

POLITECNICO DI TORINO
Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica

Tesi di Laurea Magistrale

PROGETTAZIONE DI MOTORI ELETTRICI CON SOFTWARE OPEN-SOURCE



Relatore:
Prof. Gianmario Luigi PELLEGRINO

Candidato:
Walter VENTURA

Correlatore:
Ing. Simone FERRARI

16 Ottobre 2017

Sommario

1	Introduzione	4
1.1	Obiettivo della tesi	4
1.2	Il motore sincrono a riluttanza assistito	4
1.3	Software per la progettazione: SyR-e	7
2	Progetto del motore PM-SyR in SyR-e	10
2.1	Descrizione di SyR-e	10
2.1.1.	Finestra Main Data	10
2.1.2.	Finestra Stator and Rotor Geometry	11
2.1.3.	Finestra Other Options	13
2.1.4.	Finestra Windings	15
2.1.5.	Finestra Materials	16
2.1.6.	Finestra Optimization	17
2.1.7.	Post Processing	17
2.2	Procedura di progettazione del motore PM-SyR	19
2.3	Progetto del motore a riluttanza di riferimento	25
2.4	Progetto dei magneti fittizi	32
2.5	Passaggio da magneti fittizi a magneti reali	36
2.6	Post processing della macchina	38
2.7	Processo di ottimizzazione	40
3	Automatizzazione del progetto dei magneti	41
3.1	Descrizione del problema	41
3.2	Modifiche implementate in SyR-e	41
3.3	Identificazione dei punti per il tracciamento ed il calcolo delle aree	43
3.4	Compatibilità della soluzione con il codice preesistente.	45
3.5	Modifica della GUI.	48
3.6	Esempio: passaggio da magneti fittizi a magneti reali equivalenti	50
3.6.1.	Ulteriori verifiche: adozione di magneti diversi nella stessa macchina	53
3.7	Estendibilità del metodo ad altre geometrie di barriera	56
4	Risultati	58
4.1	Motore a riluttanza RAW Power e prestazioni di riferimento	58
4.2	Progetto della macchina SyR	62
4.3	Versione 1: magneti in ferrite	68
4.4	Versione 2: magneti in neodimio	70
4.5	Confronto delle prestazioni e del limite di sovraccarico	72

5	Conclusioni	78
6	Bibliografia.....	79

1 Introduzione

1.1 Obiettivo della tesi

L'obiettivo della tesi è di sviluppare una procedura di progettazione di motori sincroni a riluttanza assistiti da magneti permanenti (motori PM-SyR), nell'ambiente di progettazione SyR-e.

SyR-e è un software scritto in Matlab per la progettazione di motori sincroni, disponibile online in forma open-source, nato da una collaborazione tra il Politecnico di Torino ed il Politecnico di Bari.

In particolare, la tesi si occupa di due aspetti della progettazione della macchina: la progettazione dei magneti permanenti per il rifasamento dei motori a riluttanza e la formalizzazione di una procedura che includa tutte le fasi di progetto, dal dimensionamento preliminare alla validazione delle prestazioni con il metodo degli elementi finiti (FEM).

La tesi è organizzata come segue: ad una prima parte di contenuti generali sul motore a riluttanza segue l'analisi del programma e delle modifiche apportate al codice Matlab. Verrà infine eseguito il progetto di un motore di esempio, prendendo come riferimento le specifiche di due motori RAW Power S.r.l., uno SyR senza magneti di cui è disponibile un prototipo, ed uno PM-SyR di cui si conoscono le prestazioni a calcolo. Le prestazioni della macchina progettata con i nuovi strumenti sviluppati della tesi, calcolate con il FEMM, verranno confrontate con i dati sperimentali e simulati dei motori esistenti.

1.2 Il motore sincrono a riluttanza assistito

Il motore sincrono a riluttanza, indicato con l'acronimo "SyR" da Synchronous Reluctance, è una tipologia di motore dove la produzione di coppia deriva dall'anisotropia magnetica del rotore.

Tale anisotropia viene ottenuta mediante la realizzazione di barriere di flusso rotoriche, che possono assumere diversa geometria. Le barriere di flusso creano dei percorsi preferenziali per il flusso di induzione magnetica attraverso il rotore, denominati guide di flusso.

Al di fuori delle direzioni preferenziali, il flusso tende ad incontrare una elevata riluttanza, da cui l'appellativo di coppia di riluttanza e motore a riluttanza.

In Figura 1 viene riportata a titolo d'esempio la sezione di un lamierino rotorico con barriere di flusso a geometria circolare, per evidenziare quanto detto.

