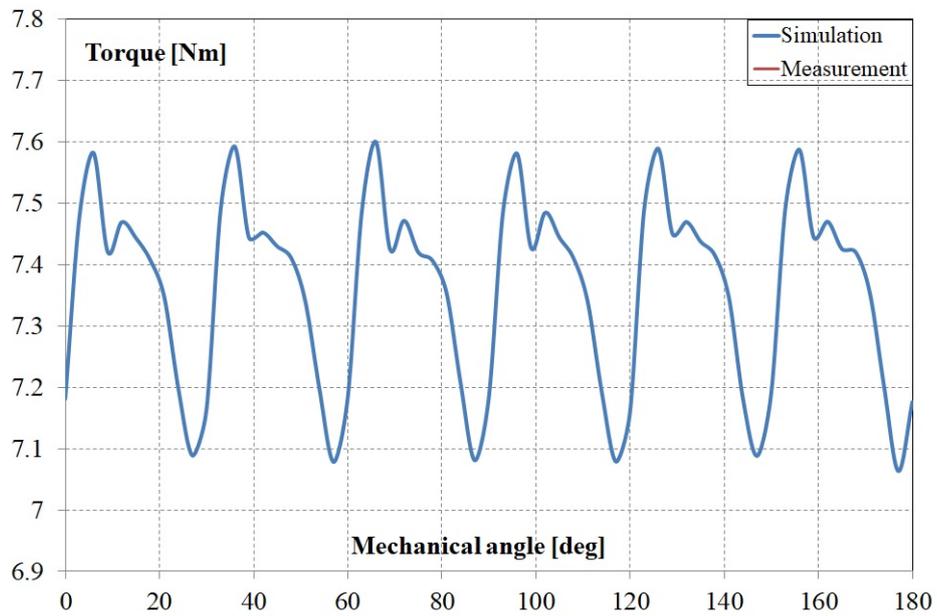


Figura 4.2: Ripple di coppia in funzione dell'angolo meccanico, per il motore con FB23

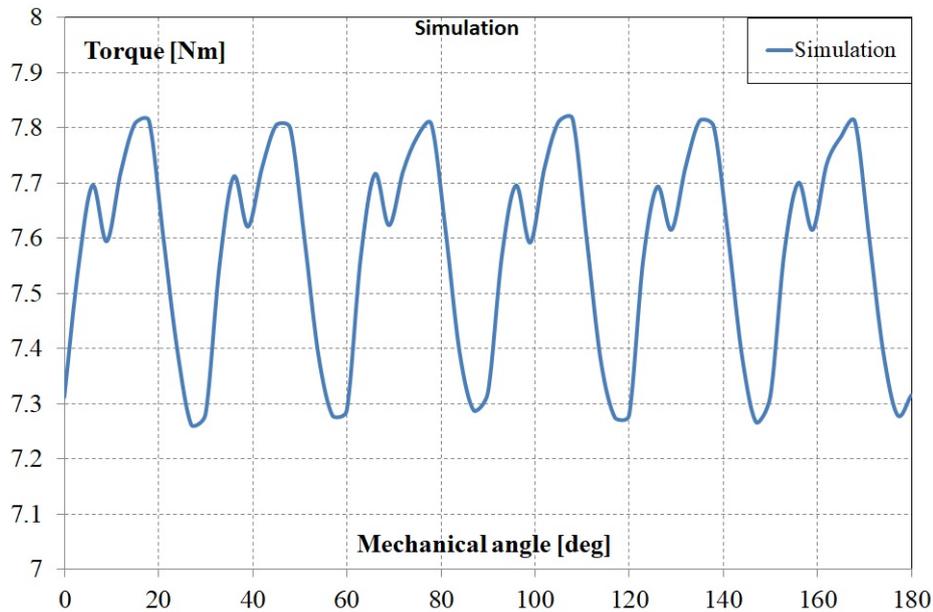


Figura 4.3: Ripple di coppia in funzione dell'angolo meccanico, per il motore con CPPA6-10

#### 4.2.2 Tensione

Tramite la simulazione `sim_dq_flux.m`, imponendo la condizione di funzionamento a vuoto, è stato possibile ricavare la tensione del motore. Innanzitutto si è ottenuto il flusso a vuoto dalla simulazione, in funzione dell'angolo meccanico (da  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , ogni  $3^\circ$ ), considerando lo skewing nella maniera spiegata in precedenza.

Dopo di che è stata calcolata la tensione, considerando che la frequenza utilizzata nel laboratorio di prova è **25 Hz**, l'intervallo di tempo da considerare è.

$$\Delta t = \frac{1}{f \cdot N.\text{angoli}} = \frac{1}{25 \cdot 61} = 656 \mu s \quad (4.1)$$

A questo punto ogni valore di flusso è stato sottratto al precedente e successivamente diviso per 4.1.

$$V = -\frac{d\lambda}{dt}$$

I risultati sono dello stesso ordine di grandezza della tensione usata in laboratorio ma sono diversi.

$V_{\text{misurata}}$	$V_{\text{simulata}}$	Err %
100.32 V	149.86 V	33 %

Tabella 4.1: Tensioni

L'errore è troppo grande, per cui probabilmente c'è stato qualche errore nella misura, per questo motivo non si farà più affidamento su queste simulazioni. Di seguito vengono

mostrati gli andamenti della tensione e del flusso a vuoto, per il PMASR con MQIP-M260, estrapolati dalle simulazioni.

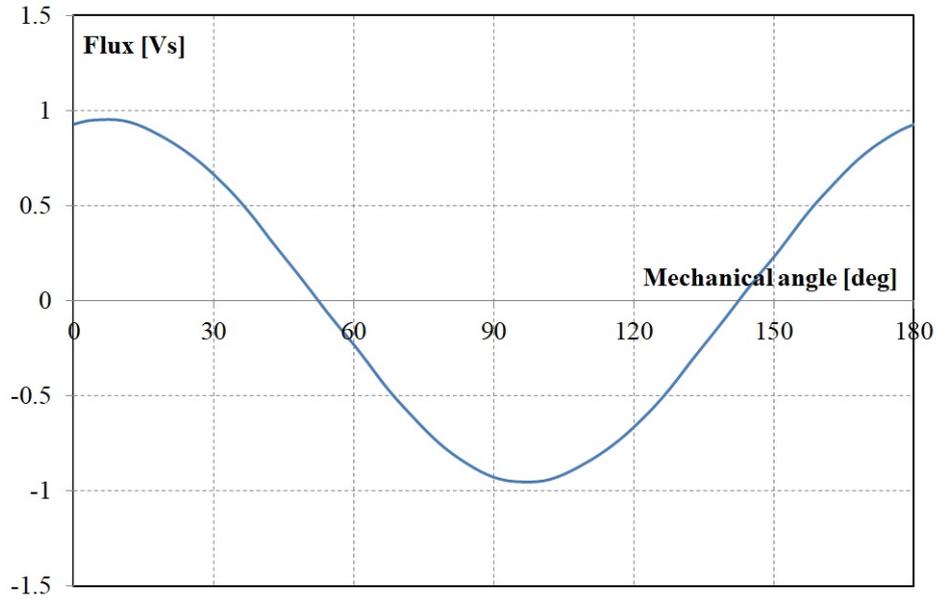


Figura 4.4: Flusso a vuoto in funzione dell'angolo meccanico, per il motore con MQIP-M260

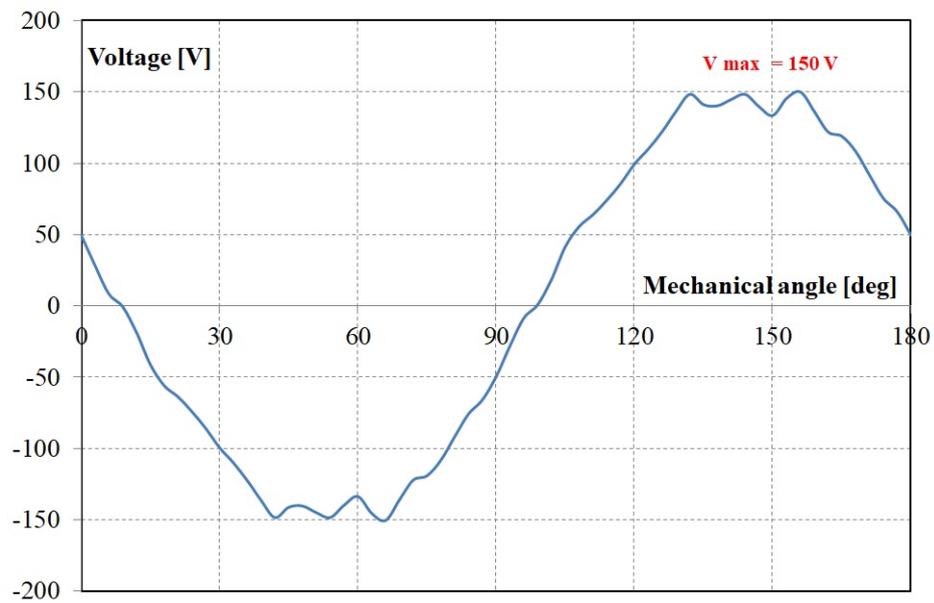


Figura 4.5: Tensione in funzione dell'angolo meccanico, per il motore con MQIP-M260

### 4.2.3 MTPA

Con la procedura `sim_var_alphaie.m` è stato trovato il valore massimo della coppia in funzione di ogni valore di corrente da 0 a 6 A, a step di 0.5 A, per ogni valore dell'angolo di corrente da 0° a 90°, a step di 1.5°. I grafici riportati (6.26, 6.27 e 6.28) mostrano le coppie per 12 diversi valori di ampiezza della corrente, al variare dell'angolo di corrente. Vi è poi una curva spezzata rossa che passa attraverso i punti di massima coppia per ogni valore di corrente, essa è la MTPA. Ci sono poi i confronti con alcune delle misurazioni fatte in laboratorio, ma saranno approfondite in seguito. Queste simulazioni sono state effettuate imponendo le condizioni al contorno di Neumann. Sono stati usati i dati dei magneti caratterizzati a 100 °C, avrebbe avuto minor significato una simulazione utilizzando i dati dei magneti caratterizzati a temperatura ambiente, dato che un motore funziona per lo più a regime termico e quindi a carico.

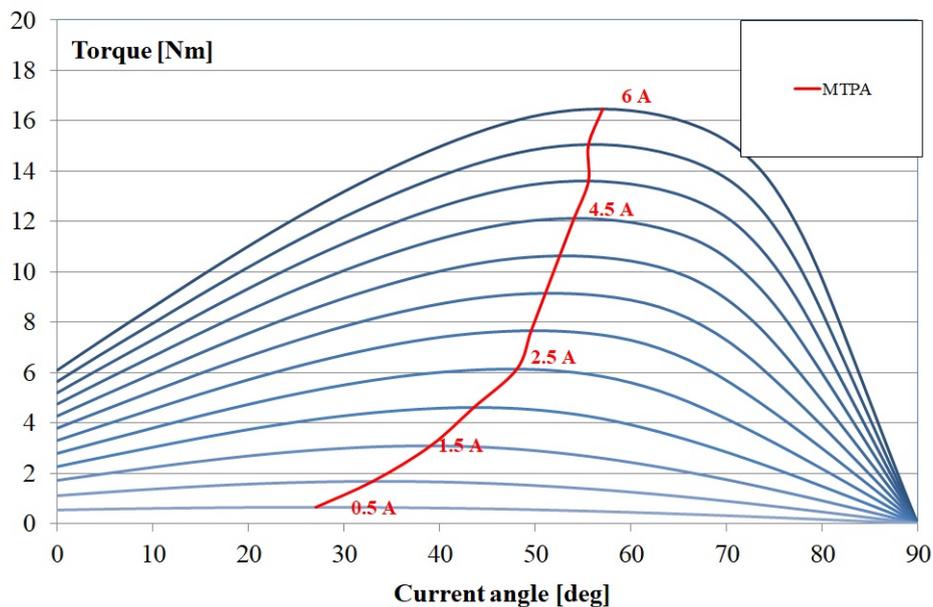


Figura 4.6: Coppia in funzione dell'angolo di corrente per ogni valore di ampiezza della corrente, per il motore con MQIP-M260

Proprio come ci si aspettava, la coppia per i motori allestiti con plastomagneti in NdFeB è più alta rispetto ai motori con i plastomagneti in ferrite, di circa il 17 %. Tra i due plastomagneti in NdFeB, quello tra i due che conferisce al motore più coppia è, seppur di poco, il CPPA6-10, ovvero quello realizzato completamente in laboratorio.

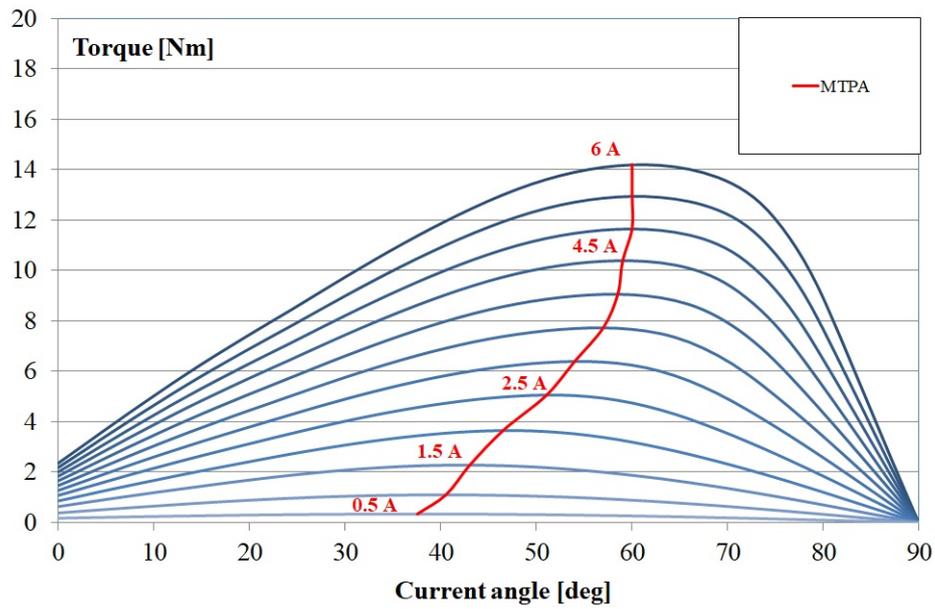


Figura 4.7: Coppia in funzione dell'angolo di corrente per ogni valore di ampiezza della corrente, per il motore con FB23

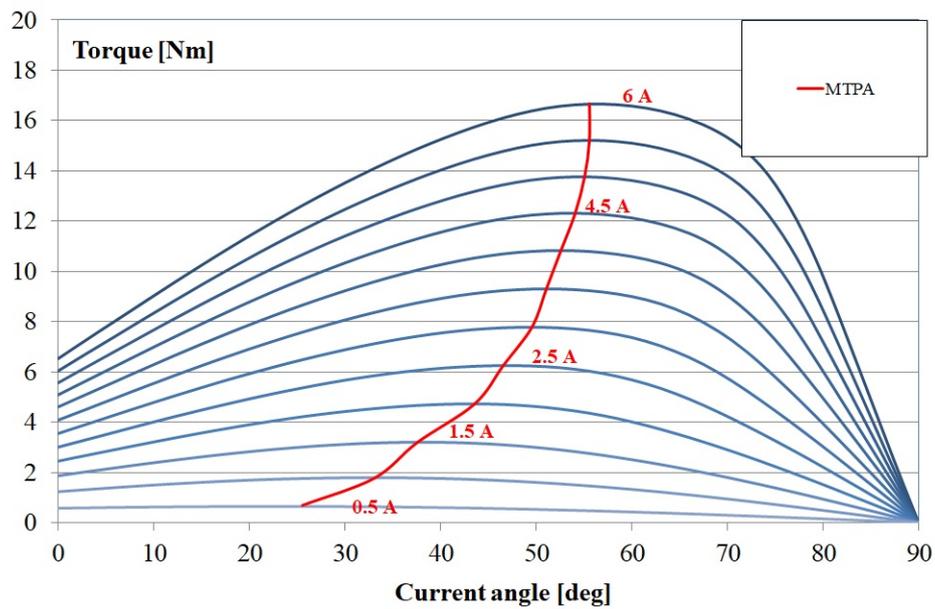


Figura 4.8: Coppia in funzione dell'angolo di corrente per ogni valore di ampiezza della corrente, per il motore con CPPA6-10

#### 4.2.4 Flussi

Con l'utilizzo della procedura `sim_dq_flux.m` è stato possibile ottenere i flussi in funzione della corrente, negli assi d e q. In alcuni casi sono state effettuate più simulazioni.

##### MQIP-M260

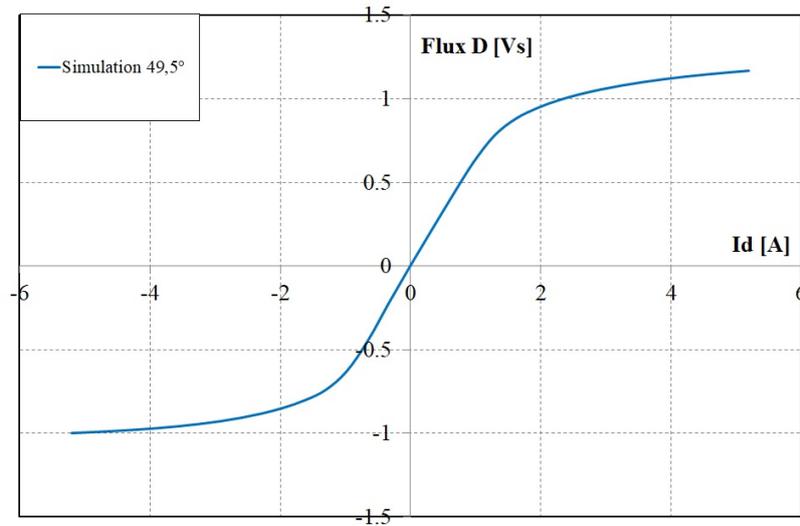


Figura 4.9: Flusso in asse d, in funzione della corrente  $i_d$

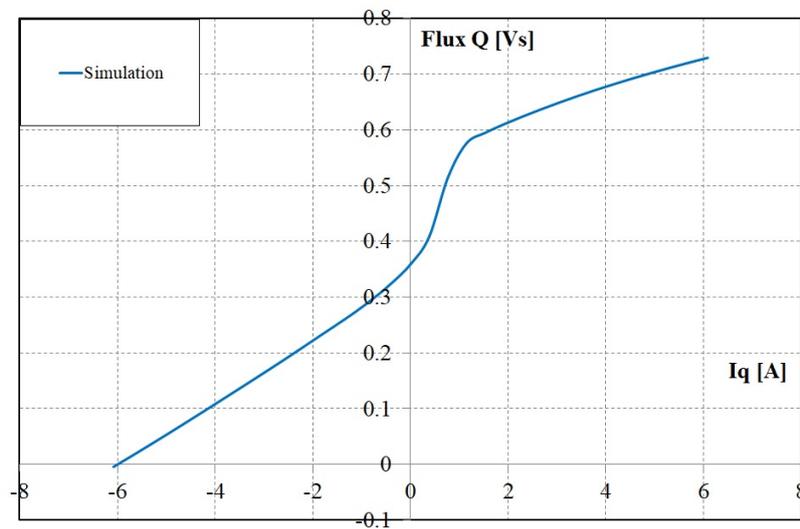


Figura 4.10: Flusso in asse q, in funzione della corrente  $i_q$

FB23

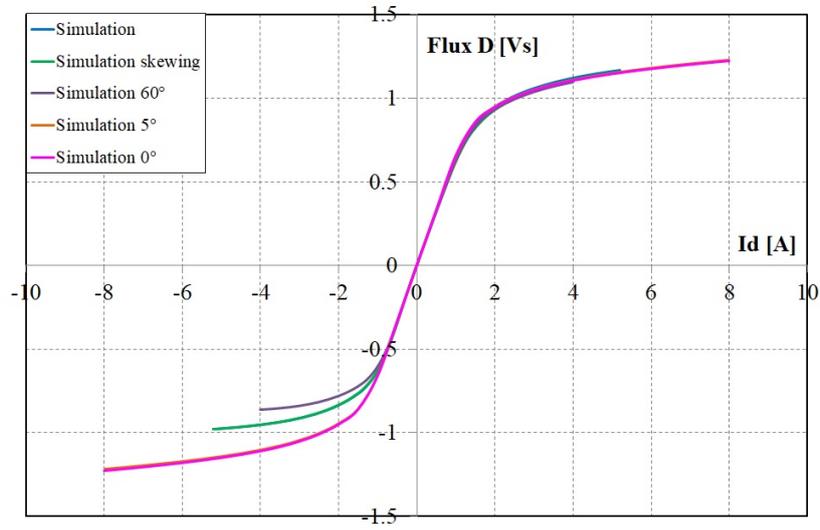


Figura 4.11: Flusso in asse d, in funzione della corrente  $i_d$

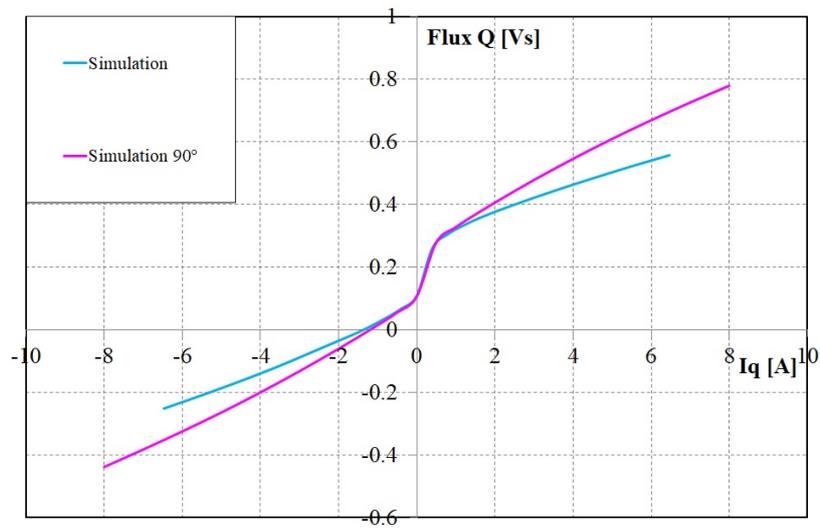


Figura 4.12: Flusso in asse q, in funzione della corrente  $i_q$

CPPA6-10

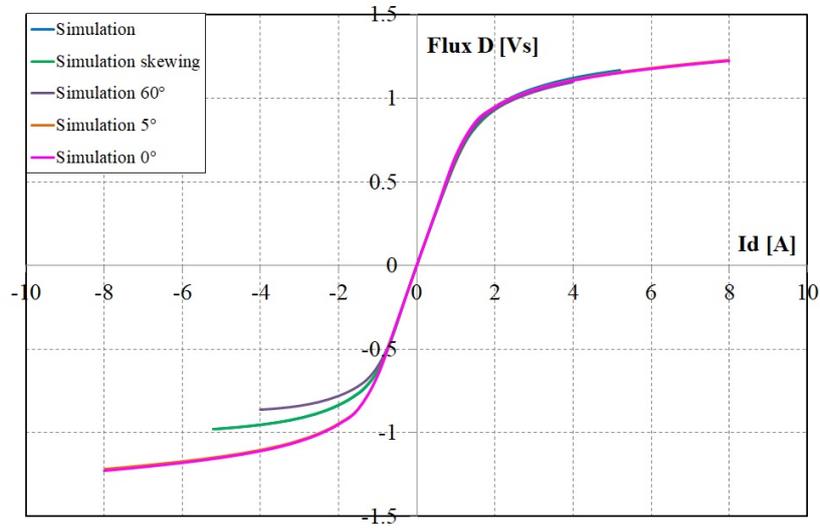


Figura 4.13: Flusso in asse d, in funzione della corrente  $i_d$

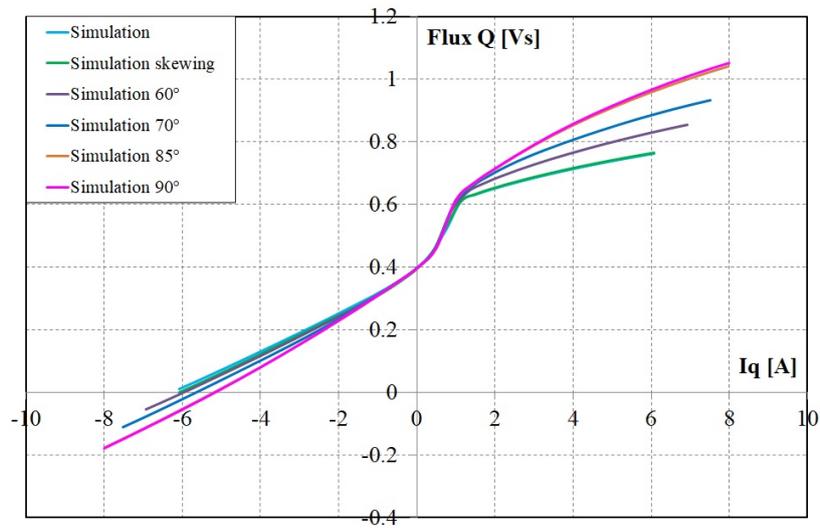


Figura 4.14: Flusso in asse q, in funzione della corrente  $i_q$

### 4.2.5 Mapping

La simulazione del mapping è stata effettuata eseguendo la procedura `sim_mapping.m`, tenendo conto dello skewing. Il risultato che si ottiene è una matrice 25x25 che contiene delle coppie, che sono state inserite in Origin e ne è stato estrapolato il grafico.