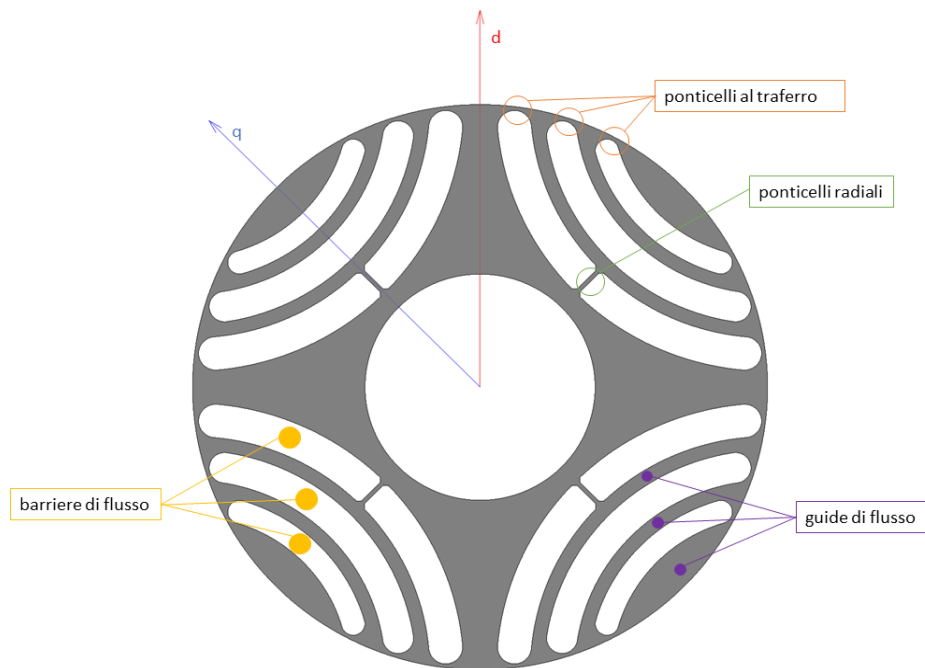


Figura 1-Sezione di lamierino rotorico a geometria circolare

L'assenza di magneti ed avvolgimenti sul rotore si traduce in semplicità costruttiva e riduzione del costo di produzione, ma può presentare delle limitazioni in termini di coppia specifica e fattore di potenza (Power Factor), che ha effetto sulla deflussabilità della macchina.

Nelle applicazioni che richiedono un intervallo di velocità a potenza costante è conveniente passare ad una soluzione con magneti permanenti all'interno delle barriere di flusso, chiamata motore sincrono a riluttanza assistito, o motore "PM-SyR", da Permanent Magnet-assisted SyR motor, di cui si riporta una sezione in Figura 2.

I rettangoli verdi sono magneti permanenti di NdFeB, che riempiono una porzione limitata dell'aria delle barriere di flusso.

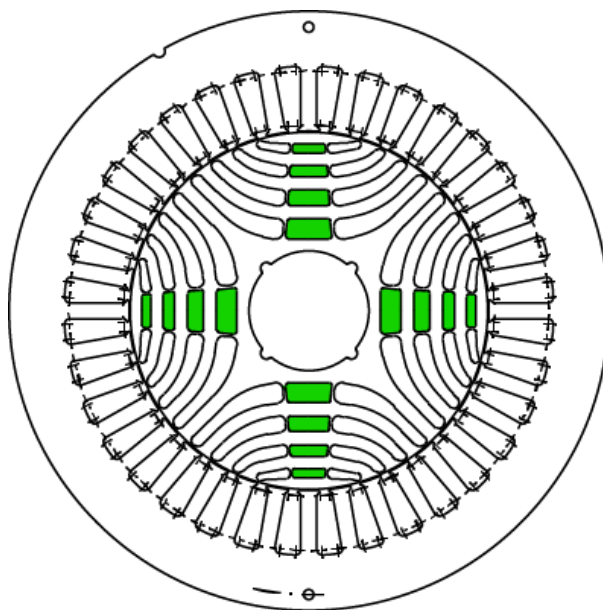


Figura 2-Sezione PM-SyR

L'inserzione dei magneti permanenti aumenta la coppia a parità di corrente, l'efficienza a parità di coppia di carico e, soprattutto, aumenta significativamente il campo di velocità a potenza costante, come si vede in Figura 3. Questo a fronte di un contenuto aumento dei costi, non solo rispetto al motore SyR di partenza, ma anche rispetto ad un motore ad induzione di pari taglia.

Il progetto dei magneti determina la caratteristica potenza – velocità della macchina, ed è il tema centrale della tesi.

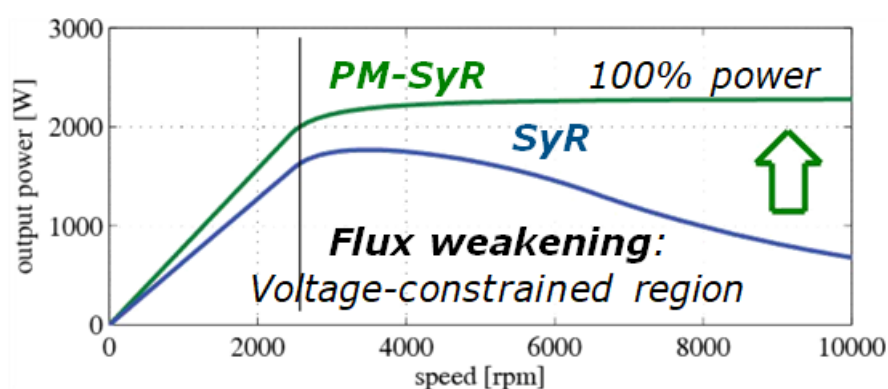


Figura 3-Curva potenza-velocità per motore SyR e PM-SyR

1.3 Software per la progettazione: SyR-e

SyR-e è uno strumento di progettazione open-source per motori sincroni a riluttanza e sincroni a magneti permanenti scritto in Matlab, facente uso del software gratuito FEMM per l'analisi FEM magnetica.

Il software è compatibile anche con GNU Octave, che non consente però di usufruire, a differenza di Matlab, della GUI e della funzione di parfor (gestione in parallelo dei processi).

SyR-e è scaricabile all'indirizzo <https://sourceforge.net/projects/syr-e/>.

FEMM è scaricabile all'indirizzo <https://www.femm.info/wiki/Download>.

SyR-e ha una GUI (Graphical User Interface) sviluppata in ambiente Matlab, rappresentata in Figura 4.

Tramite la GUI è possibile agire con modifiche a livello geometrico, oltre che su varie opzioni di tipo termico, elettrico, magnetico e meccanico del motore.

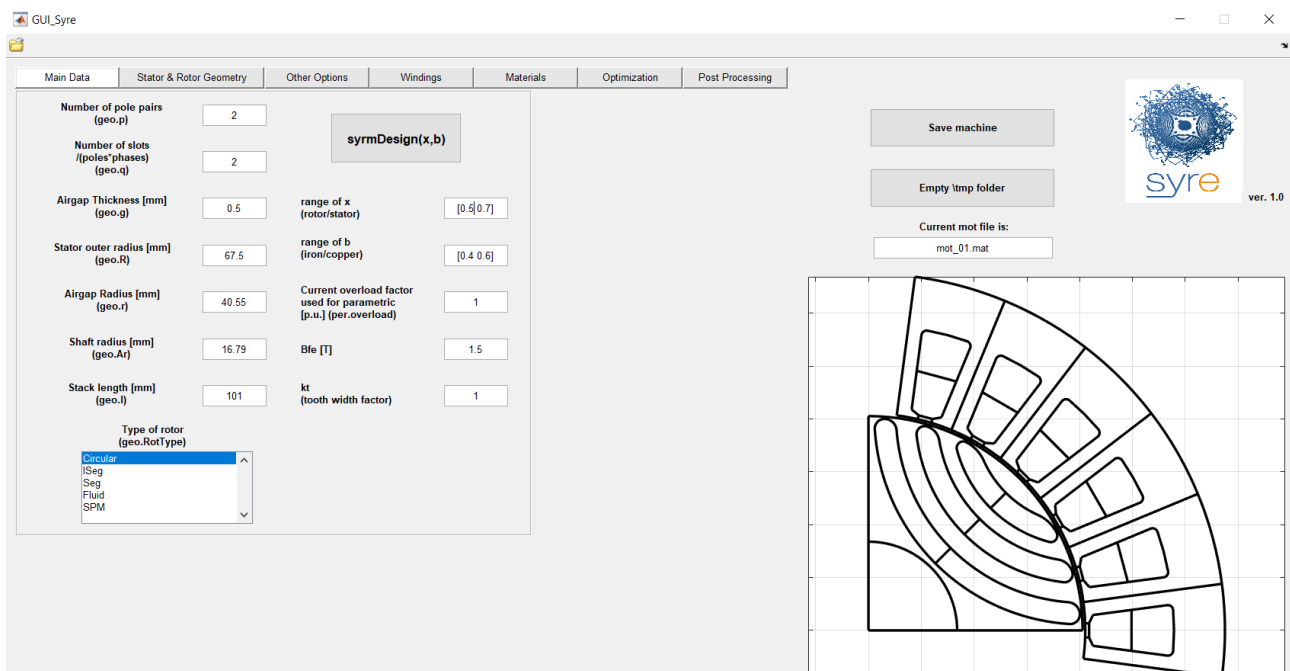


Figura 4-Graphical User Interface (GUI) di SyR-e

A partire da essa, è possibile salvare il modello della macchina progettata e farne le simulazioni magnetiche con FEMM (Figura 5).

Il 'post processing' è la funzione che provvede ad eseguire le simulazioni e fornirne i risultati; questi consistono nelle curve magnetiche espresse in assi d e q, in funzione delle omonime correnti, oltre che negli andamenti 3D di coppia e ripple associato.

È inoltre possibile operare un'analisi di funzionamento a singolo punto di lavoro della macchina, ottenendo gli andamenti sui 360° dei flussi in assi d e q, della coppia e del fattore di potenza (IPF).