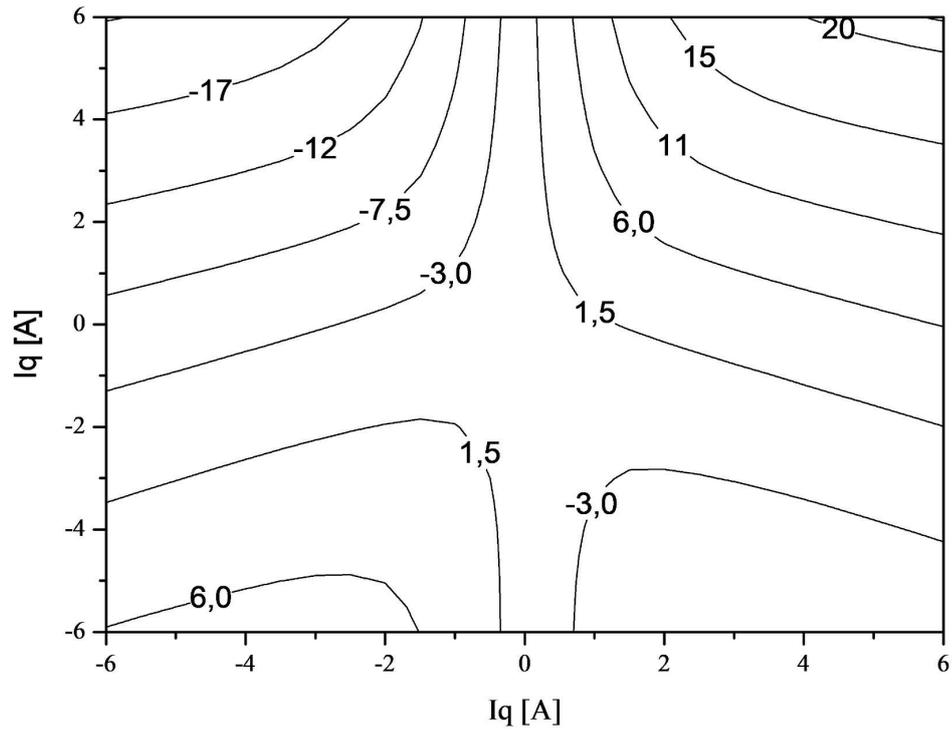


Figura 4.15: Curve iso-coppia per il PMASR con MQIP-M260 realizzate con la simulazione

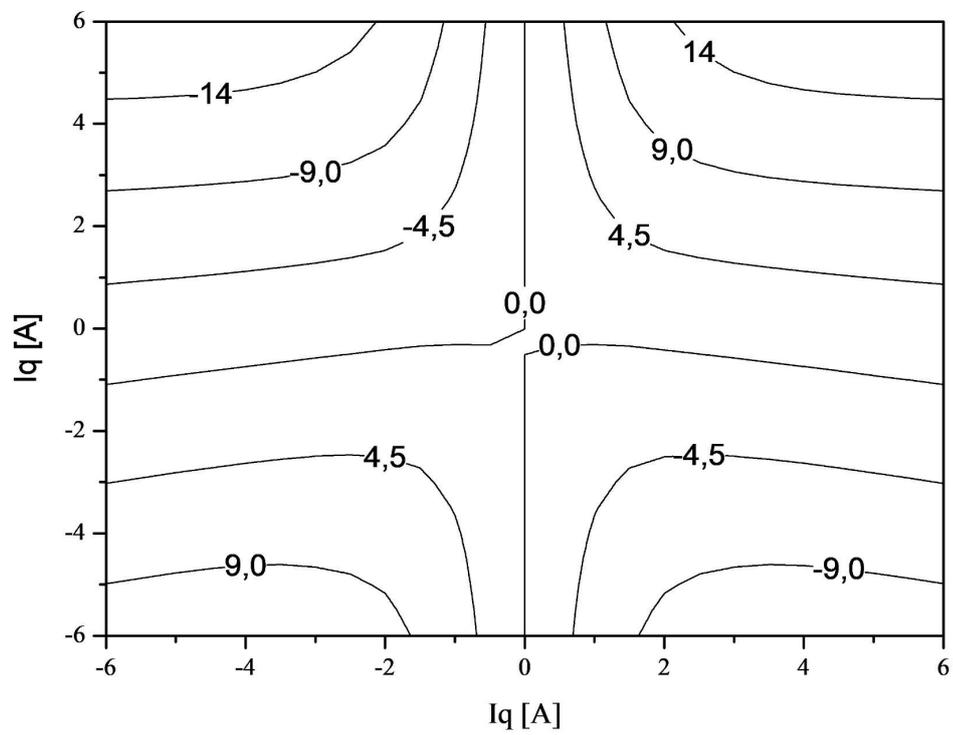


Figura 4.16: Curve iso-coppia per il PMASR con FB23 realizzate con la simulazione

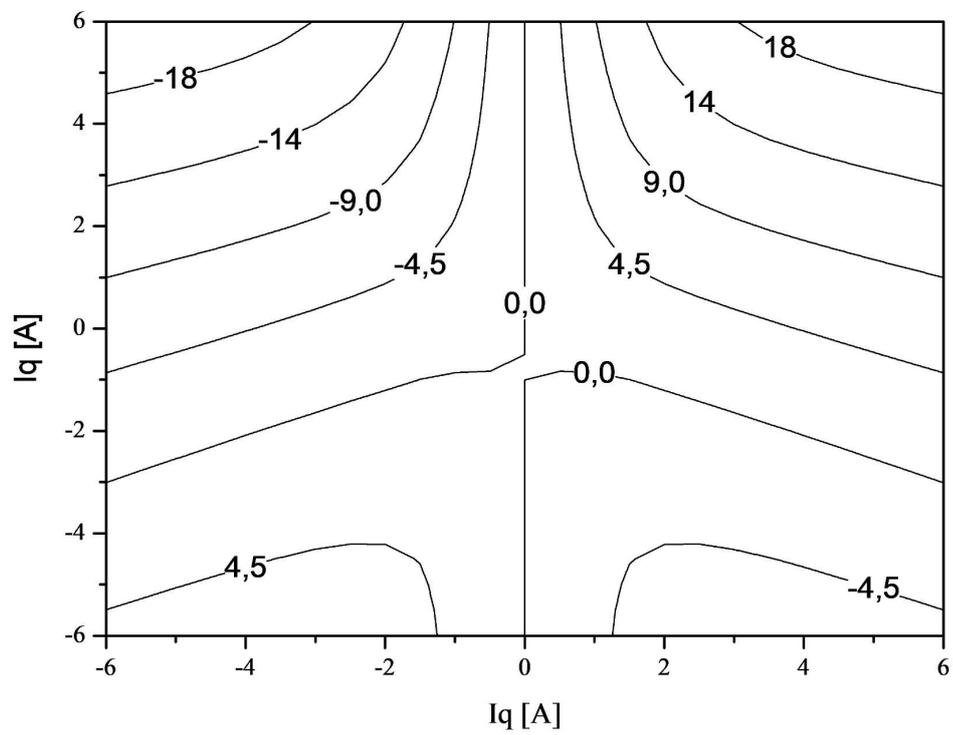


Figura 4.17: Curve iso-coppia per il PMASR con CPP6-10 realizzate con la simulazione

### 4.2.6 Densità di flusso

In questo capitolo vengono rappresentate le densità di flusso, ottenute con FEMM con la procedura `sim_single.m`, in condizioni nominali, con l'angolo di corrente impostato per dare la massima coppia.

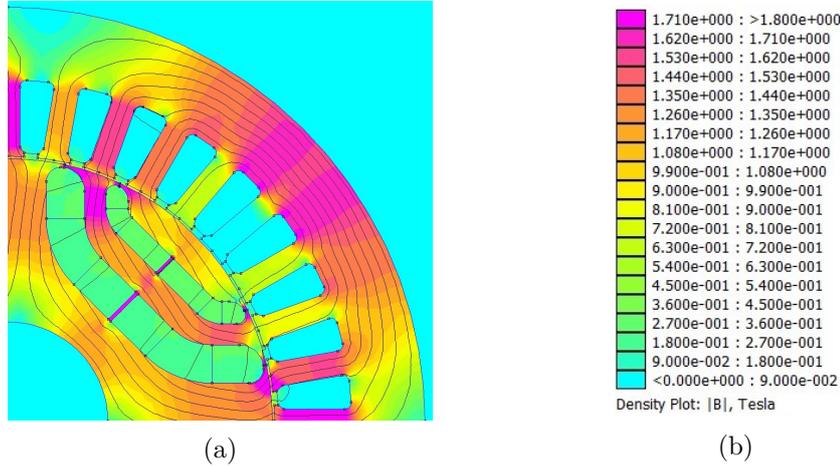


Figura 4.18: Densità di flusso per il PMASR con MQIP-M260.  $I=3$  A e  $\alpha_i = 49.5^\circ$

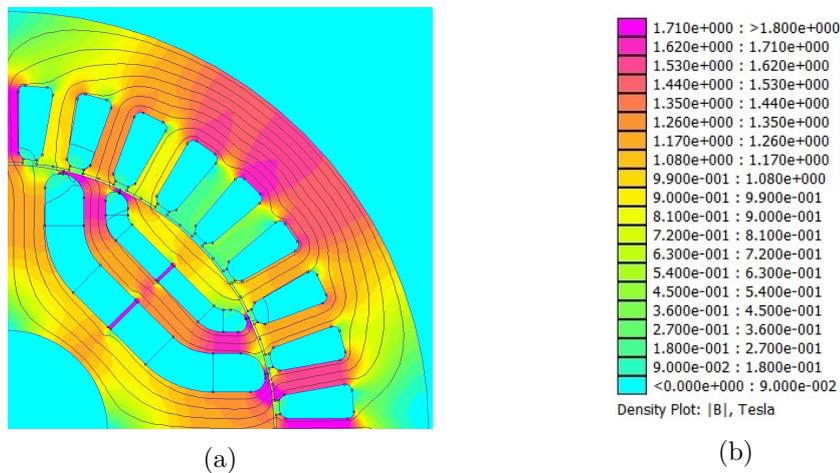


Figura 4.19: Densità di flusso per il PMASR con MQIP-M260.  $I=3$  A e  $\alpha_i = 54^\circ$

È interessante notare come i magneti del motore PMASR dotato di FB23, si comportino come aria, a differenza dei magneti degli altri due motori che hanno un'induzione non nulla (compresa tra 0.3 e 0.4 Tesla). Si può affermare quindi che i magneti in ferrite siano stati smagnetizzati già ad una corrente di 3 A.

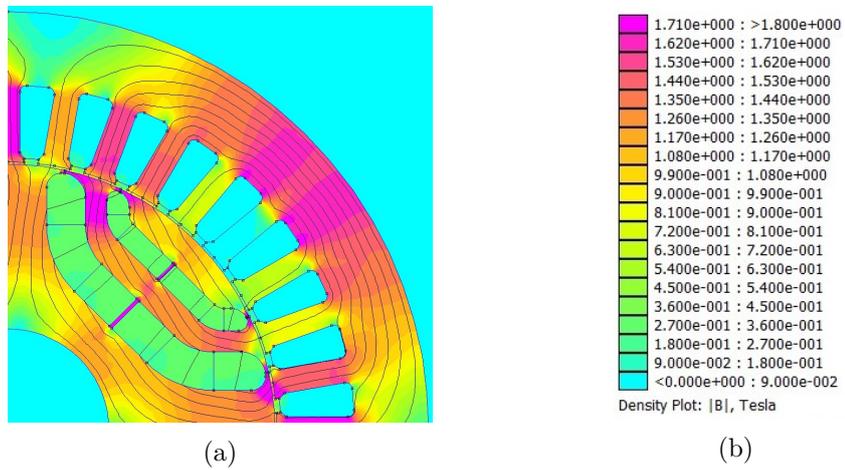


Figura 4.20: Densità di flusso per il PMASR con MQIP-M260.  $I=3$  A e  $\alpha_i = 49.5^\circ$

## 4.3 Confronto con la macchina a riluttanza

### 4.3.1 Ripple di coppia

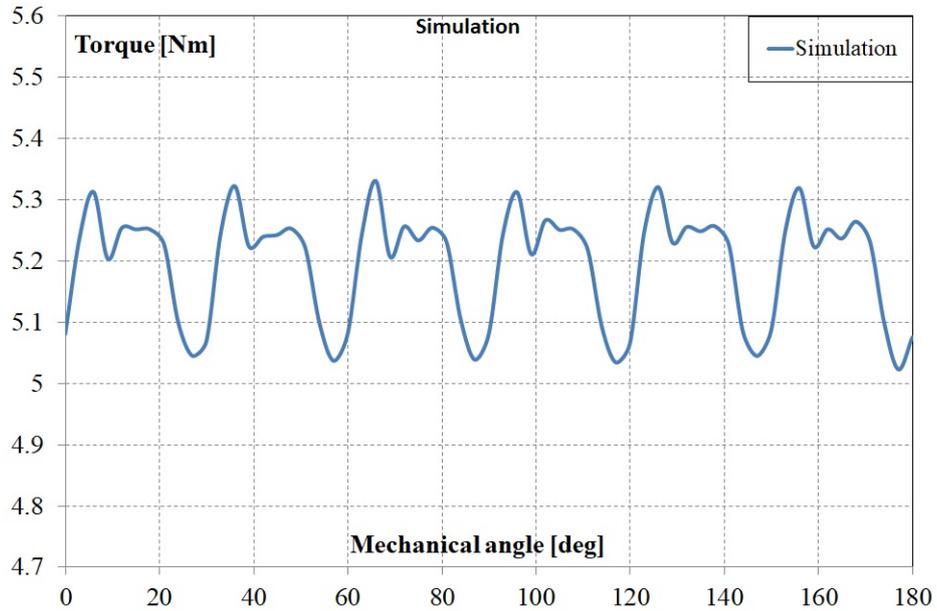


Figura 4.21: Ripple di coppia in funzione dell'angolo meccanico, per il motore senza magneti permanenti

Rispetto ai motori con i magneti permanenti il ripple di coppia della simulazione è più basso, in media di circa il 30%.

### 4.3.2 MTPA

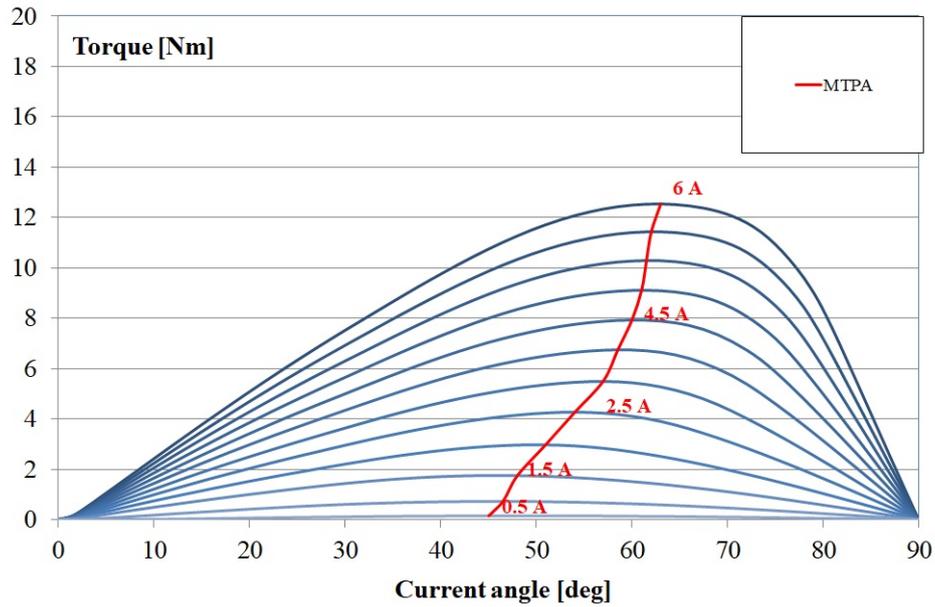


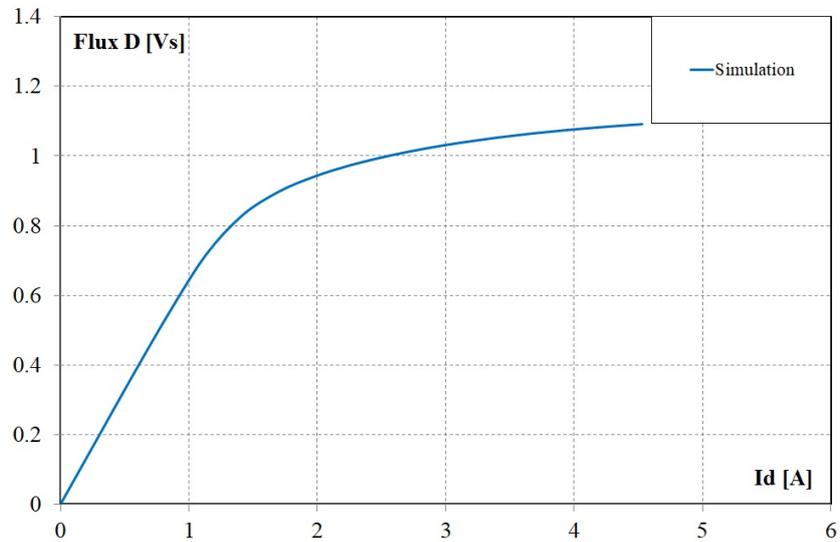
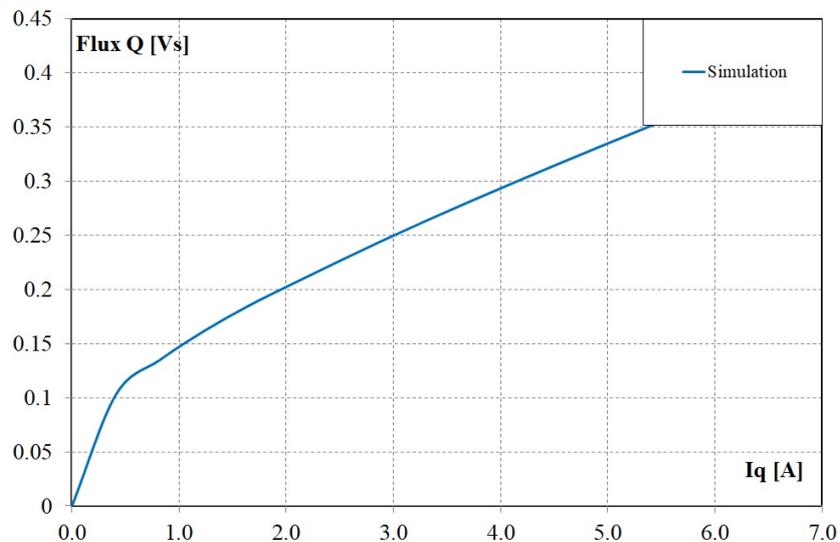
Figura 4.22: Coppia in funzione dell'angolo di corrente per ogni valore di ampiezza della corrente, per il motore a riluttanza

La coppia massima per il motore a riluttanza è più bassa rispetto ai motori PMASR e questo è un risultato che ci si aspettava. Nel dettaglio, quanto è migliorata la coppia dei motori a riluttanza assistita, rispetto al motore a riluttanza, viene descritto nella tabella 4.2:

MQIP-M260	FB23	CPPA6-10
31 %	13 %	33 %

Tabella 4.2: Percentuali di miglioramento delle coppie massime dei PMASR rispetto al motore "NO PM"

### 4.3.3 Flussi

Figura 4.23: Flusso in asse d, in funzione della corrente  $i_d$ Figura 4.24: Flusso in asse q, in funzione della corrente  $i_q$ 

Questi grafici sono stati realizzati utilizzando solamente il primo quadrante. Infatti, non essendoci magneti il comportamento nel primo e nel terzo quadrante è esattamente speculare. Si noti come, a differenza dei motori PMASR il flusso q sia centrato nell'origine, data l'assenza dei magneti permanenti. Anche per il motore a riluttanza il flusso d è più fedele alle misurazioni, rispetto al flusso q.

### 4.3.4 Mapping

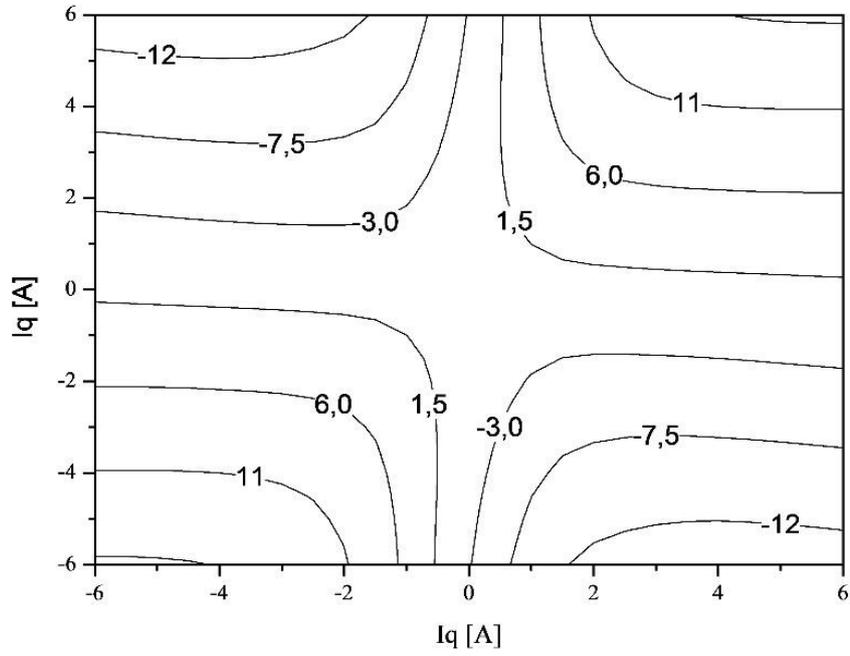


Figura 4.25: Curve iso-coppia per il motore a riluttanza realizzate con la simulazione

### 4.3.5 Densità di flusso

In questo capitolo viene rappresentata la densità di flusso, ottenuta con FEMM con la procedura `sim_single.m`, in condizioni nominali, con l'angolo di corrente impostato per dare la massima coppia.

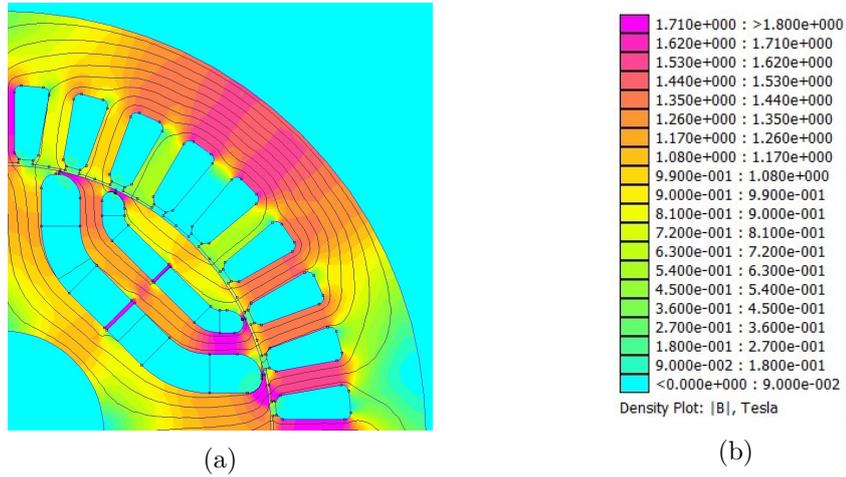


Figura 4.26: Densità di flusso per il motore a riluttanza  $I=3$  A e  $\alpha_i = 57^\circ$



## Capitolo 5

# Assemblaggio dei prototipi

### 5.1 Macchina a riluttanza

La prima macchina assemblata è stata quella a riluttanza, cioè senza la presenza dei magneti permanenti. Nella figura 5.2b si possono vedere tutti i componenti utilizzati per comporre il rotore: in basso a sinistra alcuni lamierini, in basso a destra è presente una delle due piastre che servono a tenere compatto il pacco di lamierini, sulla destra l'albero e al centro è presente un dado che ha la funzione di bloccare una delle piastre.



Figura 5.1: Dettaglio albero

Nell'immagine 5.1 è rappresentato l'albero, su cui vanno impilati i lamierini. La chiavetta a metà dell'albero è presente una chiavetta che funziona da guida per i lamierini, alla sua destra vi è un blocco per tenere ferma una delle due piastre, alla sua sinistra vi è una filettatura che serve per bloccare il dado autobloccante. A sinistra si può notare l'attacco creato ad hoc per l'encoder, mentre a destra è possibile notare la sede per un'altra chiavetta che funziona da aggancio meccanico per il banco prova.

Nell'immagine 5.3b è possibile vedere l'impilamento dei lamierini che sono stati progettati appositamente per avere uno stepping (skewing) di  $10^\circ$ . Come già detto in precedenza i lamierini sono in tutto 80, divisi in 8 gruppi da 10.



(a) Dettaglio lamierini



(b) Componenti del rotore

Figura 5.2: Componenti del rotore



(a) Primo passo dell'assemblaggio



(b) Impilamento lamierini

Figura 5.3: Assemblaggio rotore riluttanza

## 5.2 Macchine a riluttanza assistita

L'assemblaggio delle macchine a riluttanza assistita è identico a quello del riluttanza, con un'unica differenza: l'inserimento dei magneti nelle barriere di flusso. Quest'ultimo passo non è per nulla banale, in quanto i magneti devono avere la giusta tolleranza per poter entrare nelle barriere senza troppo attrito, ma allo stesso tempo devono rimanere dentro esse; ciò non è scontato, in quanto la forza repulsiva reciproca dei magneti tende a separarli



(a) Primo strato



(b) Primo strato terminato

Figura 5.4: Assemblaggio rotore PMASR con magneti MQIP-M260

e quindi a sollevare il pacco rotorico. Ovviamente questo effetto è tanto più grande quanti più magneti si prendono in considerazione, perciò il montaggio degli ultimi strati è stato più difficoltoso dei primi.

Come si può vedere dalle immagini questa macchina è dotata di 4 poli magnetici, cioè 2 coppie polari. Per cui per ogni strato (o step) si sono utilizzati 16 magneti in totale, di cui 8 magnetizzati verso l'alto e 8 verso il basso; cioè 8 sono magnetizzati con il polo sud nella parte convessa e 8 con il polo nord nella parte convessa.

Nelle immagini 5.4a e 5.4b si vede come i magneti MQIP-M260 presentino alcune irregolarità, in particolare alcuni fori che derivano dalla presenza di bolle all'interno del campione.



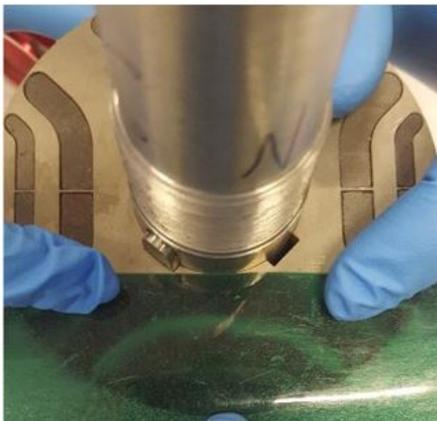
Figura 5.5: Campione di FB23 crepato durante l'assemblaggio

Come detto in precedenza è importante la tolleranza con cui vengono realizzati i magneti per evitare di dover stressare meccanicamente il materiale. Questi materiali non sono adatti a urti e flessioni, per cui vanno maneggiati con attenzione. Come si può vedere

nell'immagine 5.5 un campione di FB23 è stato leggermente crepato in superficie a causa degli sforzi applicati per inserirlo nell'opportuna sede. Questo tipo di imperfezione non provoca particolari cambiamenti sul funzionamento e le performance del motore.



Figura 5.6: Dettaglio sullo skewing



(a) Flussi



(b) Skewing

Figura 5.7: Uso del rilevatore di flussi per mettere in evidenza lo skewing e i flussi magnetici prodotti dai magneti trasversalmente all'albero

L'aspetto esterno dei rotori è mostrato nella figura 5.8 e ovviamente è identico sia per il motore a riluttanza, sia per i tre PMASR.



Figura 5.8: Rotore assemblato



## Capitolo 6

# Misure sperimentali e confronto dei risultati

### 6.1 MQIP-M260

#### 6.1.1 BEMF

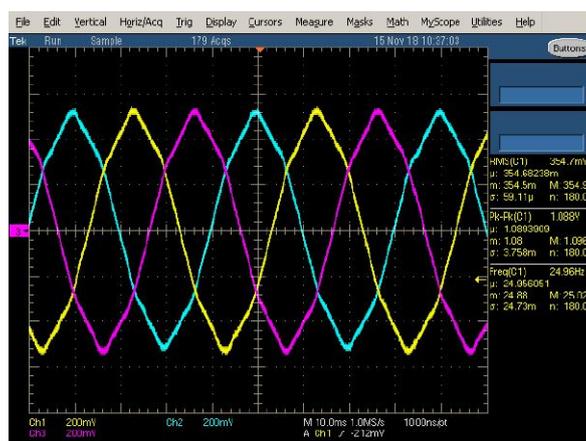


Figura 6.1: BEMF del PMASR con MQIP-M260, a 750 rpm

La BEMF, in inglese Back Electromotive force o Counter-electromotive force, è una tensione prodotta dall'inerzia del rotore, cioè mettendolo prima in moto e poi disalimentandolo improvvisamente. Mentre il rotore è ancora in rotazione, grazie alla sua inerzia, si misura la forza elettromotrice prodotta. Ovviamente è una fem molto bassa. È possibile notare come le 3 forme d'onda generate siano equamente sfasate tra di loro e come esse siano simmetriche. Ciò porta a dire che il motore sia ben costruito.

## 6.1.2 Coppie e contenuto armonico

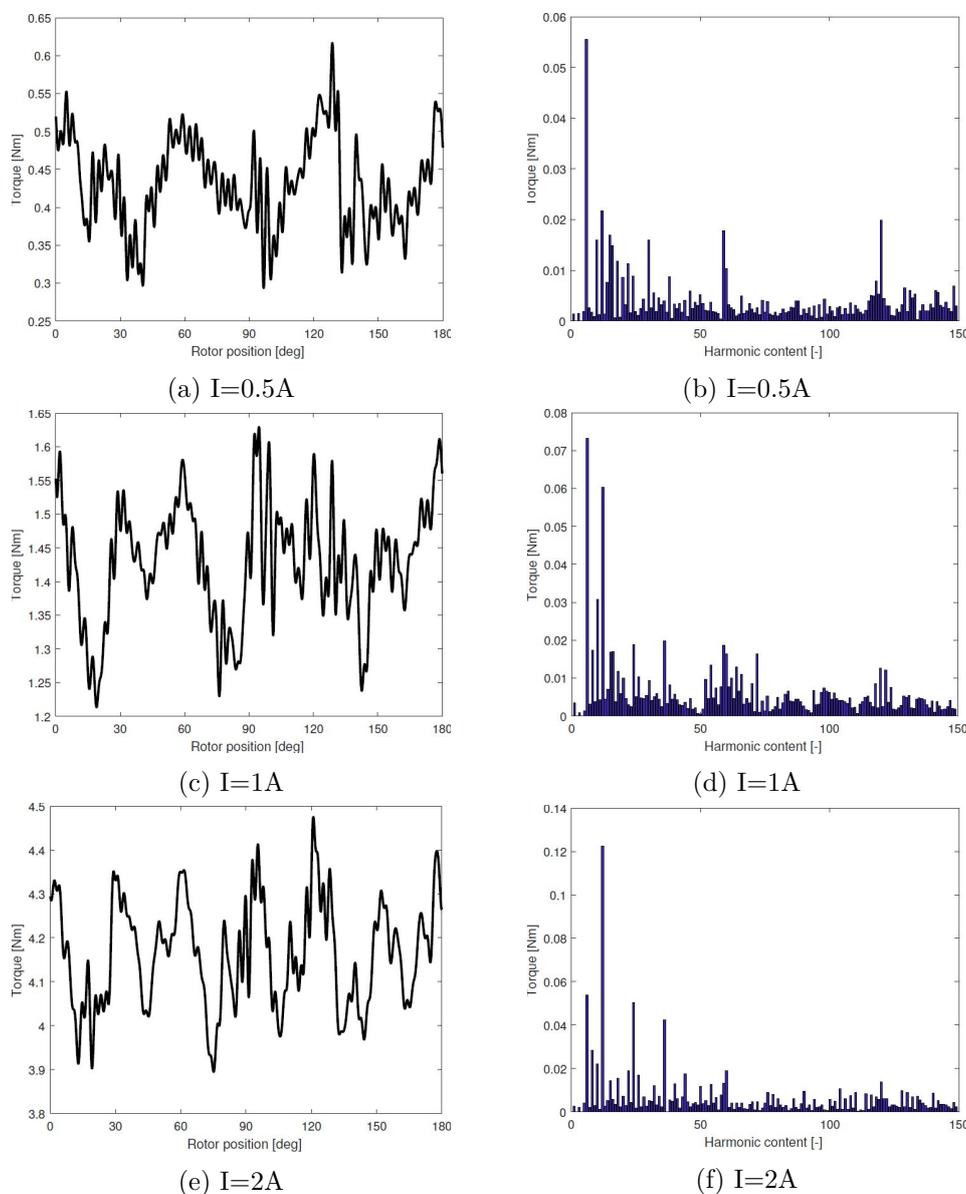
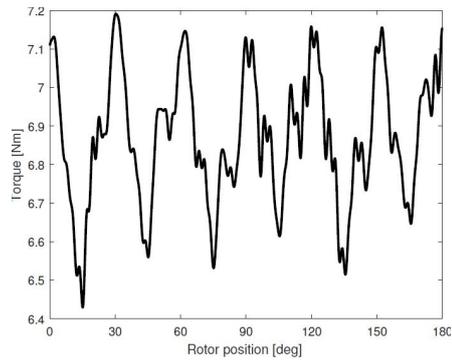
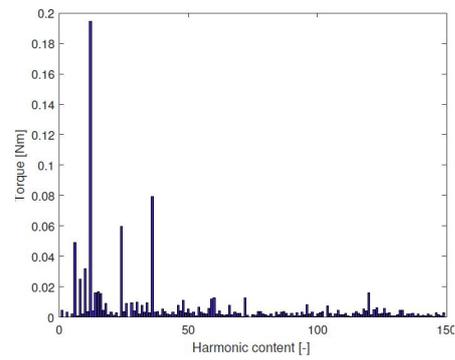
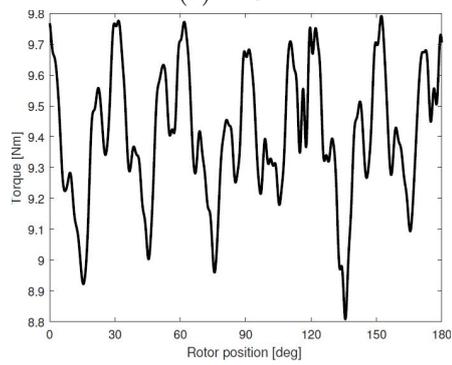
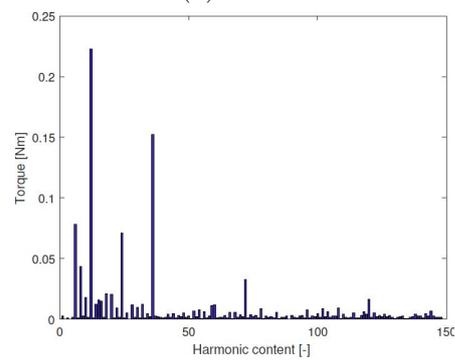
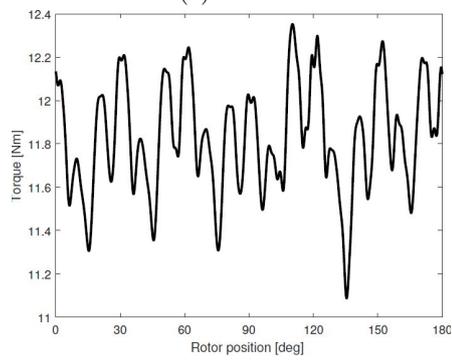
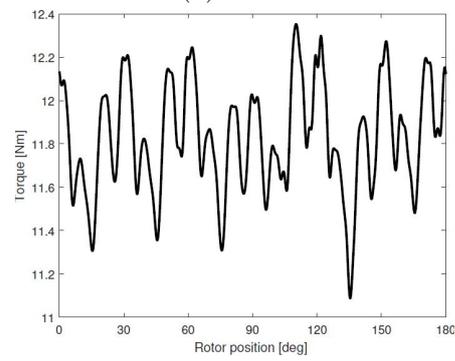


Figura 6.2

Questi grafici rappresentano alcune misurazioni sul ripple di coppia in funzione dell'angolo meccanico e il relativo contenuto armonico, tramite una distribuzione discreta. Si noti come, in media, il contributo maggiore sia dato dalla seconda armonica; questo è sempre meno vero all'aumentare della corrente. Questo fenomeno è dato molto probabilmente da un problema di modulazione del banco prova. Infatti, se si guarda alle simulazioni, questo andamento di armonica doppia non è presente. Questo comportamento è presente anche per l'altro motore con magneti in NdFeB e nel motore a riluttanza.

(a)  $I=3A$ (b)  $I=3A$ (c)  $I=4A$ (d)  $I=4A$ (e)  $I=5A$ (f)  $I=5A$ 

Per questo motore (e anche per gli altri, come si vedrà in seguito) il disturbo armonico diminuisce all'aumentare della corrente. Questo potrebbe essere un inconveniente proveniente dall'inverter.

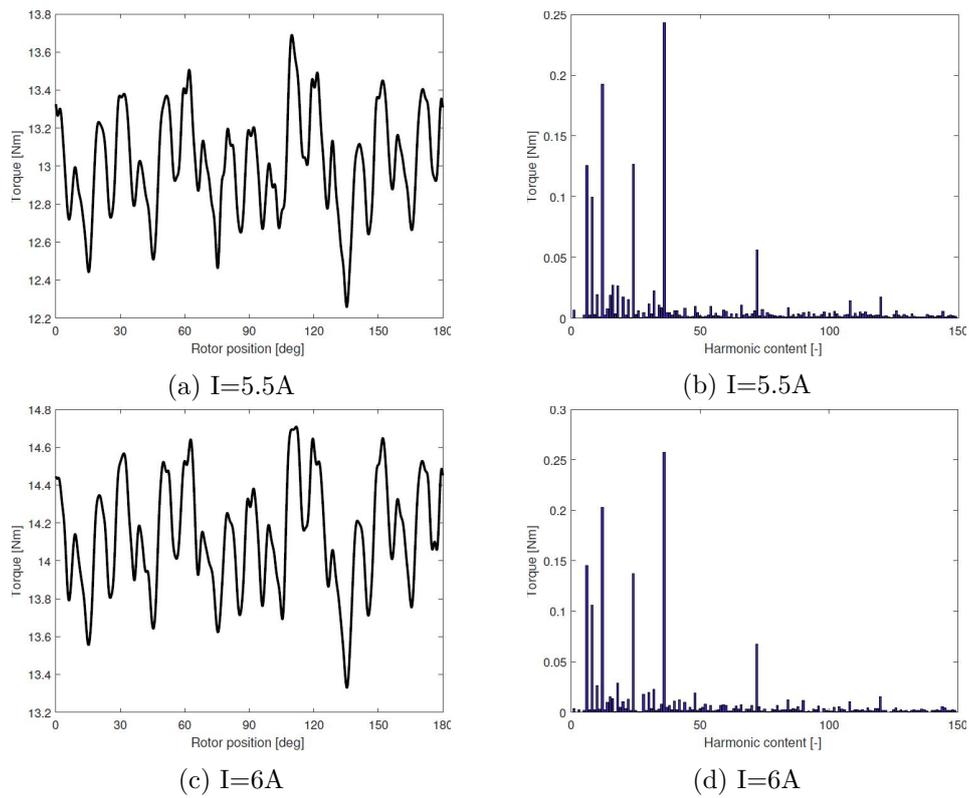


Figura 6.4: Comportamenti della coppia (ripple), in base al contenuto armonico, al variare dell'angolo meccanico, per il motore PMASR con MQIP-M260

### 6.1.3 MTPA

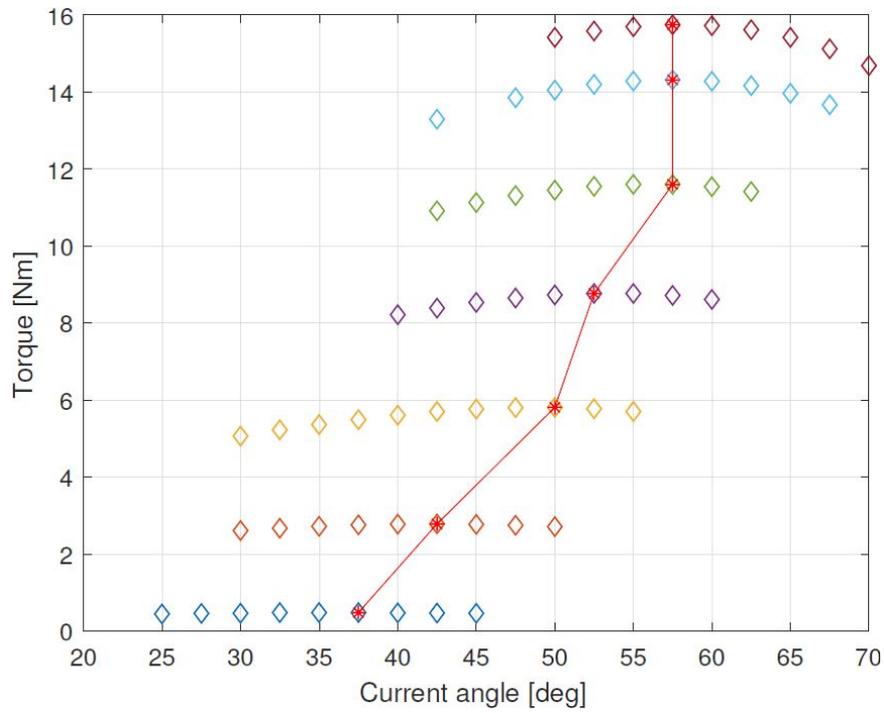


Figura 6.5: MTPA del motore PMASR con MQIP-M260 per 6 valori di corrente di prova

Nell'immagine 6.5 sono mostrate le coppie massime calcolate per 6 valori di corrente: 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5, 5.5.