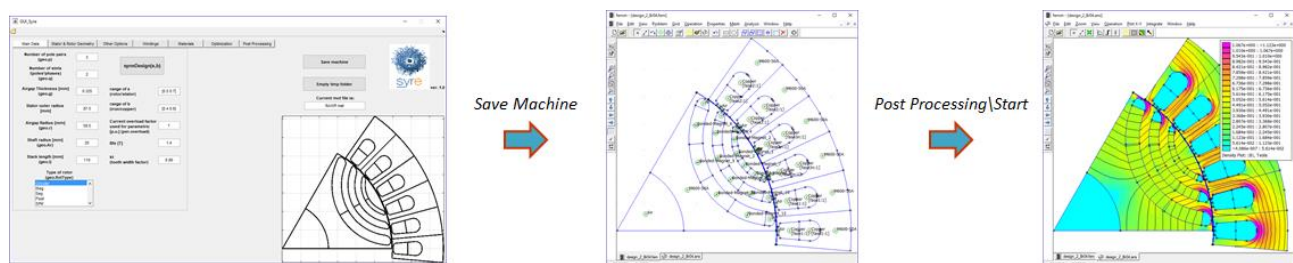


Figura 5- Processo di salvataggio e simulazione del motore

Le caratteristiche salienti del programma sono diverse:

- ✓ Possibilità di dimensionare la macchina SyR sulla base della funzione 'syrmDesign'
- ✓ Stima della temperatura d'avvolgimento e dimensionamento dei ponticelli radiali per stress centrifugo
- ✓ Possibilità di esportare i modelli verso ambienti CAD in formato .dxf (AutoCAD, Infolytica).
- ✓ Ottimizzazione del progetto basata su una analisi MODE
- ✓ Inclusione di script per la manipolazione offline dei risultati FEA

L'ottimizzazione della macchina avviene in presenza di opportuni target di coppia e/o ripple associato, a partire dalla definizione di vincoli sulle grandezze geometriche e/o elettriche.

L'analisi è multi-obiettivo, con una logica di esecuzione rappresentata in Figura 6.

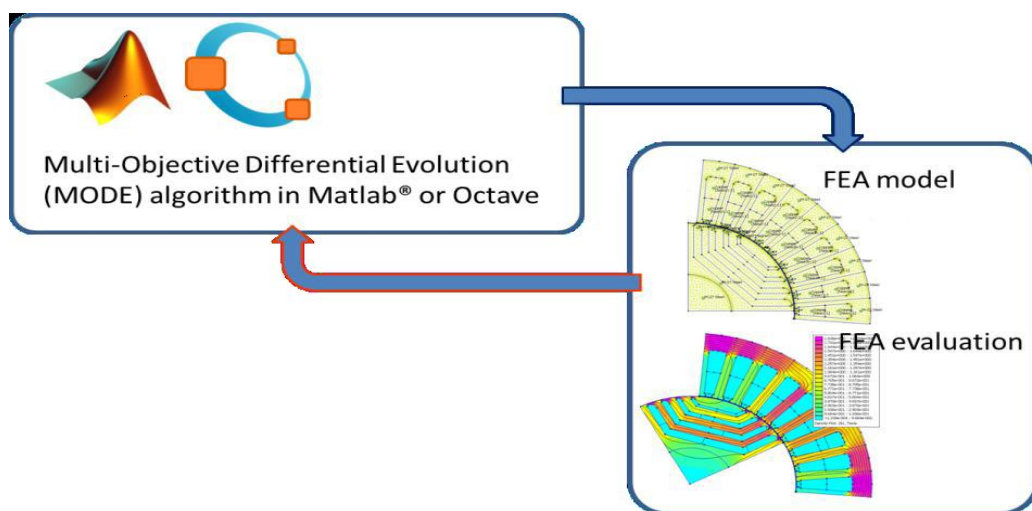


Figura 6-Analisi di ottimizzazione multi-obiettivo

2 Progetto del motore PM-SyR in SyR-e

2.1 Descrizione di SyR-e

Il lavoro di tesi prende come riferimento la revisione 301 di SyR-e.

L'interfaccia grafica del software punta un caso di default chiamato 'mot_01'.

Ciascun motore progettato in SyR-e è descritto da due files con lo stesso nome e diversa estensione: il primo contiene i dati del motore in formato Matlab (in questo caso 'mot_01.mat'), l'altro contiene il modello FEMM del motore ('mot_01.fem' per quello di default).

La GUI è composta di sette schermate.

2.1.1. Finestra Main Data

'Main Data' contiene dati generali quali le principali dimensioni, il tipo di motore ed il pannello di controllo dello script di dimensionamento preliminare `syrmDesign` (Figura 7).

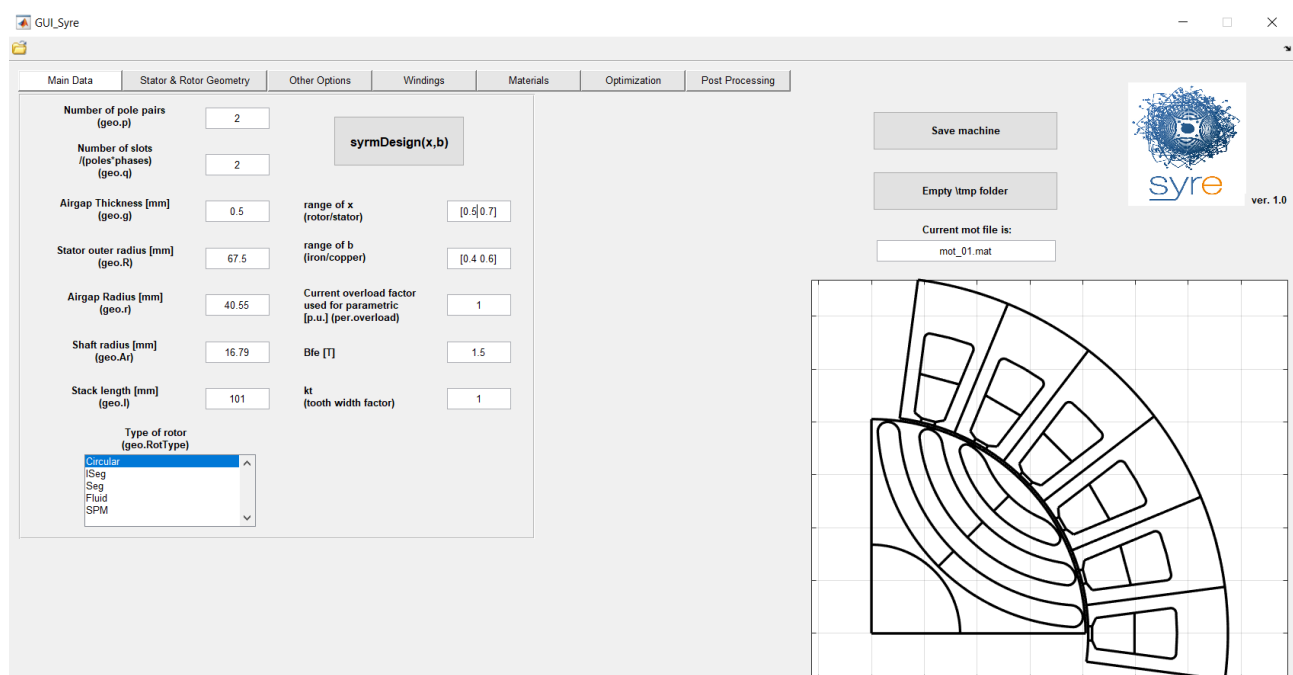


Figura 7-Schermata principale SyR-e

In essa è possibile selezionare il tipo di rotore desiderato, sia esso destinato ad un motore SyR o ad un SPM. Focalizzandosi sui sincroni a riluttanza, la Figura 8 riporta in dettaglio le geometrie di barriera disponibili.