### 6.1.4 Curve di magnetizzazione

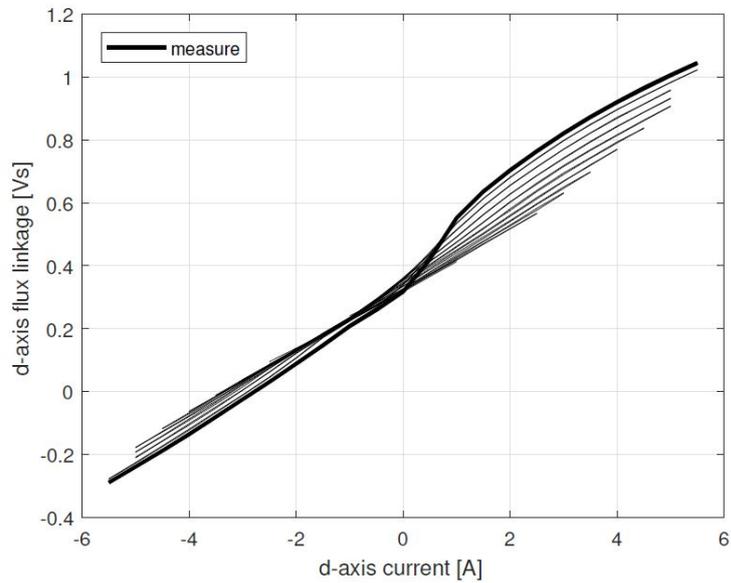


Figura 6.6: Curva di magnetizzazione per l'asse d, del PMASR con MQIP-M260

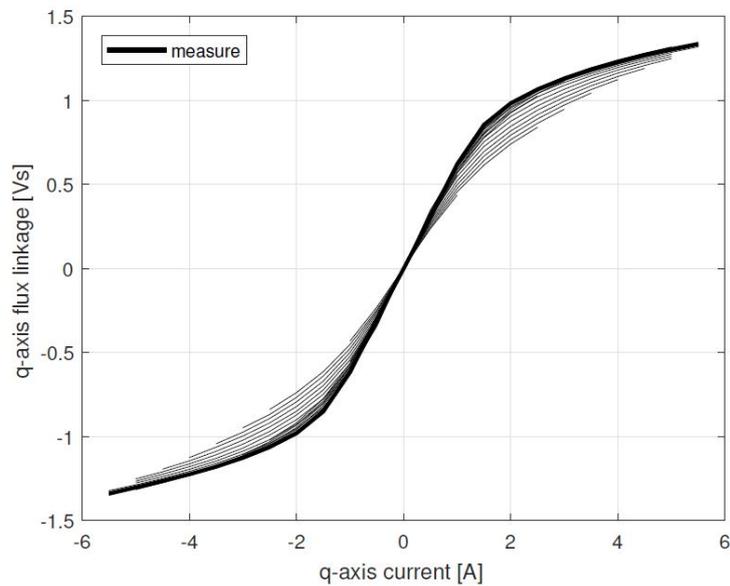


Figura 6.7: Curva di magnetizzazione per l'asse q, del PMASR con MQIP-M260

### 6.1.5 Mapping

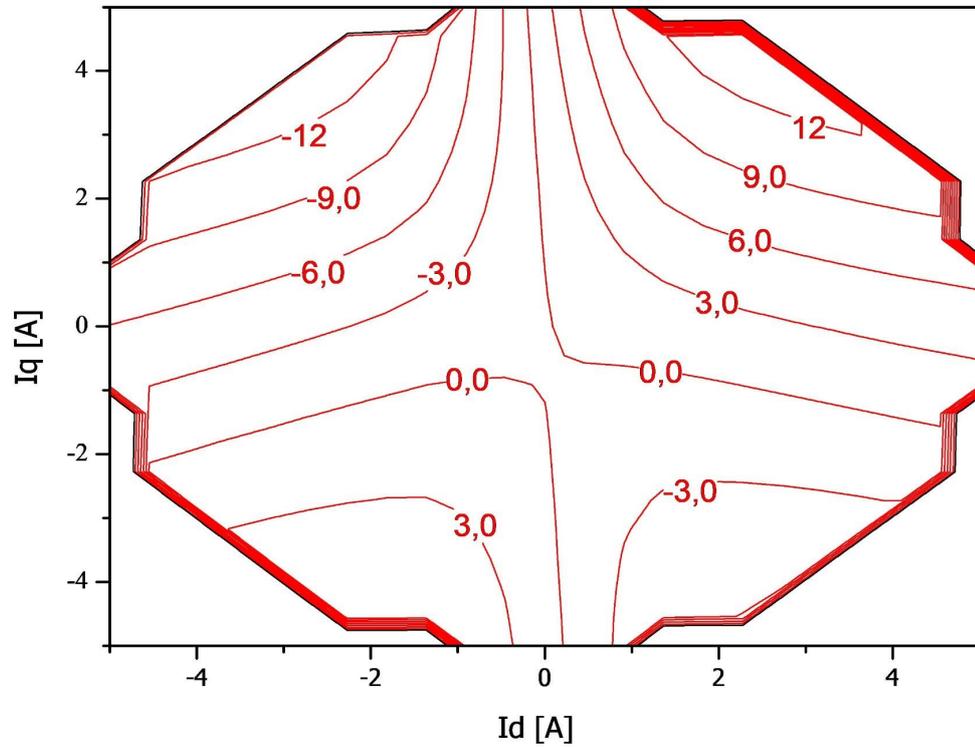


Figura 6.8: Iso-coppie del PMASR con MQIP-M260

Nell'immagine 6.8 sono mostrate le curve "iso-torque". Questo grafico è anche detto "mapping". È stato creato elaborando i dati con Origin; si nota come siano presenti, nei vertici del grafico, delle "frontiere" in cui non ci sono curve. Ciò è dato dal fatto che non sono presenti dati di coppia relativi a quelle correnti.

## 6.2 FB23

### 6.2.1 Coppie e contenuto armonico

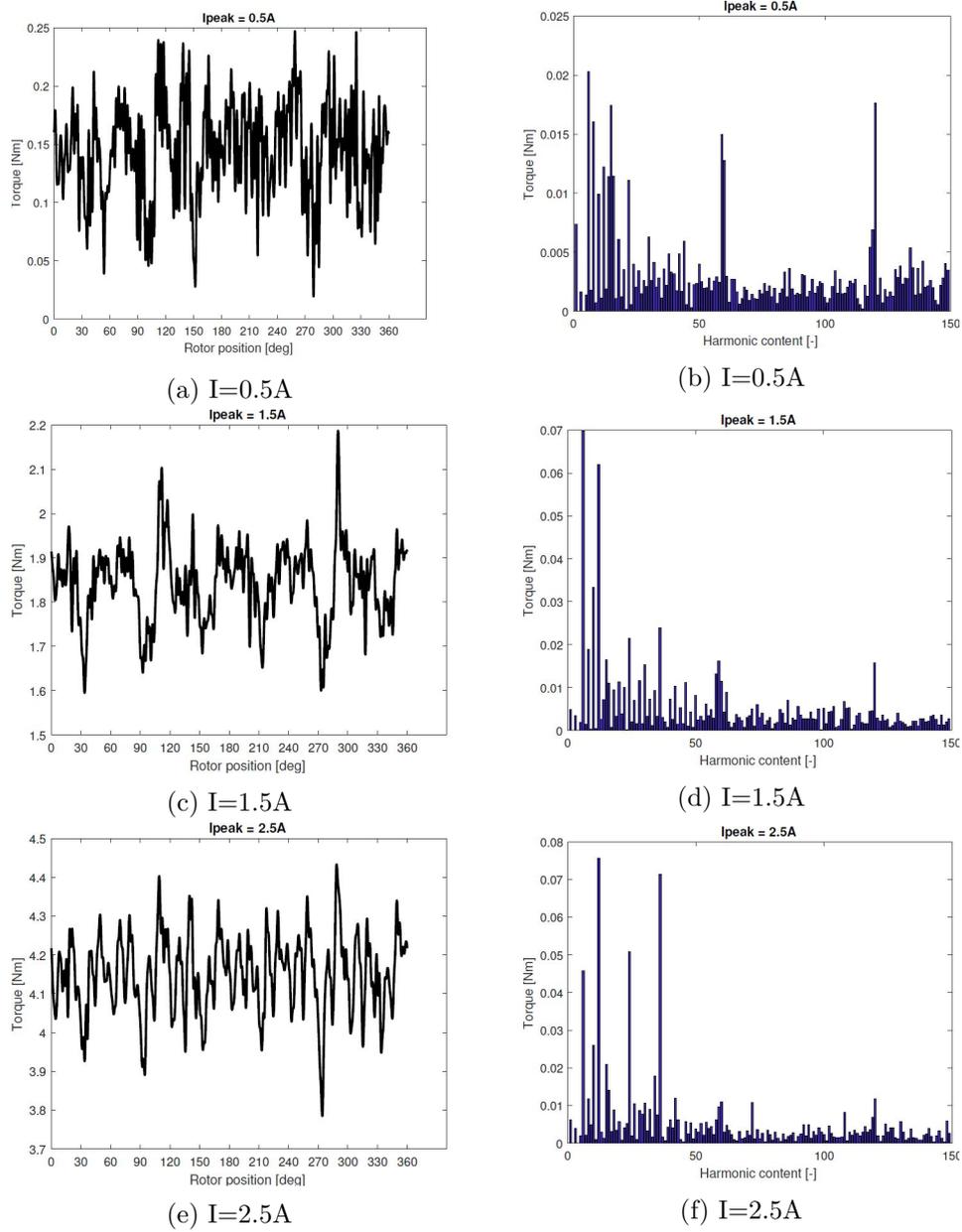
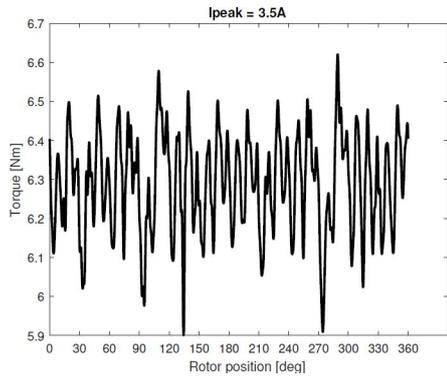
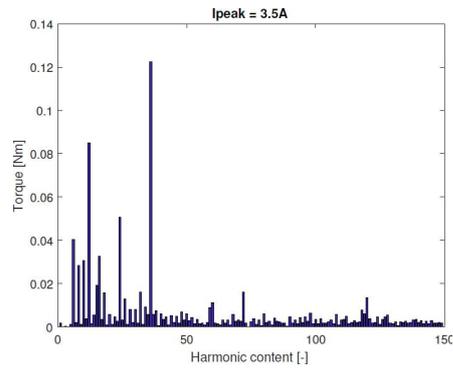


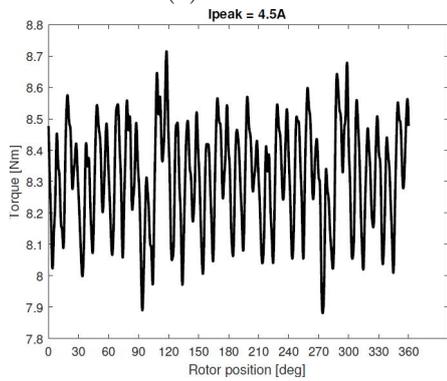
Figura 6.9: Comportamenti della coppia (ripple), in base al contenuto armonico, al variare dell'angolo meccanico, per il motore PMASR con FB23



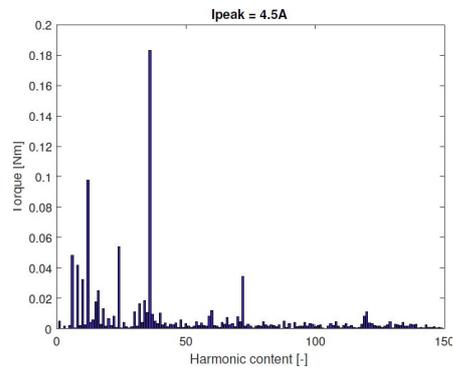
(a)  $I=3.5A$



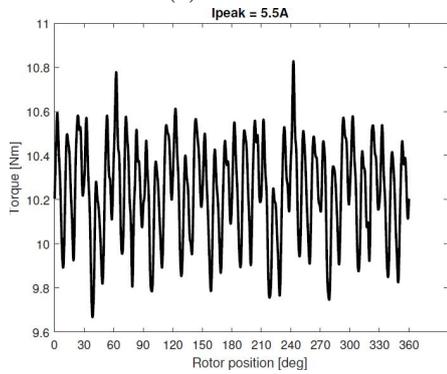
(b)  $I=3.5A$



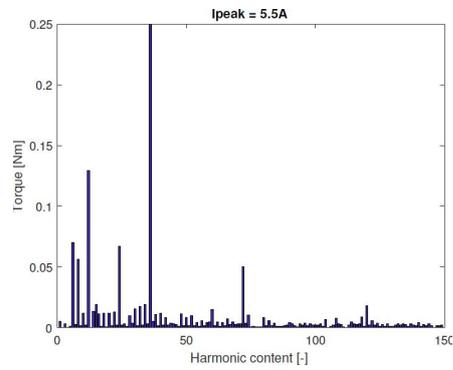
(c)  $I=4.5A$



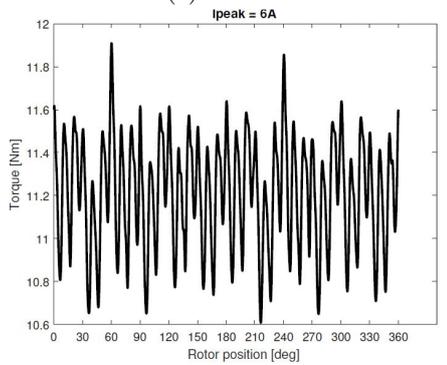
(d)  $I=4.5A$



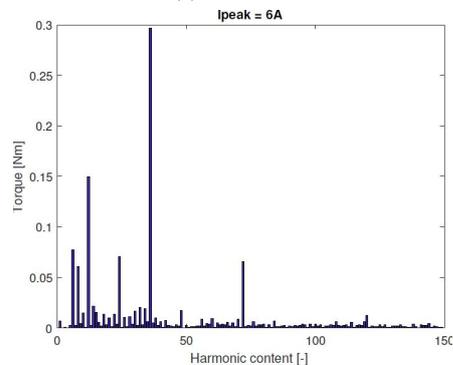
(e)  $I=5.5A$



(f)  $I=5.5A$



(g)  $I=6A$



(h)  $I=6A$

Il PMASR con FB23 non presenta il problema riscontrato negli altri tre motori, cioè l'aver una fondamentale corrispondente alla seconda armonica. Si vede come per alcuni valori di corrente la seconda armonica sia addirittura nulla. È possibile notare una coppia molto più disturbata, soprattutto per valori di corrente bassi, rispetto agli altri motori: potrebbe essere stato anche questo un problema di modulazione, o semplicemente di collegamento, al banco prova.

### 6.2.2 MTPA

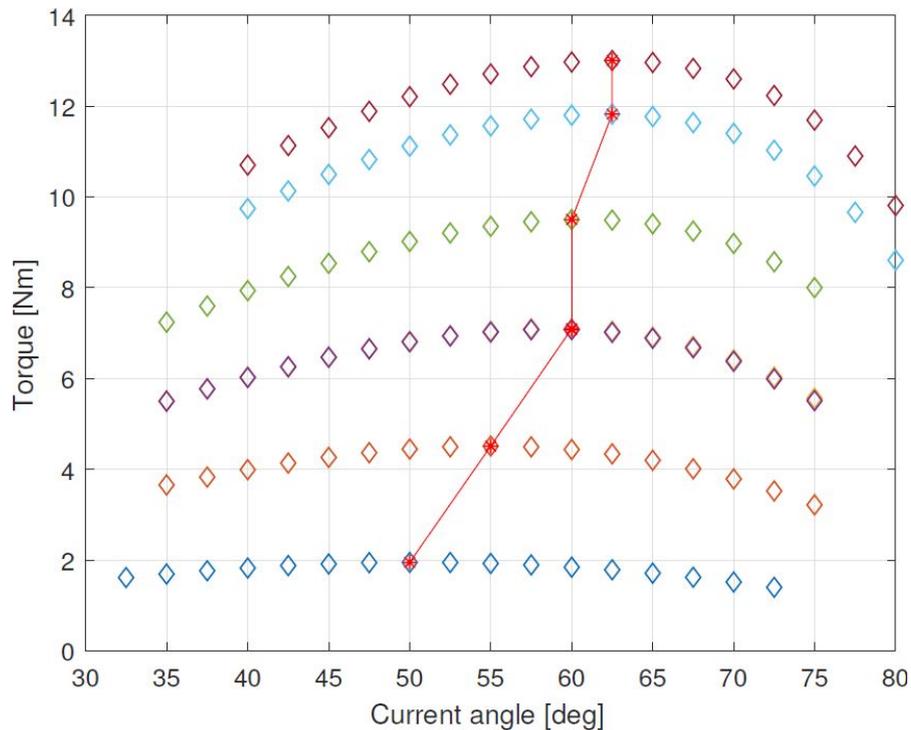


Figura 6.11: MTPA del motore PMASR con FB23 per 6 valori di corrente di prova

Nell'immagine 6.11 sono mostrate le coppie massime calcolate per valori di corrente: 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5 e 6.

### 6.2.3 Mapping

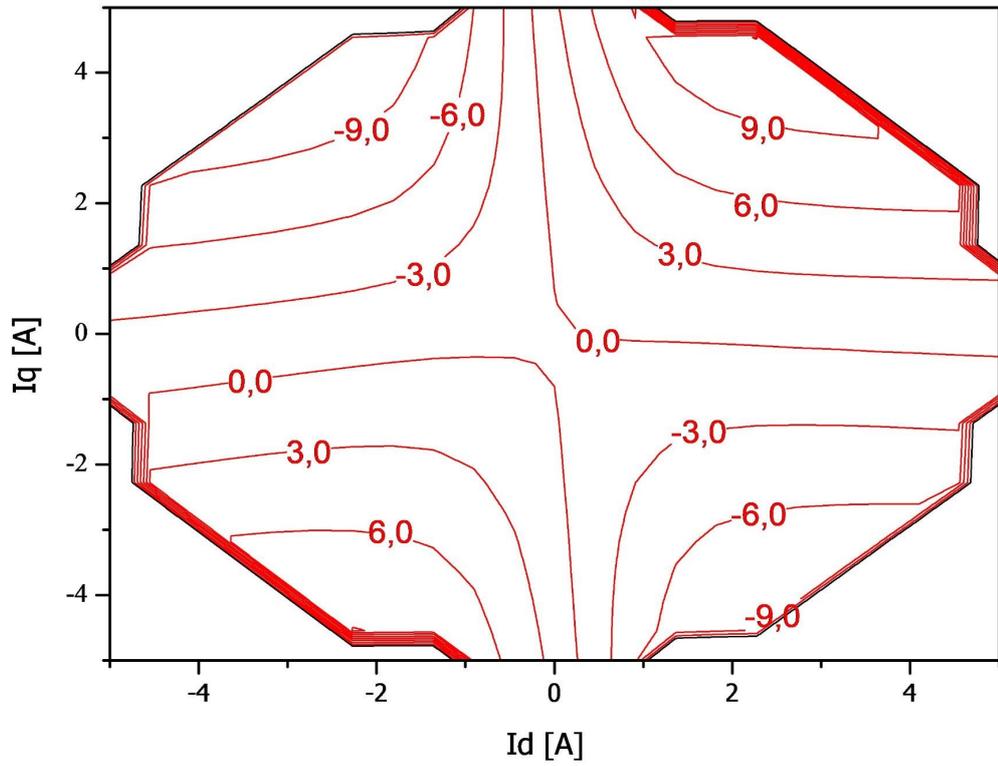


Figura 6.12: Iso-coppie del PMASR con FB23

## 6.3 CPPA6-10

### 6.3.1 Coppie e contenuto armonico

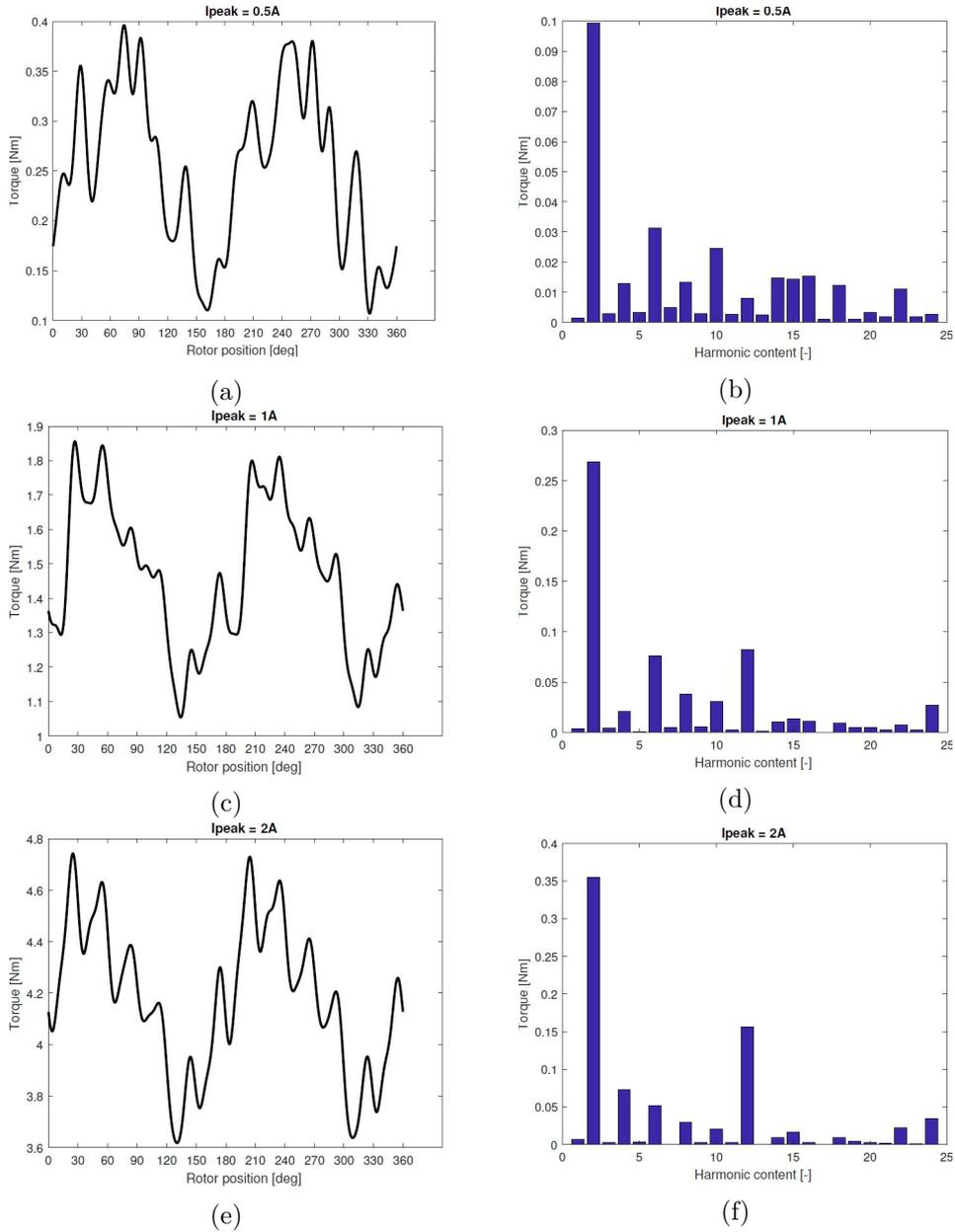
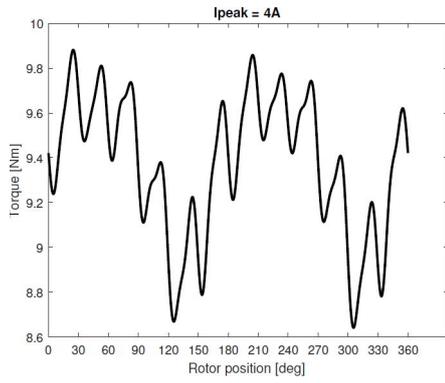
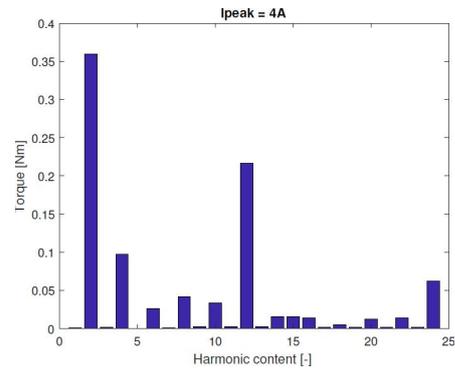