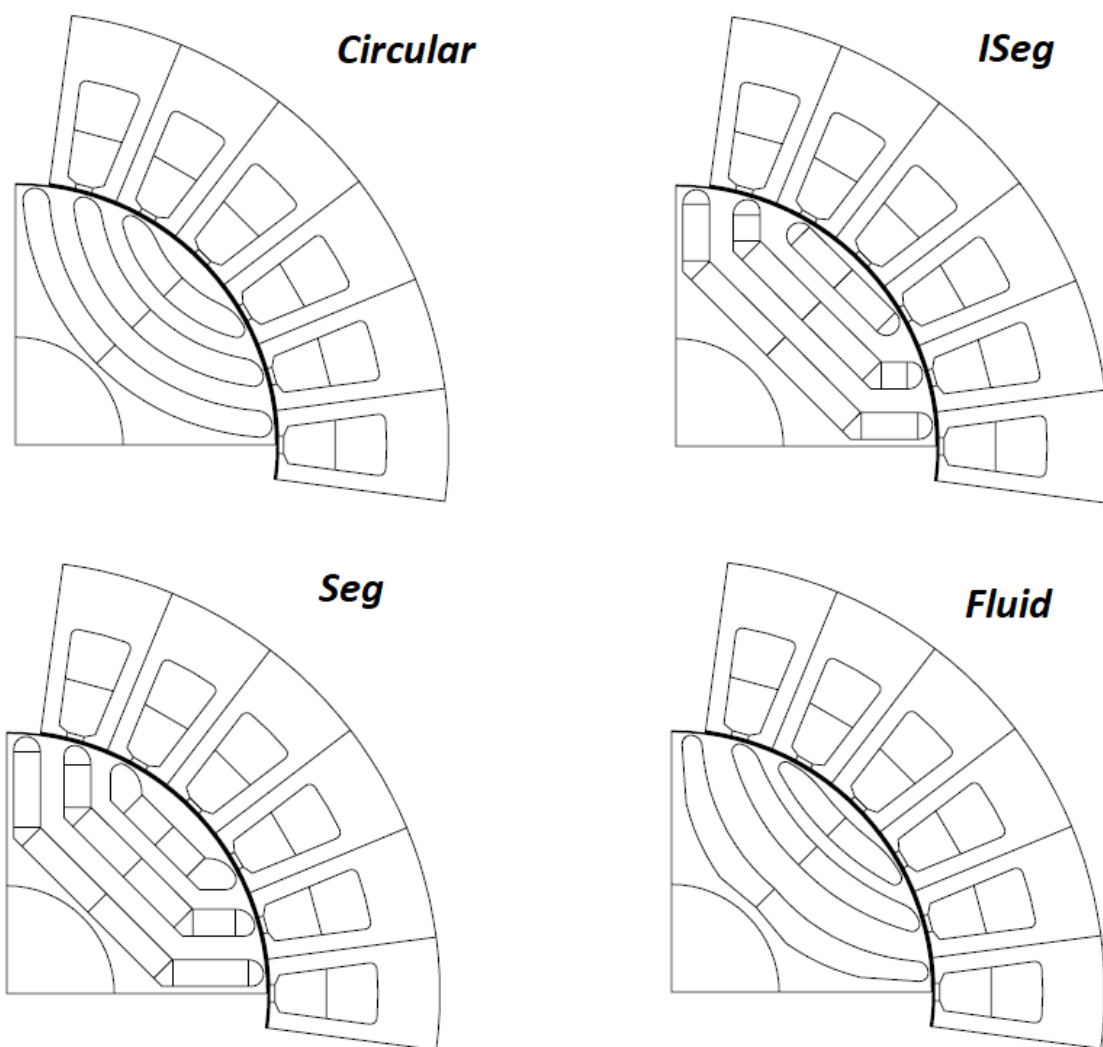


Figura 7-Geometrie di barriera selezionabili dalla lista

2.1.2. Finestra Stator and Rotor Geometry

La finestra 'Stator and Rotor Geometry' è dedicata ad una definizione meno generale delle geometrie di cava, di dente e di barriera, con parametri statorici e rotorici suddivisi rispettivamente su due colonne (vedi Figura 8).

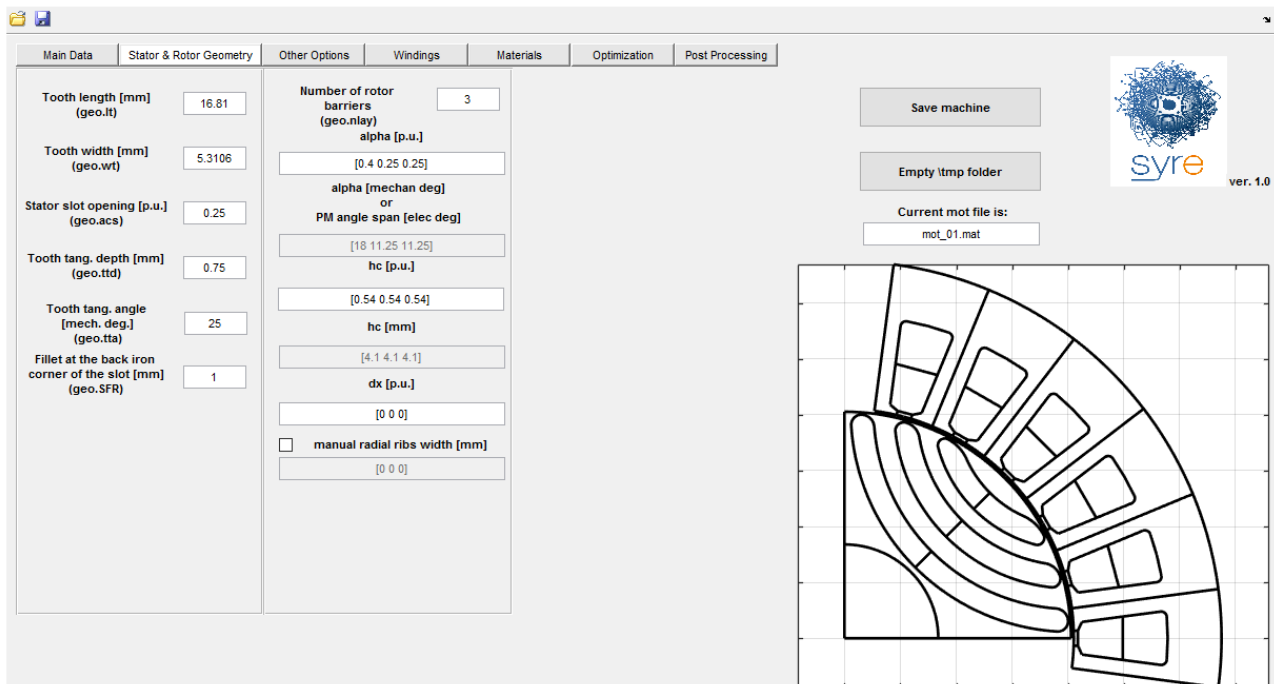


Figura 8-Finestra 'Stator & Rotor Geometry' per la definizione di cave, denti e barriere di flusso

Uno dei parametri chiave di rotore è il numero di barriere di flusso per polo, indicato con 'nlay' (numero di layer).