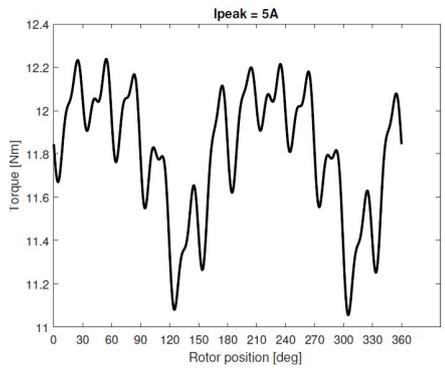
Figura 6.13: Comportamenti della coppia (ripple), in base al contenuto armonico, al variare dell'angolo meccanico, per il motore PMASR con FB23



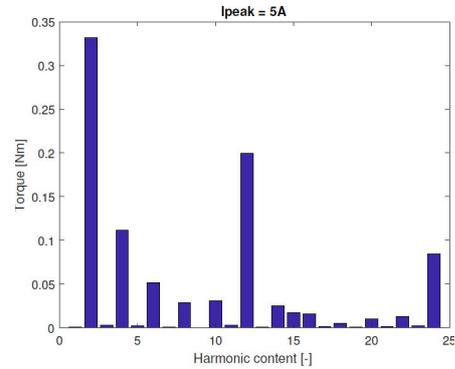
(a)



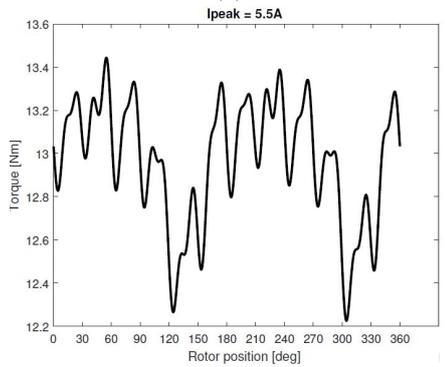
(b)



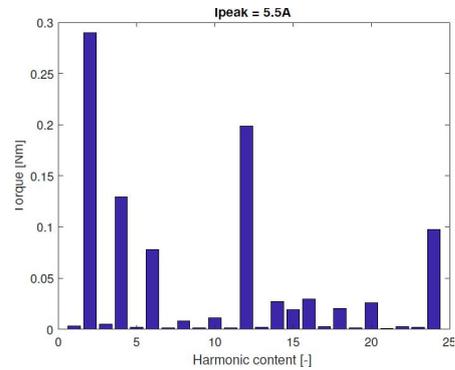
(c)



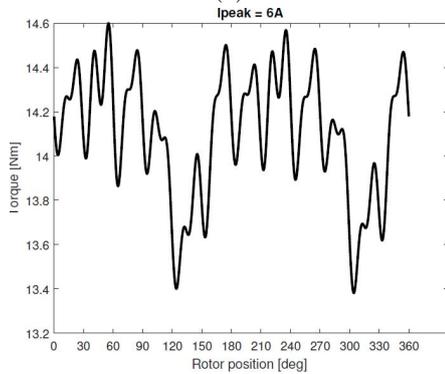
(d)



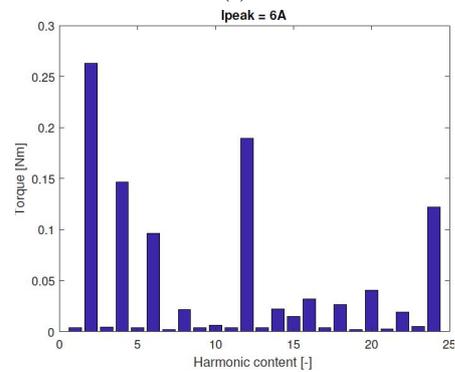
(e)



(f)



(g)



(h)

### 6.3.2 MTPA

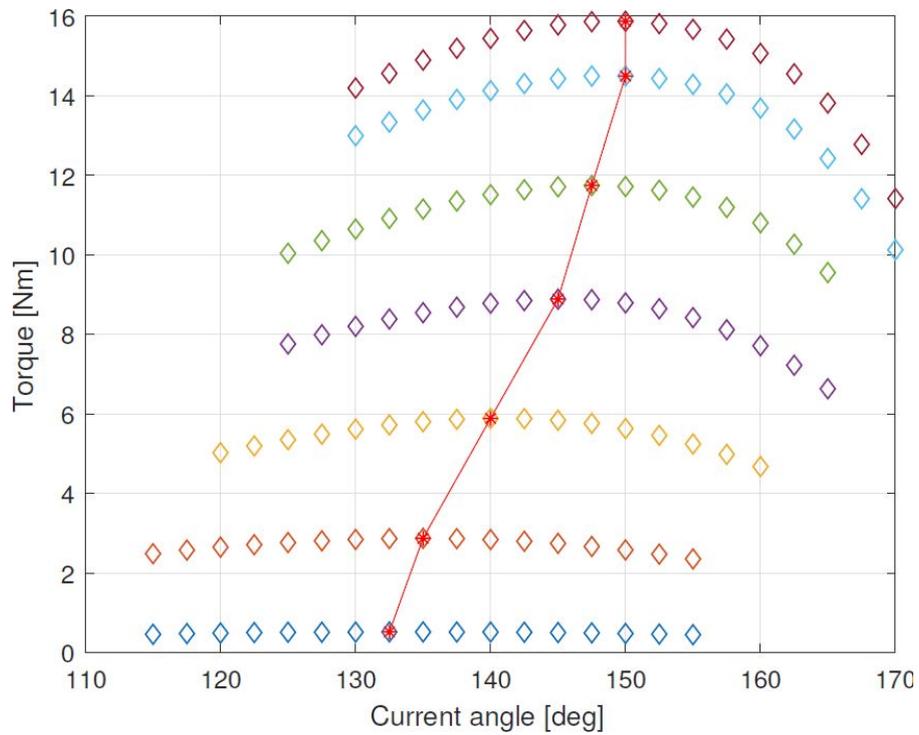


Figura 6.15: MTPA del motore PMASR con CPPA6-10 per 6 valori di corrente di prova

Nell'immagine 6.15 sono mostrate le coppie massime calcolate per 7 valori di corrente: 1, 2, 3, 4, 5, 5.5, 6

### 6.3.3 Curve di magnetizzazione

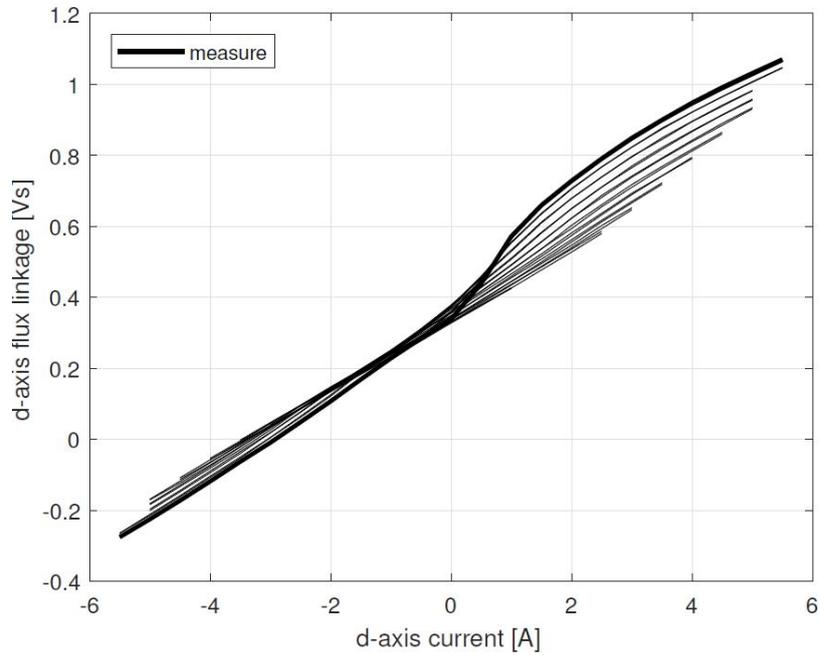


Figura 6.16: Curva di magnetizzazione per l'asse d, del PMASR con CPPA6-10

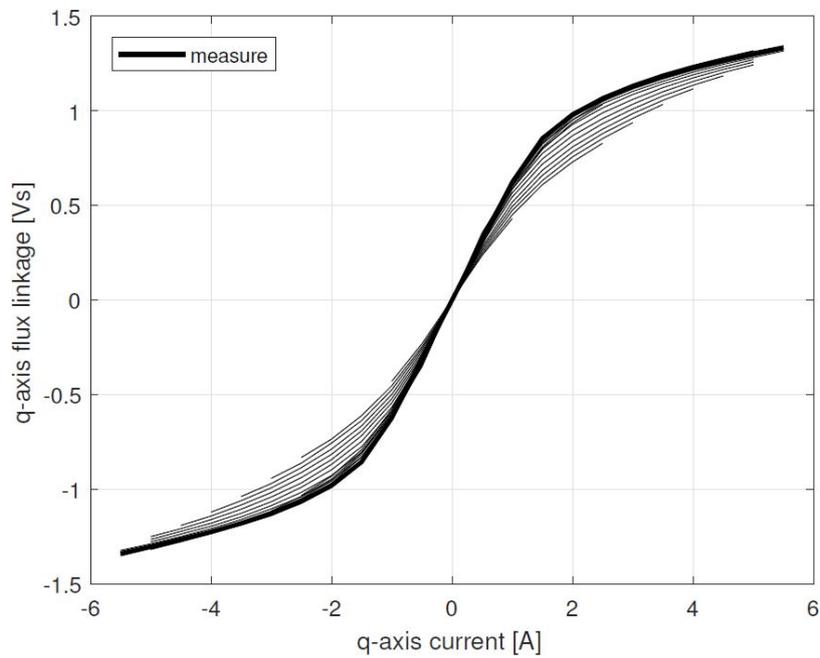


Figura 6.17: Curva di magnetizzazione per l'asse q, del PMASR con CPPA6-10

### 6.3.4 Mapping

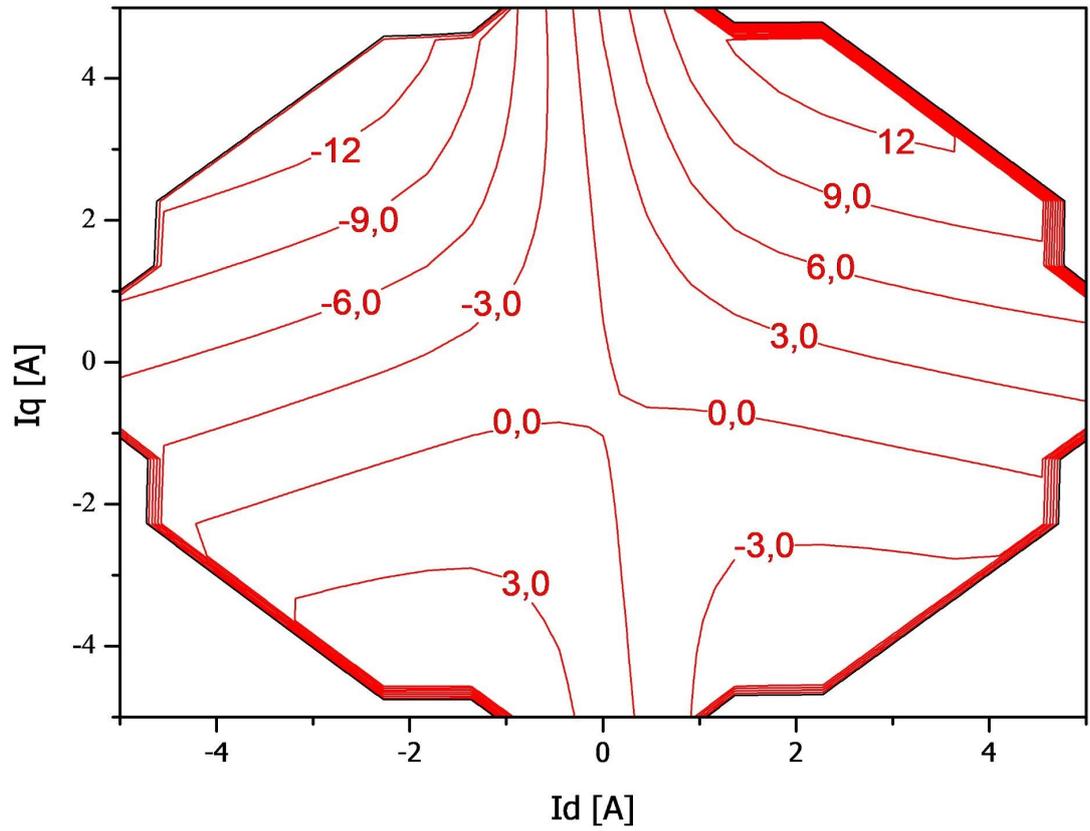
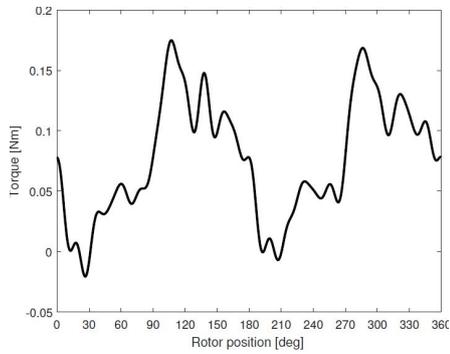


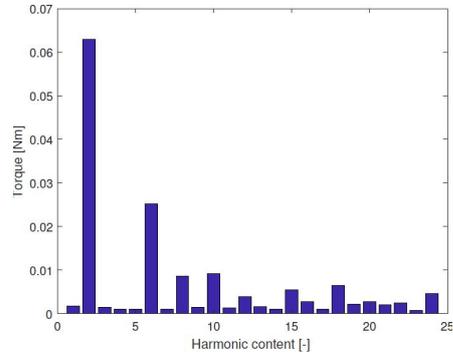
Figura 6.18: Iso-coppie del PMASR con CPPA6-10

## 6.4 Motore a riluttanza

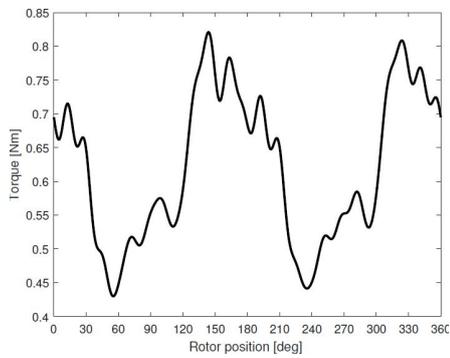
### 6.4.1 Coppie e contenuto armonico



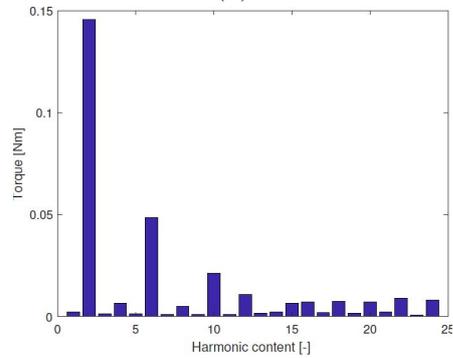
(a)



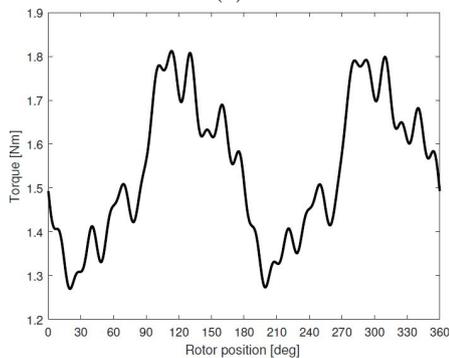
(b)



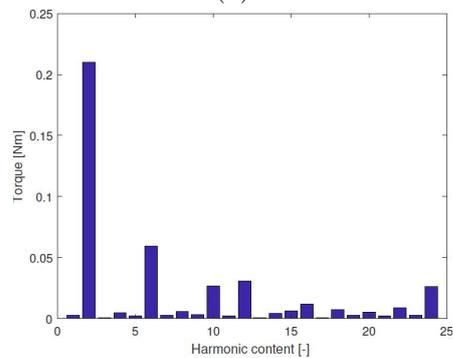
(c)



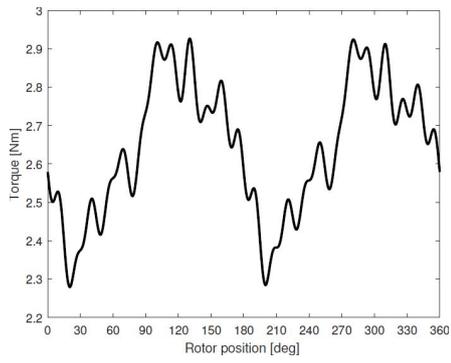
(d)



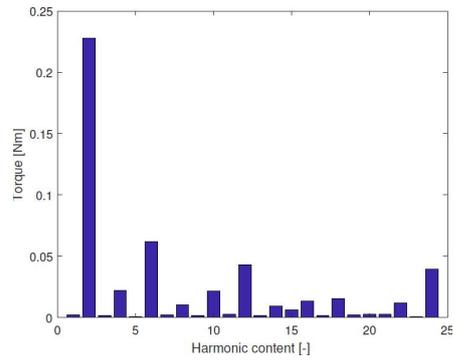
(e)



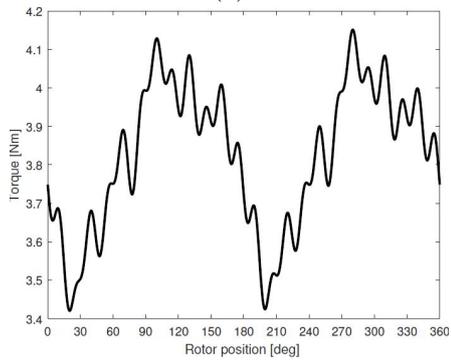
(f)



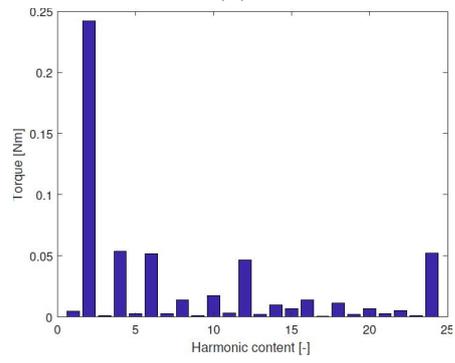
(a)



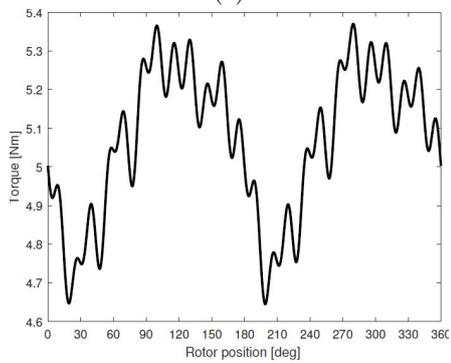
(b)



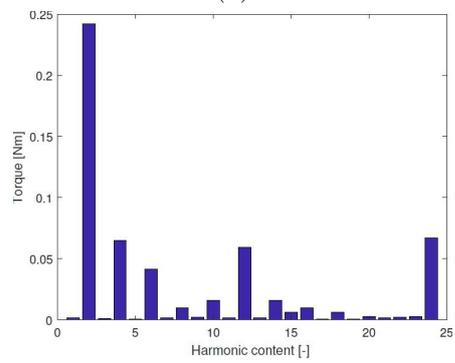
(c)



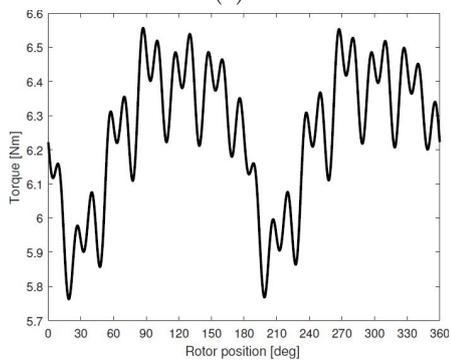
(d)



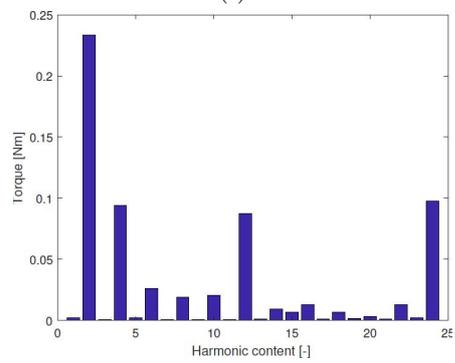
(e)



(f)



(g)



(h)

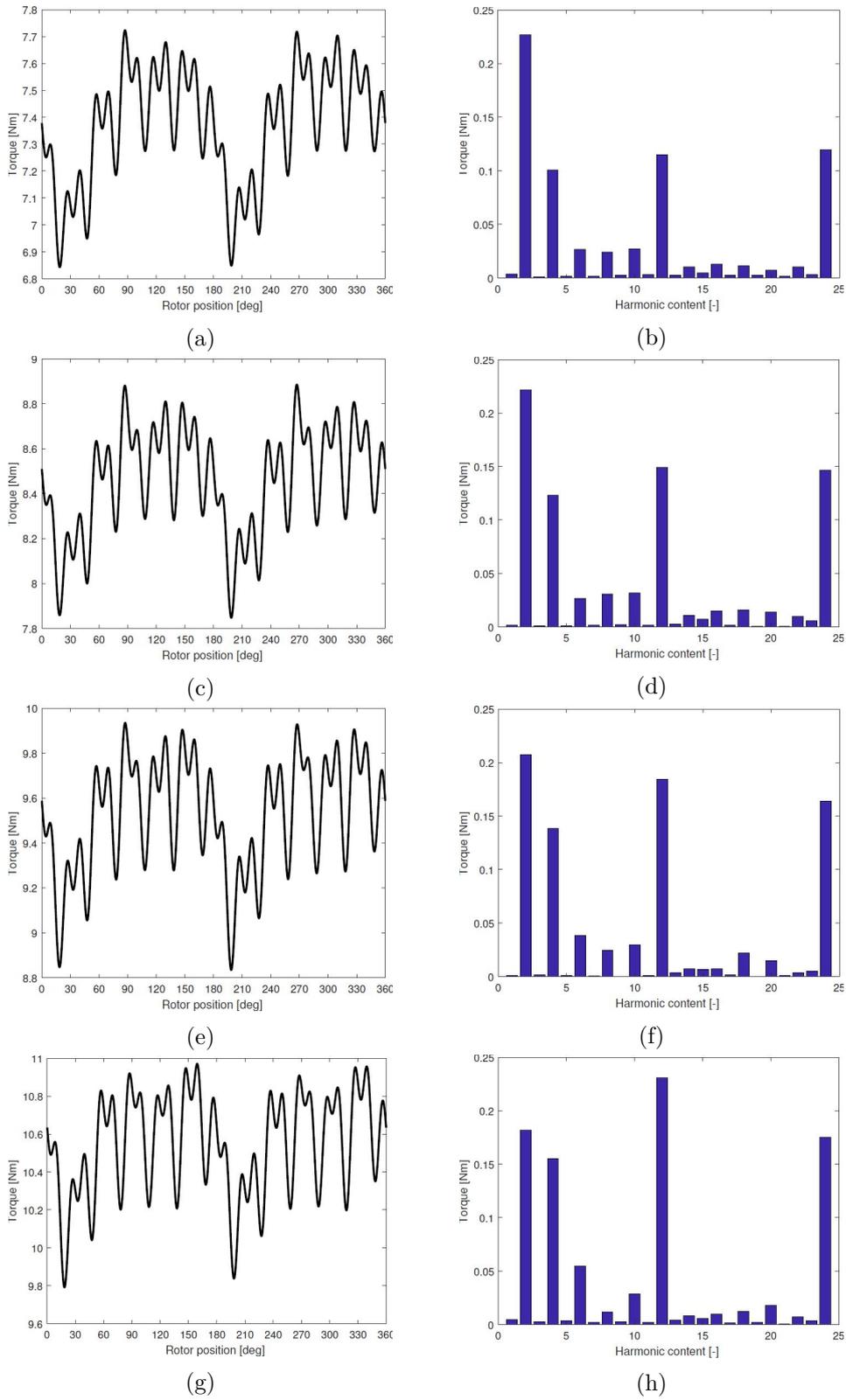


Figura 6.21: Comportamenti della coppia (ripple), in base al contenuto armonico, al variare dell'angolo meccanico, per il motore a riluttanza

### 6.4.2 MTPA

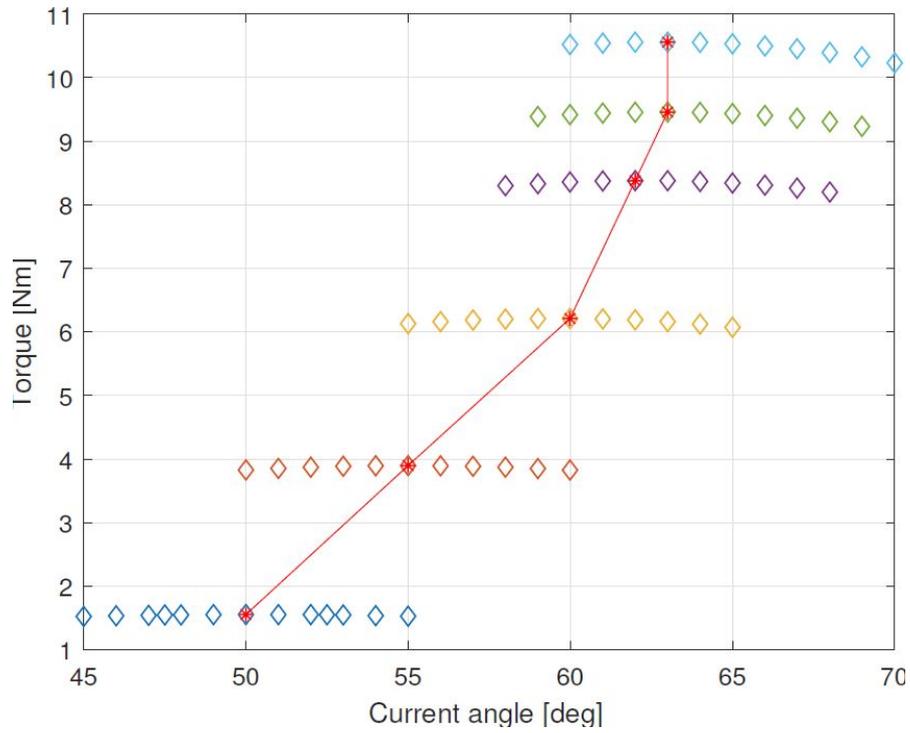


Figura 6.22: MTPA del motore a riluttanza per 6 valori di corrente di prova

Correnti usate per ricavare il grafico 6.22: 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5, 5.5.

### 6.4.3 Curve di magnetizzazione

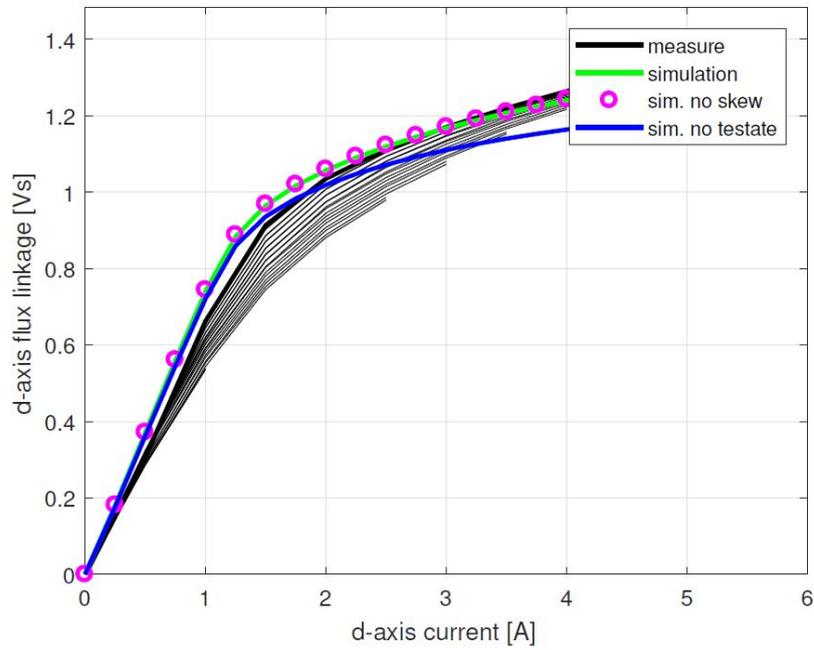


Figura 6.23: Curva di magnetizzazione per l'asse d, per il motore a riluttanza

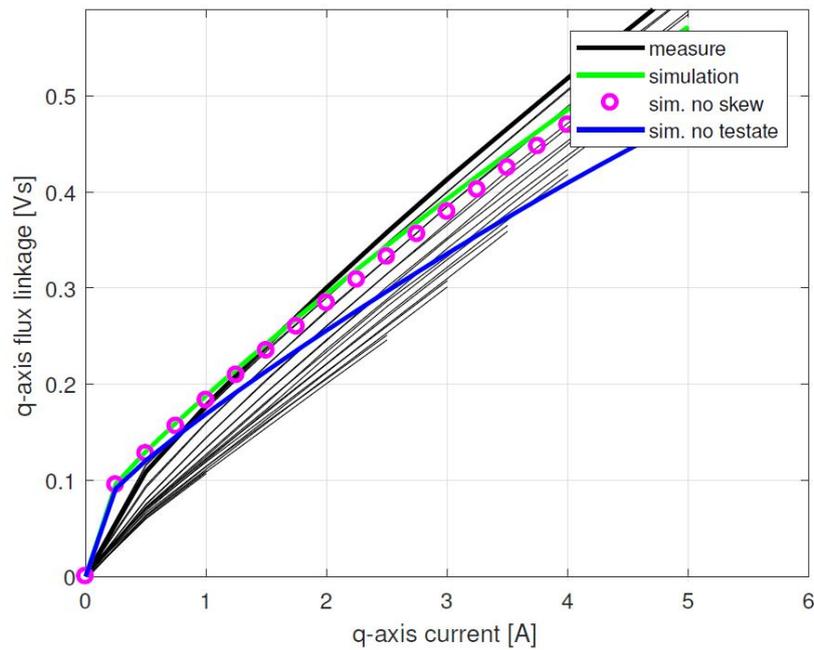


Figura 6.24: Curva di magnetizzazione per l'asse q, per il motore a riluttanza

## 6.4.4 Mapping

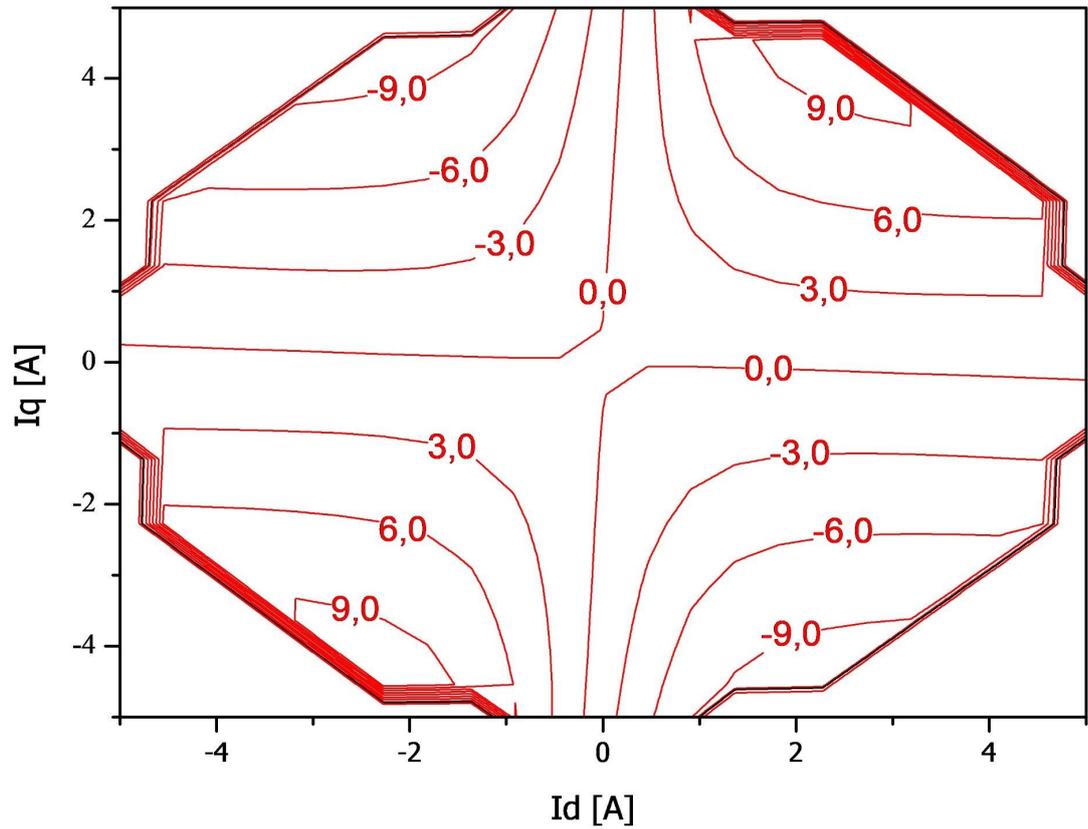


Figura 6.25: Iso-coppie per il motore a riluttanza

Si noti come questo grafico iso-torque, a differenza di quelli dei motori PMSR, mostri delle iperboli perfettamente centrate nell'origine e non deformate. Questo è chiaramente un effetto dato dalla presenza dei magneti permanenti. È ancora presente una leggera inclinazione verso sinistra dell'asse  $q$ , a riprova del fatto che sia un errore delle misurazioni.

## 6.5 Confronto misure e simulazioni

### 6.5.1 MTPA

#### MQIP-M260

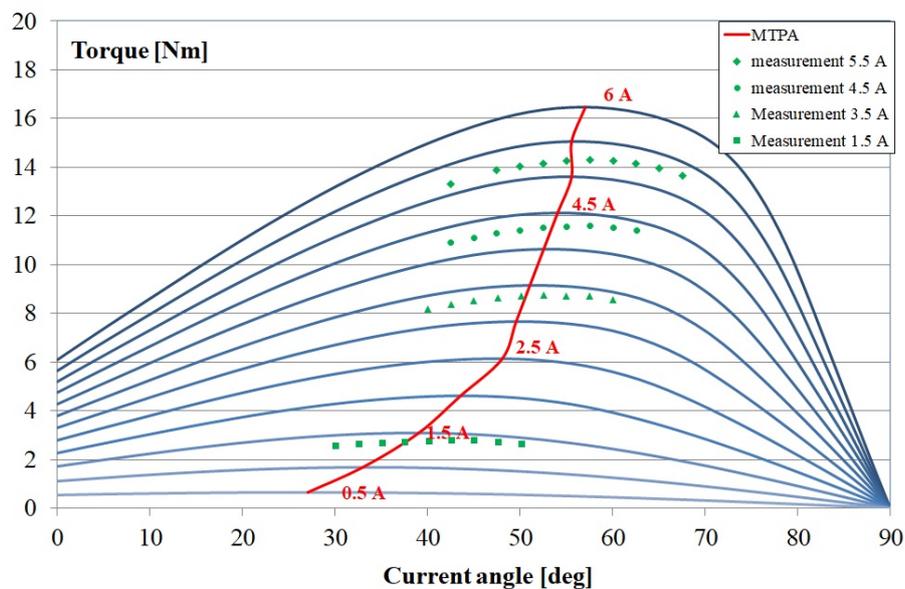


Figura 6.26: Confronto MTPA tra simulazione e misure, per il PMASR con MQIP-M260

6 A		5.5 A		4.5 A		3.5 A		2.5 A		1.5 A		0.5 A	
$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T
49.98	15.41	42.53	13.31	42.53	10.91	40.02	8.18	30.05	5.03	30.05	2.60	25.02	0.43
52.50	15.57	47.47	13.86	45.04	11.10	42.53	8.38	32.48	5.22	32.56	2.66	27.54	0.43
55.01	15.67	49.98	14.03	47.47	11.30	44.96	8.51	34.99	5.36	35.07	2.69	29.97	0.46
57.52	15.74	52.50	14.16	49.98	11.40	47.55	8.64	37.50	5.45	37.50	2.73	32.56	0.49
59.95	15.70	55.01	14.26	52.50	11.53	50.07	8.71	40.02	5.59	40.10	2.76	35.07	0.49
62.55	15.61	57.52	14.29	55.01	11.56	52.50	8.74	42.53	5.68	42.53	2.83	37.59	0.53
64.98	15.41	60.03	14.26	57.52	11.60	55.01	8.71	45.04	5.75	44.96	2.79	40.02	0.49
67.49	15.11	62.46	14.16	60.03	11.53	57.52	8.71	47.55	5.78	47.55	2.73	42.53	0.46
69.92	14.65	64.98	13.96	62.55	11.40	60.03	8.57	50.07	5.82	50.07	2.66	45.04	0.46
		67.49	13.67					52.50	5.75				
								55.01	5.68				

Tabella 6.1: Misure di coppia MQIP-M260

## FB23

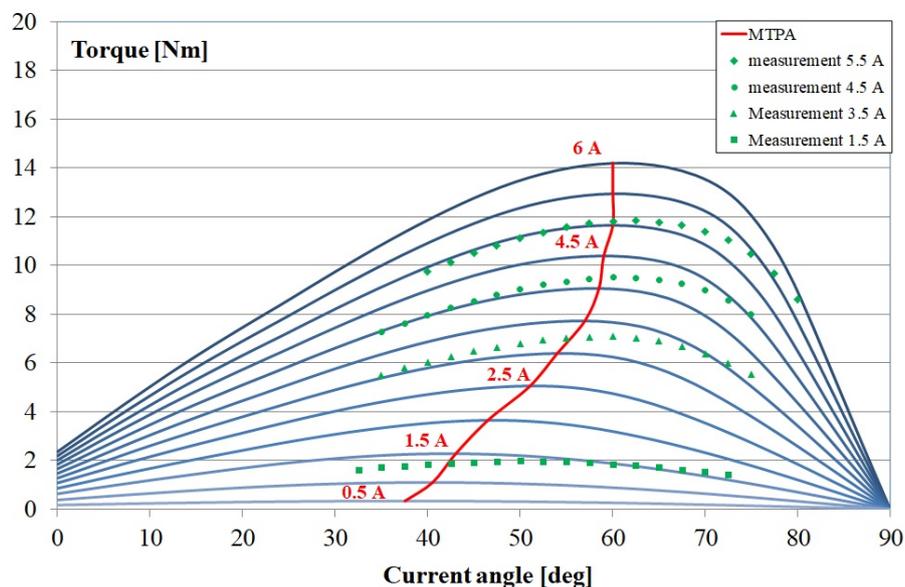


Figura 6.27: Confronto MTPA tra simulazione e misure, per il PMASR con FB23

6 A		5.5 A		4.5 A		3.5 A		2.5 A		1.5 A	
$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T
39.99	10.71	39.99	9.76	35.00	7.25	35.00	5.50	35.00	3.66	32.50	1.62
42.49	11.13	42.49	10.12	37.49	7.60	37.49	5.78	37.49	3.84	35.00	1.70
44.99	11.51	44.99	10.49	39.99	7.95	39.99	6.01	39.99	3.99	37.49	1.77
47.48	11.88	47.48	10.83	42.49	8.25	42.49	6.26	42.49	4.14	39.99	1.82
49.98	12.20	49.98	11.11	44.99	8.54	44.99	6.47	44.99	4.26	42.49	1.89
52.48	12.48	52.48	11.36	47.48	8.79	47.48	6.65	47.48	4.36	44.99	1.92
54.98	12.70	54.98	11.56	49.98	9.02	49.98	6.80	49.98	4.44	47.48	1.95
57.47	12.86	57.47	11.71	52.48	9.21	52.48	6.95	52.48	4.49	50.03	1.97
59.97	12.96	60.02	11.79	54.98	9.34	54.98	7.03	55.07	4.51	52.48	1.95
62.47	13.01	62.47	11.84	57.47	9.44	57.47	7.07	57.52	4.49	54.98	1.94
65.01	12.96	64.97	11.76	60.02	9.52	60.02	7.10	59.97	4.43	57.52	1.90
67.47	12.81	67.47	11.64	62.52	9.49	62.52	7.03	62.47	4.34	59.97	1.84
69.96	12.60	69.96	11.39	64.97	9.41	64.97	6.88	64.97	4.19	62.47	1.79
72.46	12.23	72.46	11.03	67.47	9.24	67.47	6.68	67.51	4.01	64.97	1.72
74.96	11.68	74.96	10.46	69.96	8.97	70.01	6.38	70.01	3.78	67.47	1.62
77.46	10.89	77.46	9.67	72.51	8.55	72.46	6.00	72.46	3.53	69.96	1.52
79.95	9.79	79.95	8.60	74.96	8.00	74.96	5.51	74.96	3.21	72.46	1.40

Tabella 6.2: Misure di coppia FB23

## CPPA6-10

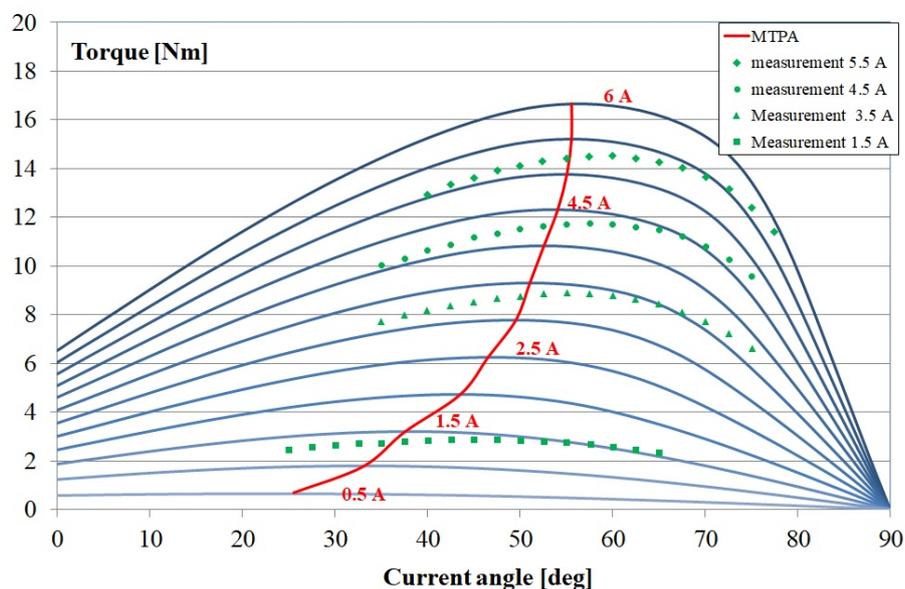


Figura 6.28: Confronto MTPA tra simulazione e misure, per il PMASR con CPPA6-10

6 A		5.5 A		4.5 A		3.5 A		2.5 A		1.5 A		0.5 A	
$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T
40.03	14.19	39.94	12.95	35.00	10.04	35.00	7.74	29.97	5.02	24.94	2.48	24.94	0.48
42.46	14.55	42.46	13.34	37.52	10.31	37.52	7.98	32.49	5.20	27.46	2.57	27.46	0.48
44.97	14.88	44.97	13.61	39.94	10.65	39.94	8.20	35.00	5.35	29.97	2.66	29.97	0.51
47.49	15.15	47.49	13.91	42.46	10.89	42.46	8.38	37.52	5.50	32.49	2.72	32.49	0.51
50.00	15.40	50.00	14.09	44.97	11.16	44.97	8.53	40.03	5.63	35.00	2.75	35.00	0.54
52.52	15.61	52.43	14.31	47.49	11.34	47.49	8.68	42.55	5.72	37.52	2.81	37.52	0.54
55.03	15.76	55.03	14.40	50.00	11.52	50.00	8.77	45.06	5.81	40.03	2.84	39.94	0.54
57.55	15.85	57.46	14.49	52.52	11.64	52.52	8.86	47.49	5.87	42.55	2.87	42.46	0.57
60.06	15.88	59.97	14.52	55.03	11.71	55.03	8.89	49.91	5.90	44.97	2.90	44.97	0.54
62.58	15.82	62.49	14.43	57.55	11.77	57.46	8.86	52.52	5.90	47.49	2.87	47.49	0.51
65.00	15.67	65.00	14.28	59.97	11.71	59.97	8.80	55.03	5.84	50.00	2.84	50.00	0.51
67.52	15.43	67.52	14.03	62.49	11.61	62.49	8.65	57.55	5.78	52.52	2.81	52.52	0.51
70.03	15.06	70.03	13.67	65.00	11.46	65.00	8.44	60.06	5.63	54.94	2.78	55.03	0.51
72.55	14.55	72.55	13.16	67.52	11.22	67.52	8.11	62.49	5.47	57.55	2.69	57.55	0.51
74.97	13.82	75.06	12.40	70.03	10.80	70.03	7.71	65.00	5.26	59.97	2.60	59.97	0.48
77.58	12.76	77.49	11.40	72.55	10.25	72.55	7.23	67.52	4.99	62.49	2.48	62.49	0.48
80.00	11.40	80.00	10.10	75.06	9.56	75.06	6.62	70.03	4.69	65.00	2.36	65.00	0.45

Tabella 6.3: Misure di coppia CPPA6-10

## Riluttanza

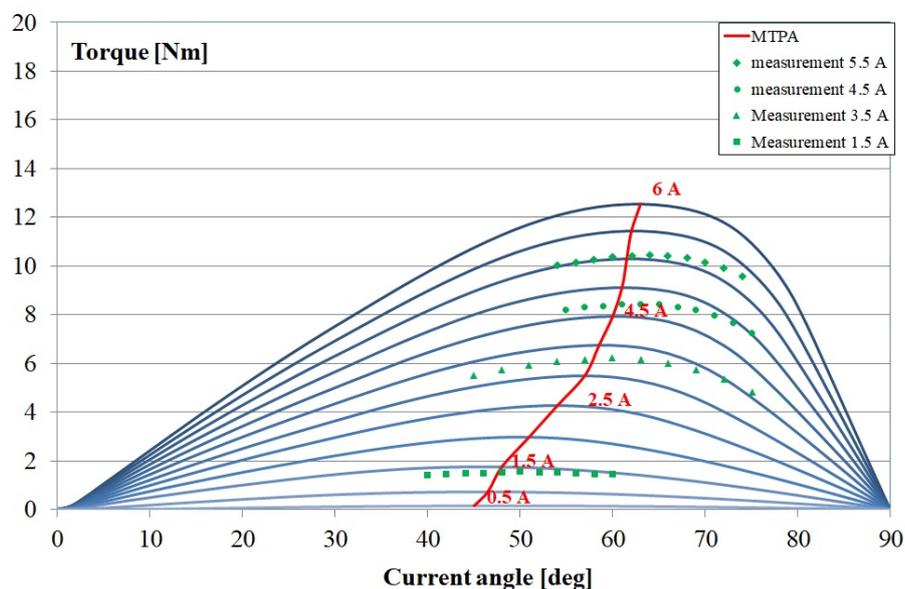


Figura 6.29: Confronto MTPA tra simulazione e misure, per il motore a riluttanza

5.5 A		5 A		4.5 A		3.5 A		2.5 A		1.5 A	
$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T	$\alpha_i$	T
54.04	10.02	60.00	9.40	54.94	8.22	44.98	5.51	44.98	3.63	39.92	1.44
56.00	10.15	61.96	9.43	56.98	8.32	48.00	5.74	47.02	3.71	41.96	1.46
57.96	10.28	64.00	9.45	58.94	8.37	50.94	5.95	48.90	3.78	44.00	1.52
60.00	10.38	65.96	9.40	60.98	8.42	53.96	6.08	50.94	3.86	45.96	1.52
62.04	10.43	68.00	9.30	63.02	8.45	56.98	6.15	53.06	3.86	48.00	1.57
64.00	10.46	69.96	9.14	64.98	8.42	59.92	6.23	54.94	3.89	49.96	1.59
65.96	10.41	72.00	8.94	67.02	8.32	63.02	6.15	56.98	3.86	52.00	1.54
68.00	10.33	74.04	8.58	68.98	8.19	65.96	6.03	59.02	3.84	53.96	1.54
69.96	10.15	76.00	8.11	71.02	7.98	68.98	5.74	60.98	3.78	56.00	1.52
72.00	9.92	78.04	7.49	72.98	7.68	72.00	5.36	62.94	3.68	57.96	1.49
74.04	9.58	80.00	6.75	75.02	7.26	75.02	4.81	64.98	3.55	59.92	1.46

Tabella 6.4: Misure di coppia motore a riluttanza

Nel valutare la coppia in funzione dell'angolo di corrente nei grafici qui sopra, è possibile notare come la simulazione sia, per ogni motore, più ottimistica delle misure. Il motore PMASR con magneti del tipo CPPA6-10 dimostra di avere buona vicinanza tra misure e simulazioni, soprattutto all'aumentare dell'angolo di corrente e in particolare intorno ai 70°. In corrispondenza del MTPA le misure e le simulazioni sono leggermente diverse.