Una volta scelto il numero di barriere, per ciascuna barriera devono essere definiti i tre parametri alpha (posizione angolare della punta di barriera al traferro), hc (altezza della barriera in senso radiale) e dx (spostamento della barriera rispetto alla linea mediana definita da alpha). Le figure 9 e 10 spiegano il significato dei tre parametri con esempi grafici.

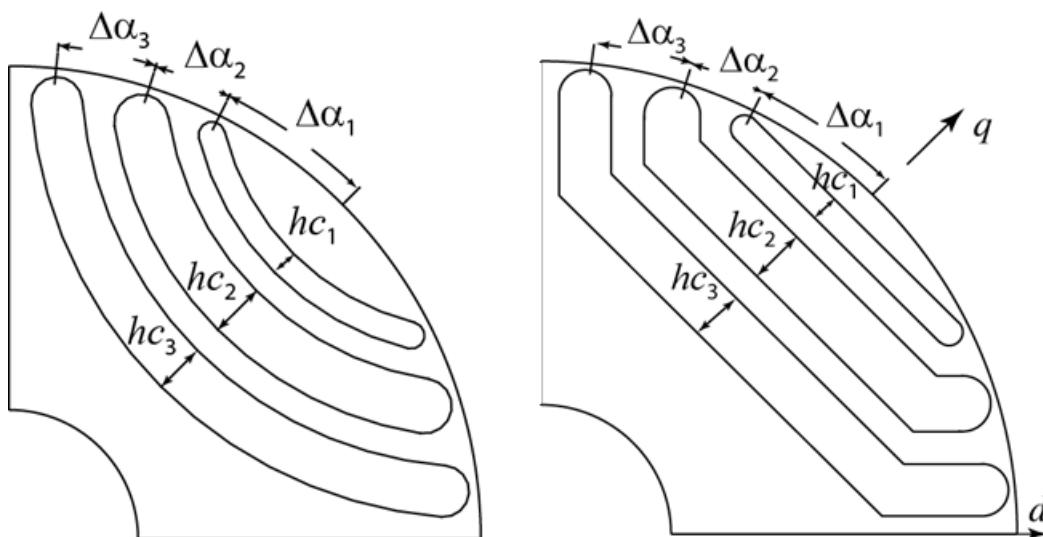


Figura 9-Definizione dei parametri hc e α su una geometria 'Circular' a sinistra e 'ISeg' a destra

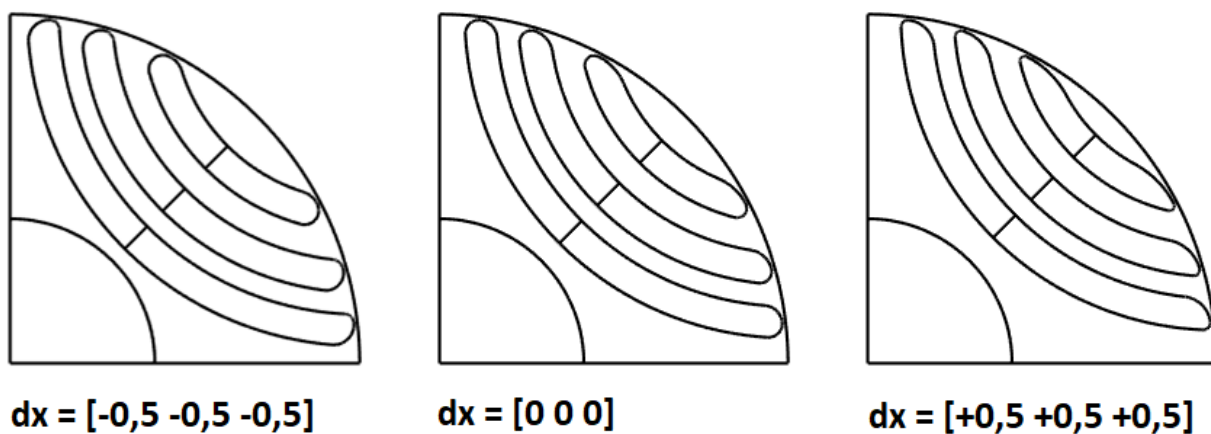


Figura 10-Definizione del dx per la geometria 'Circular'

2.1.3. Finestra Other Options

Passando alla finestra 'Other Options', essa contiene (Figura 11):

- Dati di tipo termico quali le perdite allo stallo, la temperatura di riferimento del rame, la temperatura stimata del rame e la 'housing temperature' (utilizzata per stimare la temperatura di rame).