## 6.5.2 Ripple di coppia

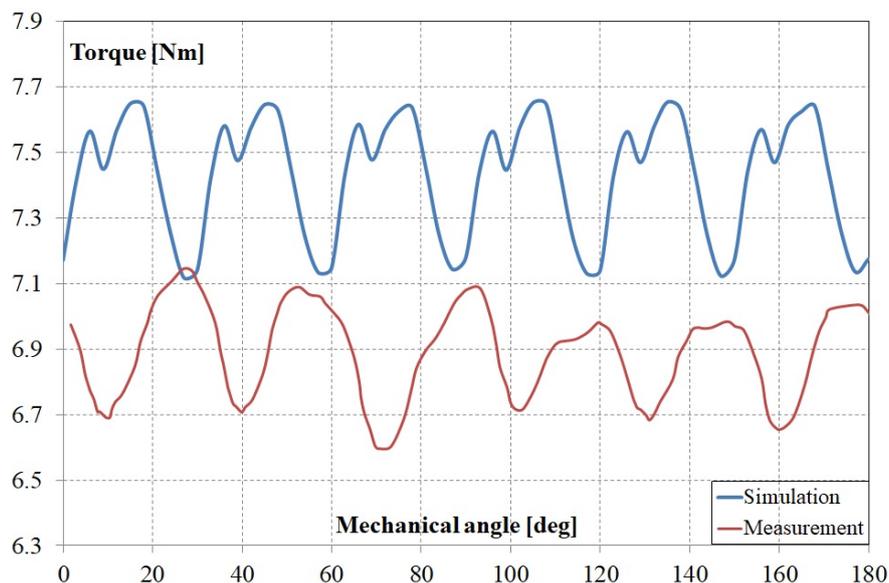


Figura 6.30: Confronto del ripple tra simulazione e misure, per il PMASR con MQIP-M260 a  $I=3A$

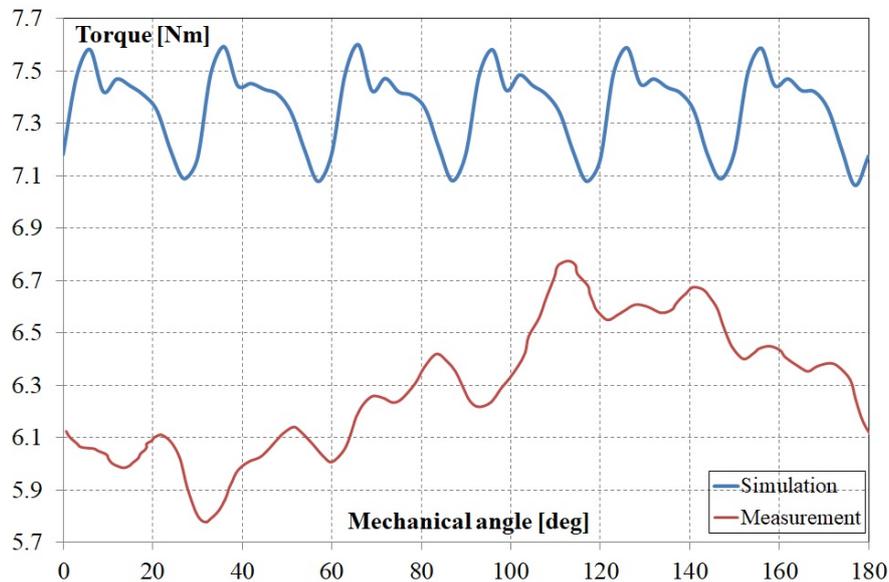


Figura 6.31: Confronto del ripple tra simulazione e misure, per il PMASR con FB23 a  $I=3A$

Per il PMASR con FB23 si può notare una grande differenza tra la simulazione e le misure. Quest'ultime sono anche affette da un andamento di seconda armonica. Ciò è

probabilmente dovuto a errori di misura oppure ad una magnetizzazione non perfetta.

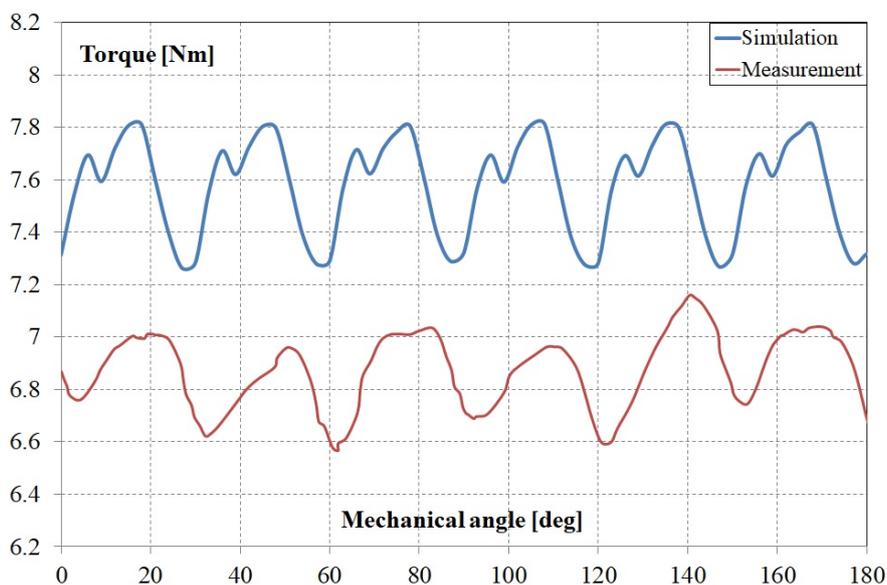


Figura 6.32: Confronto del ripple tra simulazione e misure, per il PMASR con CPPA6-10 a  $I=3A$

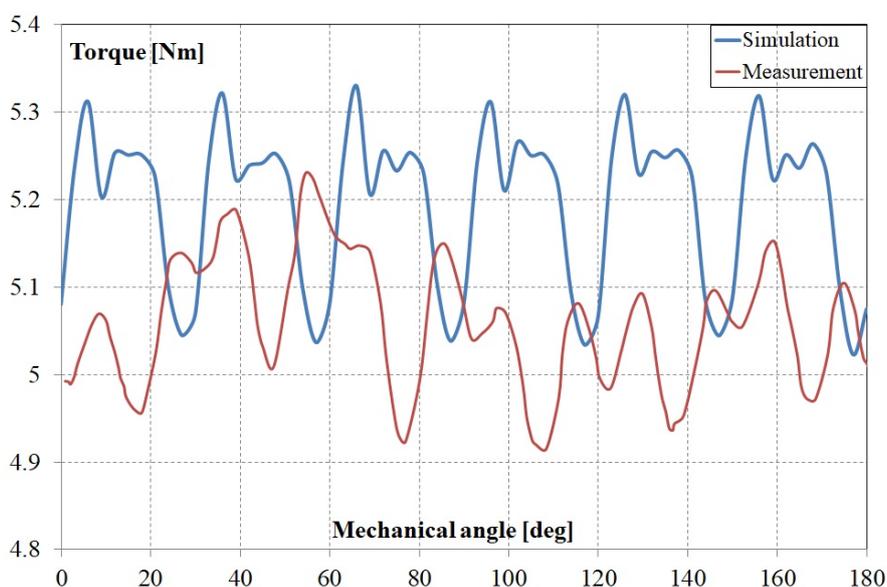


Figura 6.33: Confronto del ripple tra simulazione e misure, per il motore a riluttanza a  $I=3A$

Come si può vedere dal grafico 6.33, anche per questo motore la simulazione è pessimistica rispetto alle misure eseguite al banco prova, seppur meno di quanto non lo siano le simulazioni dei PMASR. Qui è possibile notare come il riluttanza abbia un valore del

ripple di coppia, picco-picco, pari a **0.25 Nm**, che è molto inferiore al valore dei motori PMASR.

### 6.5.3 Curve di magnetizzazione

MQIP-M260

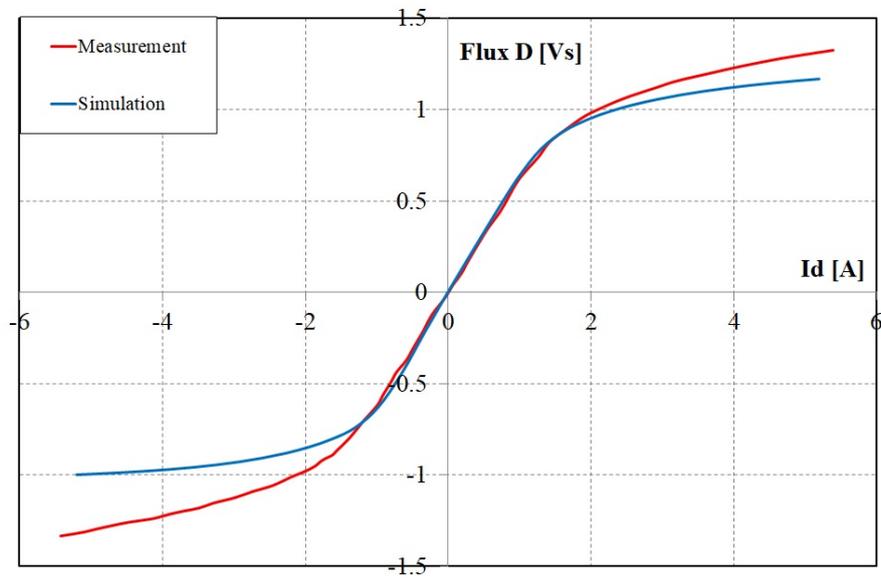


Figura 6.34: Confronto delle curve di magnetizzazione in asse d tra simulazione e misure, per il motore PMASR con MQIP

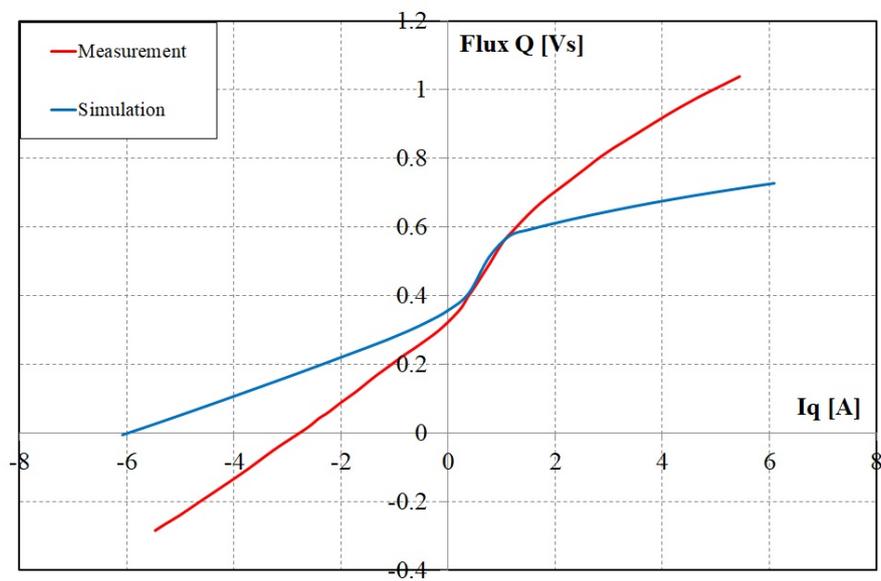


Figura 6.35: Confronto delle curve di magnetizzazione in asse q tra simulazione e misure, per il motore PMASR con MQIP

## FB23

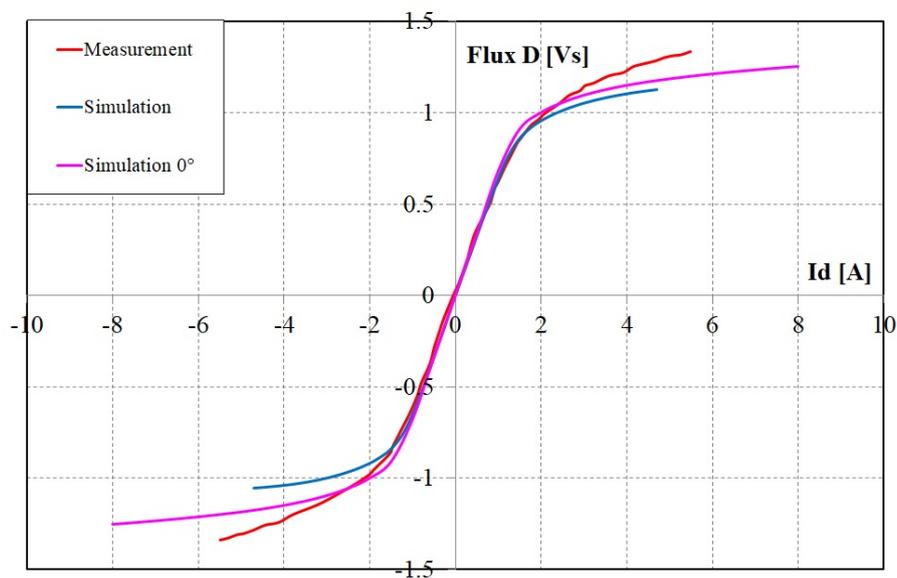


Figura 6.36: Confronto delle curve di magnetizzazione in asse d tra simulazione e misure, per il motore PMASR con FB23

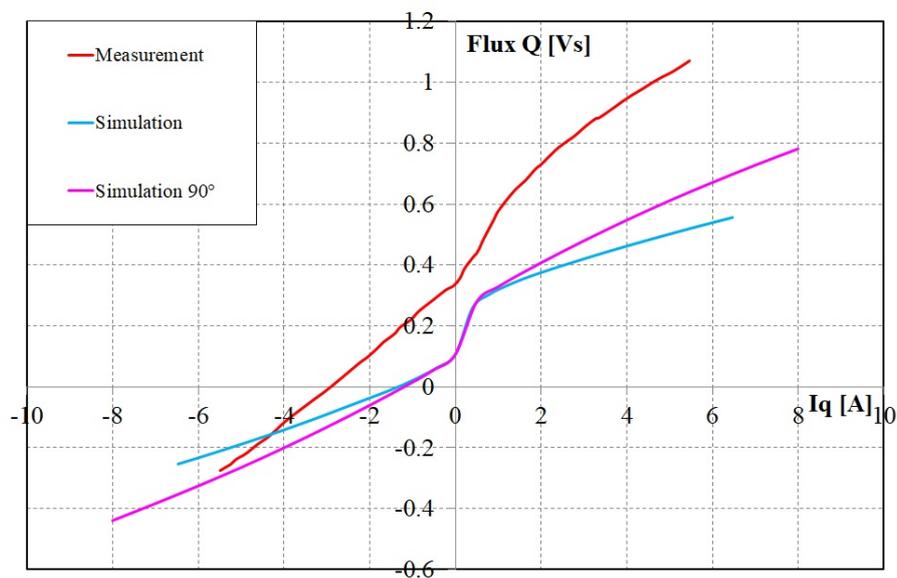


Figura 6.37: Confronto delle curve di magnetizzazione in asse q tra simulazione e misure, per il motore PMASR con MQIP

Per questo motore non si dispone di flussi misurati esatti. Vengono riportati comunque i flussi errati: si noti come in asse q ci sia una notevole differenza tra misura e simulazione.

## CPPA6-10

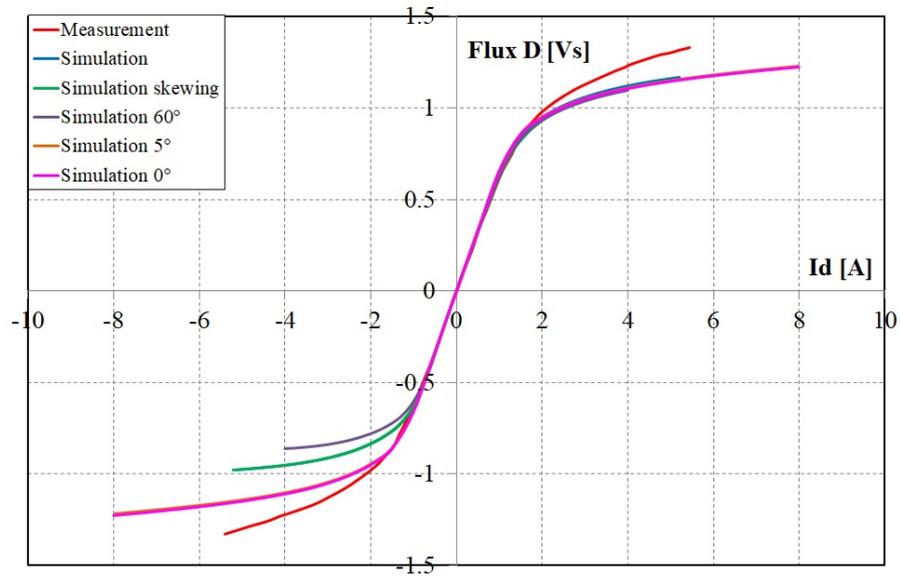


Figura 6.38: Confronto delle curve di magnetizzazione in asse d tra simulazione e misure, per il motore PMASR con CPPA6-10

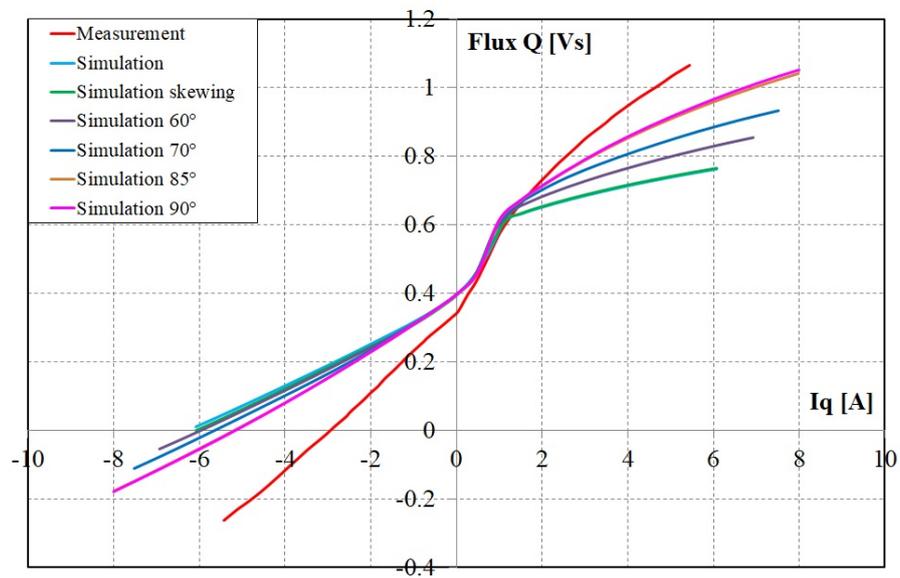


Figura 6.39: Confronto delle curve di magnetizzazione in asse q tra simulazione e misure, per il motore PMASR con CPPA6-10

## Riluttanza

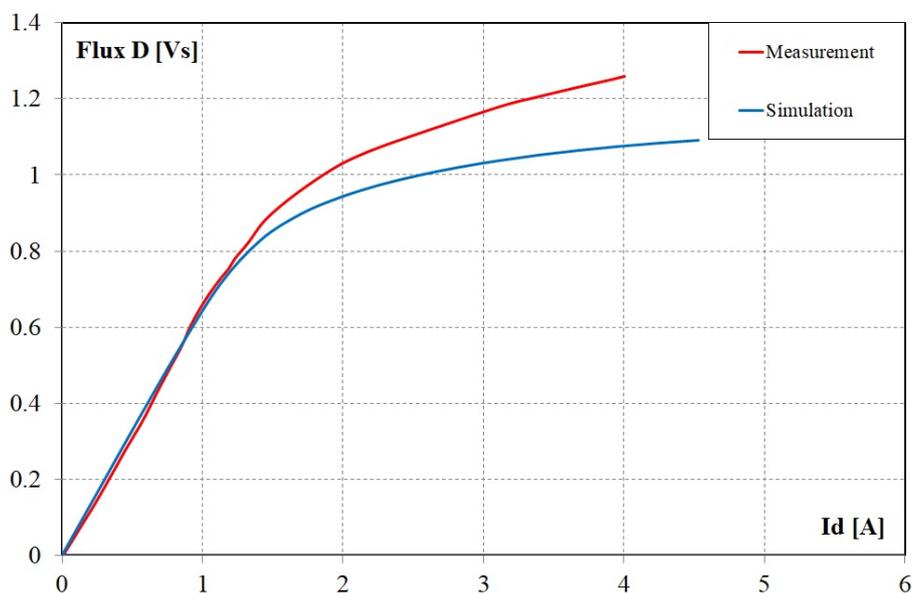


Figura 6.40: Confronto delle curve di magnetizzazione in asse d tra simulazione e misure, per il motore a riluttanza

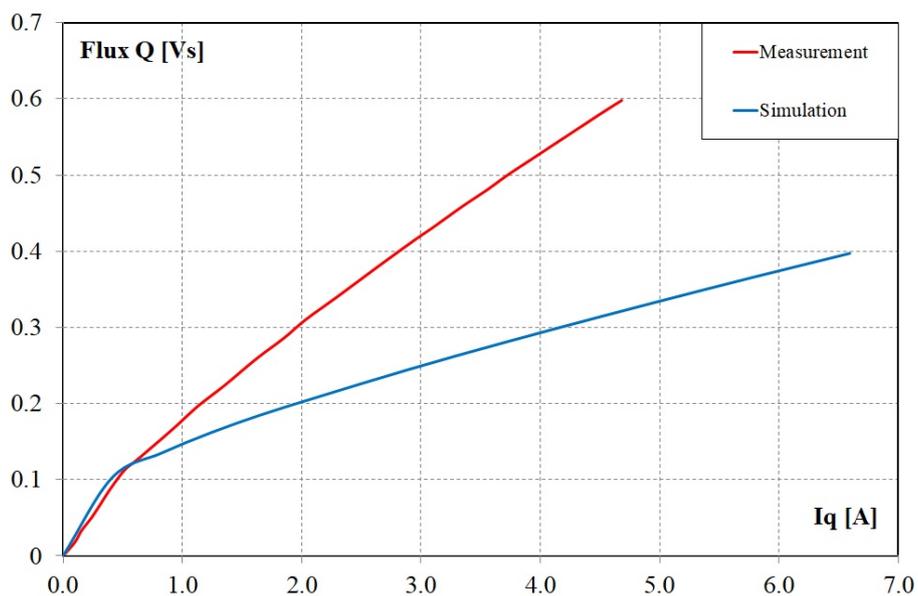


Figura 6.41: Confronto delle curve di magnetizzazione in asse q tra simulazione e misure, per il motore a riluttanza

I flussi simulati in asse d sono più simili alle misure di quanto non lo siano i flussi simulati in asse q. Probabilmente è un difetto dato dalla progettazione dei lamierini.

## 6.5.4 Mapping

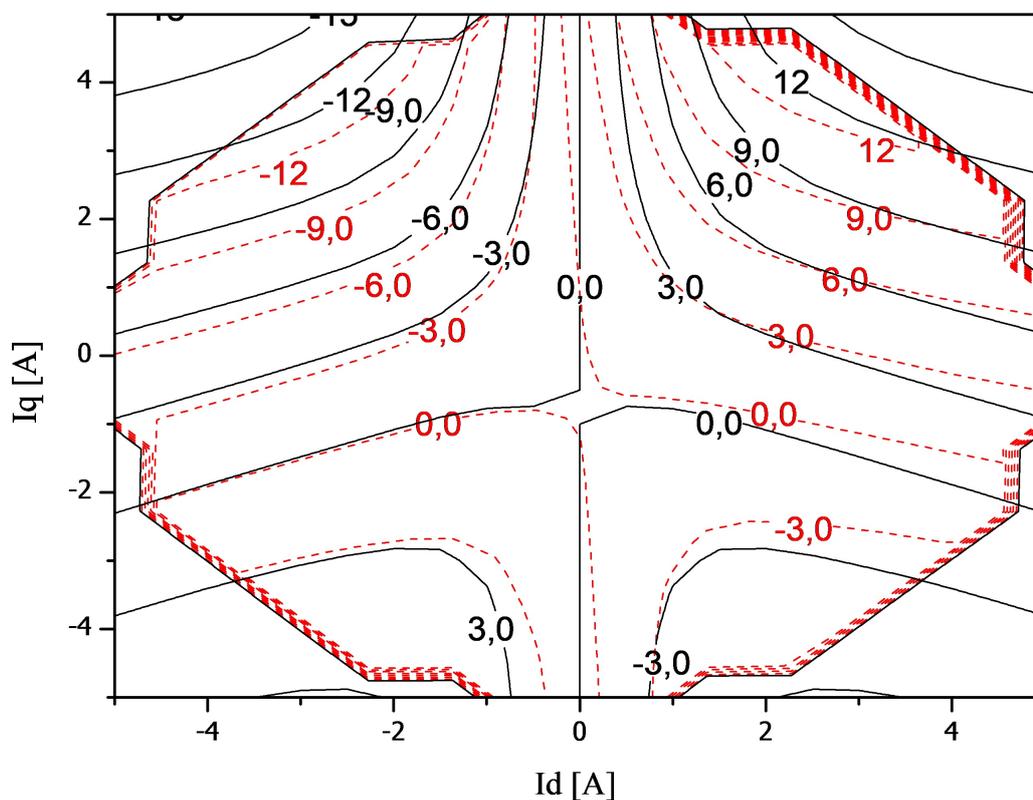


Figura 6.42: Confronto del mapping tra simulazione e misure, per il motore PMASR con MQIP-M260

Le misure mostrano una leggera inclinazione rispetto alle misure; questo può essere un problema dato dal controllo. Inoltre è possibile osservare quanto le mappe dei PMASR con MQIP-M260 e CPPA6-10 siano simili tra loro. Il mapping tratto dalle simulazioni e quello tratto dalle misure, per il rotore a riluttanza, si assomigliano molto più dei casi con magneti permanenti.

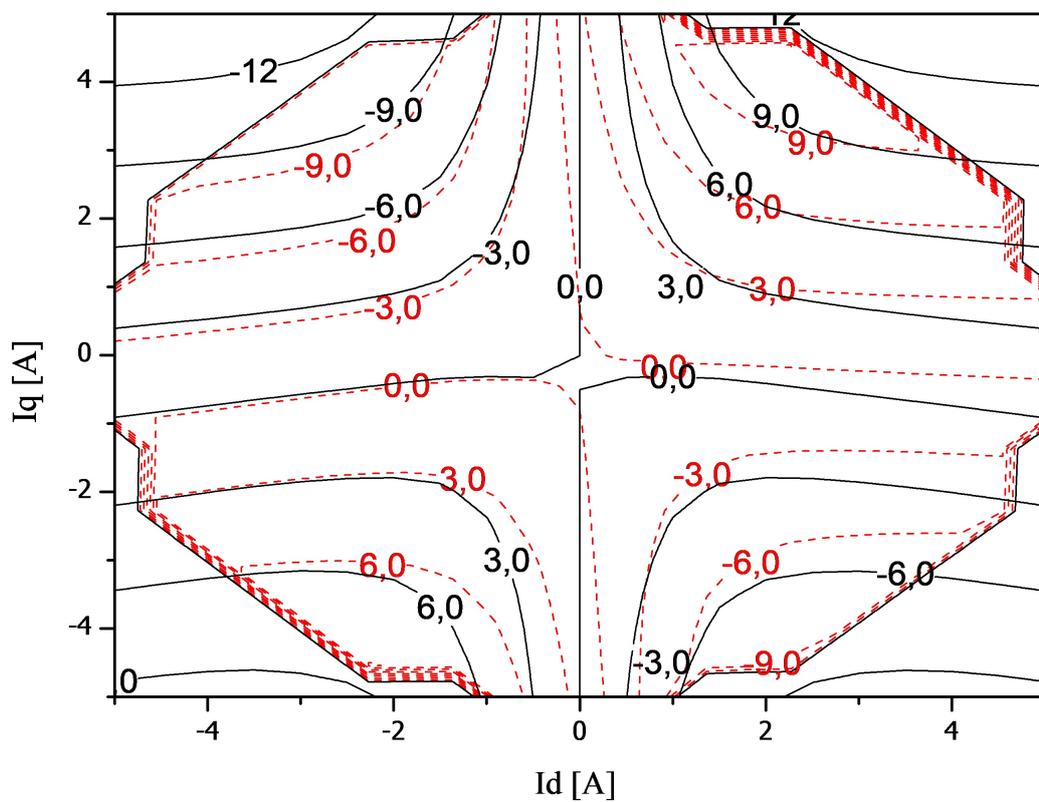


Figura 6.43: Confronto del mapping tra simulazione e misure, per il motore PMASR con FB23

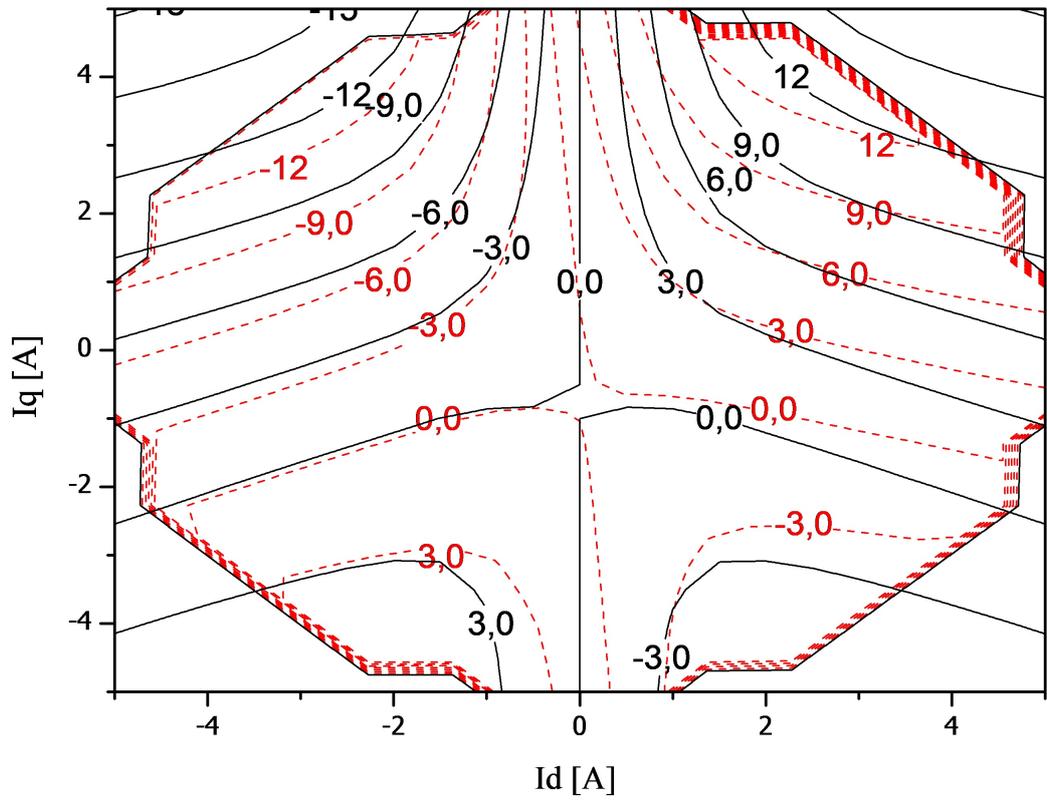


Figura 6.44: Confronto del mapping tra simulazione e misure, per il motore PMASR con CPPA6-10

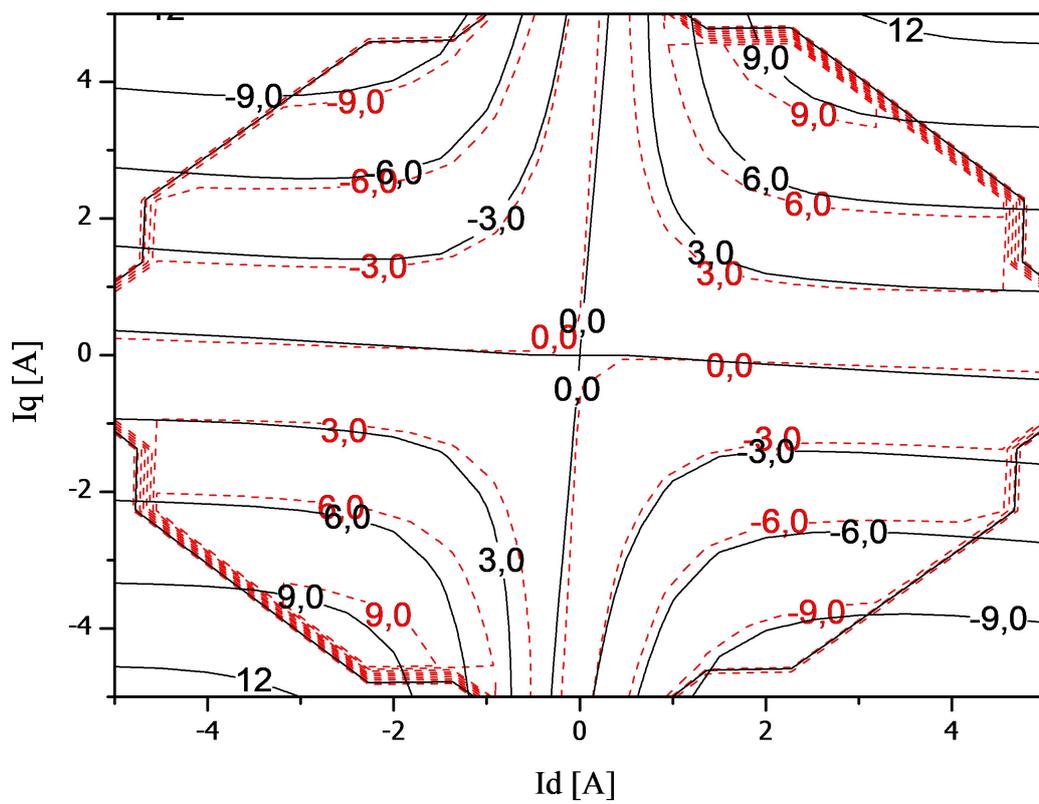


Figura 6.45: Confronto del mapping tra simulazione e misure, per il motore a riluttanza



# Capitolo 7

## Considerazioni finali

### 7.1 Commento sui risultati

Questo studio era volto alla realizzazione di plastomagneti da inserire all'interno delle barriere di flusso di un motore a riluttanza, tramite il processo dell'iniezione. La sfida è quindi quella di verificare se fosse possibile realizzare magneti di questo tipo che effettivamente dessero un vantaggio in termini di performance, rispetto al motore a riluttanza e un vantaggio in termini economici e tecnologici rispetto ai motori che utilizzano i classici magneti permanenti. Guardando i risultati delle simulazioni, ma soprattutto delle misurazioni al banco prova, è possibile affermare che ci sono effettivi miglioramenti, soprattutto riguardanti la coppia. La **coppia massima**, infatti, è migliorata fino al **30%** in più rispetto alla coppia massima del motore senza magneti permanenti. Un altro risultato atteso e confermato da simulazioni e misurazioni, è la differenza di prestazioni tra i motori dotati di magneti a base di ferrite e quelli con magneti a base di terre rare (NdFeB): la coppia massima fornita dai motori PMASR con MQIP-M260 e CPPA6-10 è maggiore di circa il **15%** rispetto alla coppia fornita dal motore PMASR con FB23. Si è potuto verificare come la presenza dei magneti innalzi il valore medio della cogging torque, rispetto al motore a riluttanza, nonostante la presenza dello step-skewing.

Un risultato inaspettato sono state le prestazioni del motore con i magneti CPPA6-10, cioè quelli realizzati completamente in laboratorio. Essi, ad esempio, hanno garantito al motore di avere una coppia massima leggermente superiore a quella del PMASR con MQIP-M260, cioè i magneti realizzati con un prodotto commerciale. Il problema è che realizzare i magneti CPPA6-10 ha richiesto più tempo e con le macchine disponibili nel laboratorio della sede di Alessandria del Politecnico di Torino il processo è stato abbastanza complicato e articolato.

Le misure magnetiche sui tre campioni realizzati, come mostrato nei capitoli [3.2.4](#), [3.3.4](#) e [3.4.3](#), hanno risultati leggermente peggiori dei dati riportati sui rispettivi datasheet, come riportato nella tabella [7.1](#).

Per il caso di CPPA6-10, non si disponeva della  $B_r$  finale nel datasheet, ma solo di quella della polvere magnetica che, ovviamente, è più elevata. Per cui si è confrontata con la  $B_r$  del datasheet di MQIP-M260 e risulta quella più vicina al valore atteso. Nonostante il NdFeB soffra di più l'aumento di temperatura rispetto alle ferriti, nella tabella [7.2](#) si nota come FB23 sia il magnete che, in percentuale, ha sofferto di più l'aumento di temperatura.

	<b>MQIP-M260</b>	<b>FB23</b>	<b>CPPA6-10</b>
<b>T<sub>amb</sub></b>	0.409 T	0.170 T	0.440 T
<b>100 °C</b>	0.365 T	0.146 T	0.400 T
<b>Datasheet</b>	0.521 T	0.308 T	0.820 T

Tabella 7.1:  $B_r$  per i tre magneti

	<b>MQIP-M260</b>	<b>FB23</b>	<b>CPPA6-10</b>
<b>T<sub>amb</sub> - 100 °C</b>	~ 11 %	~ 14 %	~ 9 %
<b>T<sub>amb</sub> - Datasheet</b>	21.5 %	~ 45 %	15.5 %

Tabella 7.2: Differenze delle  $B_r$  per i tre magneti

Quest'ultimo inoltre, a differenza di MQIP-M260 e CPPA6-10, rischia di smagnetizzarsi, come visto nel capitolo 4.2.6.

Per quanto riguarda il **fattore di potenza**, eseguendo una simulazione con la procedura `sim_single.m`, impostando per ogni motore la corrente nominale, pari a 3 Ampere e il relativo angolo a cui si ottiene la massima coppia, si ottiene il flusso in asse d e quello in asse q. Da qui è possibile calcolarsi lo sfasamento tra tensione e corrente, sapendo che il flusso è in ritardo di esattamente 90° rispetto alla corrente.

$$\varphi = 90^\circ + \arctan\left(\frac{\lambda_q}{\lambda_d}\right) - \alpha_i$$

E di conseguenza è sufficiente calcolarne il coseno.

Nella tabella 7.3 sono mostrati i valori dei fattori di potenza per i tre motori PMASR, per cui considerando che il fattore di potenza del motore a riluttanza è pari a **0.67**, è possibile affermare che l'inserimento dei magneti abbia apportato un effettivo beneficio.

Dal punto di vista tecnologico è più pratico realizzare magneti partendo da un prodotto commerciale già mescolato, ma dal punto di vista economico può non essere conveniente. Per un'azienda in possesso dei macchinari adeguati per il processo di stampaggio ad iniezione può convenire realizzare plastomagneti partendo da polvere magnetica e polimero separati, dato che è stato sperimentato come sia verosimile la realizzazione di prototipi dotati di caratteristiche migliori. Il lavoro in laboratorio, con i macchinari a disposizione, è stato migliorato di volta in volta empiricamente; inoltre sono stati eseguiti relativamente pochi campioni per ogni tipo di prodotto, quindi ha poco senso, con l'esperienza maturata, giudicare la bontà e la fattibilità di una produzione in serie di un determinato campione.

	<b>MQIP-M260</b>	<b>FB23</b>	<b>CPPA6-10</b>
$\cos\varphi$	0.88	0.77	0.89
<b>Miglioramento</b>	+ ~ 31%	+ ~ 14%	+ ~ 33%

Tabella 7.3: Fattori di potenza per i tre motori PMASR

## 7.2 Problematiche riscontrate

### Dal punto di vista tecnologico

Proseguendo il discorso del capitolo 7.1, è possibile affermare che una delle prime problematiche affrontate è stata la difficoltà nel trovare un metodo che desse campioni uniformi e omogenei. Prima di trovare campioni soddisfacenti sono stati impiegati alcuni giorni, con relativo spreco di materiale (anche se, in alcuni casi, è tornato utile ai fini di prove di fresatura e misure magnetiche).

Un altro problema è quello dell'essiccazione: come già spiegato in precedenza il nylon è un materiale plastico igroscopico, cioè tende ad assorbire l'acqua. In un ambiente naturalmente umido come quello di Alessandria, non ha dato buoni risultati utilizzare prodotti essiccati 5/6 ore prima. Mentre invece i prodotti appena rimossi dall'essiccatore garantivano campioni migliori.

### Dal punto di vista magnetico

I magneti in FB23 (ferrite) non sono stati magnetizzati correttamente. Osservando la direzione del campo si vede come essa non sia perfettamente perpendicolare alla superficie frontale dei magneti. Questo può essere dovuto ad uno spostamento dei magneti all'interno del magnetizzatore, oppure ad un orientamento dei grani del materiale, involontario.

### Dal punto di vista meccanico

La procedura che consiste nel fresare i magneti da una forma grezza, limarli a mano e di conseguenza inserirli nelle barriere di flusso, dà origine ad alcune irregolarità nella forma, che possono essere abbondanti rispetto alla forma corretta, oppure carenti. Nel primo caso si crea una problematica di interferenza meccanica: si fa fatica a far entrare il magnete all'interno della barriera di flusso e forzandolo ad entrare è possibile che si creino fratture o crepe. Nel secondo caso si possono formare, nelle barriere di flusso, delle aree in cui c'è traferro. Entrambi i fattori portano leggeri svantaggi alle prestazioni della macchina, ma sono effetti trascurabili.

### 7.3 Sviluppi futuri

Prossimamente la ricerca sui plastomagnetici farà passi in avanti per quanto riguarda l'iniezione in uno stampo che abbia la forma dovuta. Si faranno studi sulla fattibilità del cosiddetto co-stampaggio, che consiste in una iniezione direttamente all'interno del rotore, con l'obiettivo di velocizzare notevolmente i processi industriali, eliminando eventuali problematiche di tolleranza meccanica. Sarebbe interessante anche uno studio sui materiali plastomagnetici flessibili, che potrebbero essere utili anche al di fuori dell'ambito delle macchine elettriche. Infine, rimanendo in tema con questa tesi, sarebbe fondamentale una ricerca riguardante la possibilità di sovraccaricare queste macchine senza incorrere nel pericolo della smagnetizzazione dei magneti; ciò potrebbe risultare interessante soprattutto in ambito automotive.

# Bibliografia

- [1] Cavagnino, A., *Appunti delle lezioni del corso di Macchine Elettriche*, Politecnico di Torino, 2005.
- [2] Guglielmi, P., Pastorelli, M., Carrer, A., Beato, A., D'Antonio, D., Fagnano, L., *An IPM-PMASR motor for home appliance washing machines*, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 2608-2613, 2013.
- [3] Pastorelli, M., *Appunti del corso di Azionamenti Elettrici*, Politecnico di Torino, 2017.
- [4] Pellegrino, G., Jahns, T.M., Bianchi, N., Soong, W.L., Cupertino, F., *The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors*, Springer, 2016.
- [5] Orlova, S., Vezzini, A., Pugachov, V., *Analysis of parameters for optimal design of Synchronous Reluctance Motor*, 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, 2015.
- [6] Ormerod, J., Constantinides, S., *Bonded permanent magnets: Current status and future opportunities*, Journal of Applied Physics, 1997
- [7] Bianchi, N., Babetto, C., *Finite Element Rapid Analysis Lab*, University of Padova, 2017.