- Dati di tipo meccanico quali la massima velocità sull'intervallo considerato (utilizzata per il dimensionamento dei ponticelli radiali, soggetti a sforzi centrifughi) e la minima tolleranza meccanica, quest'ultima identificativa dello spessore dei ponticelli al traferro.
- Dati di tipo magnetico quali il fattore di riempimento di barriera e l'induzione residua del materiale interno alla stessa.

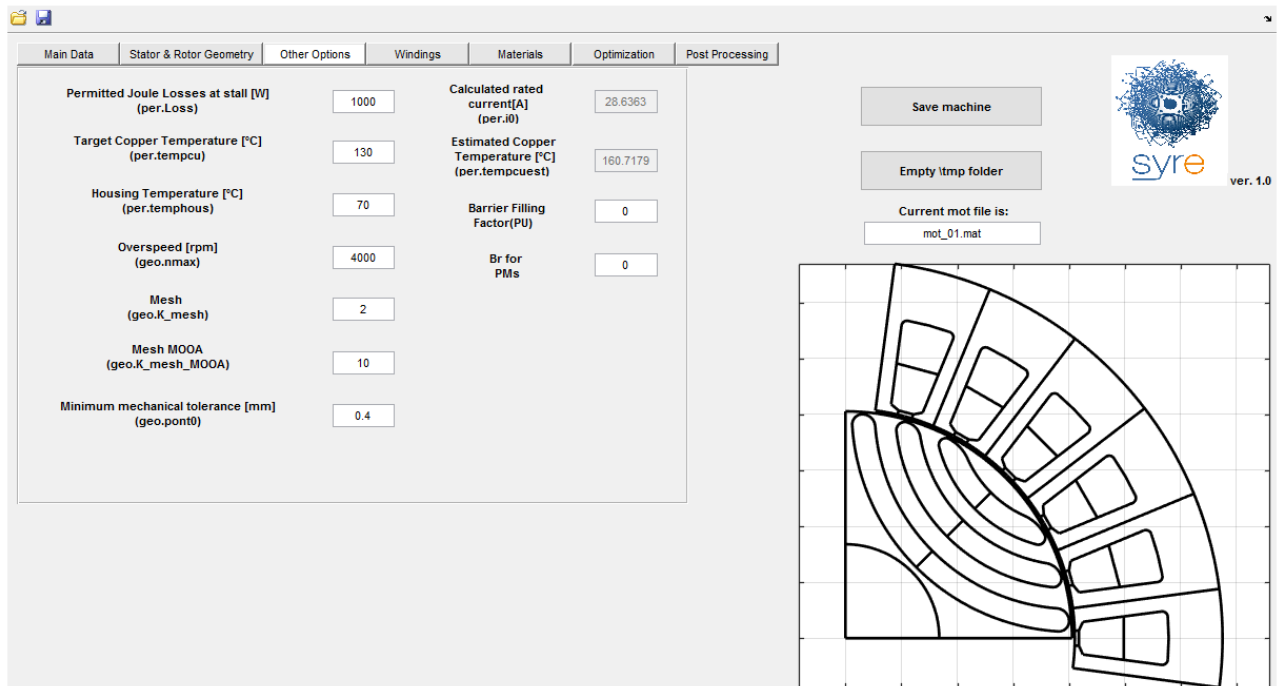


Figura 11-Finestra 'Other Options'

Completano i campi le voci relative alla densità delle “mesh”, nell’analisi agli elementi finiti: tale densità viene definita in modi differenti, a seconda che l’analisi sia di ottimizzazione oppure di ‘post processing’ (con ulteriore differenziazione per il traferro). A tal proposito, viene riportata la seguente tabella riassuntiva del manuale di SyR-e:

	During optimization	During post-processing
General mesh resolution	$\frac{Mesh_MOOA}{p}$	$\frac{Mesh}{p}$
Airgap mesh resolution	$\frac{1}{p}$	$\frac{Mesh}{p \cdot Mesh_MOOA}$

La schermata in figura è la versione di partenza rispetto a quella finale, ottenuta a seguito delle modifiche apportate al software: più avanti verrà riportata quella comprensiva dei campi aggiuntivi.

2.1.4. Finestra Windings

Dalla pagina 'Windings' vengono inseriti i dati per la realizzazione dell'avvolgimento statorico (Figura 12).

Il design dell'avvolgimento è ottenuto mediante 'koil_syre', una versione eseguibile da Matlab del software Koil. Quest'ultimo è stato sviluppato dall'EDLab dell'Università di Padova.

	Slot n° 1	Slot n° 2	Slot n° 3	Slot n° 4	Slot n° 5
Layer 1	1	1	-3	-3	
Layer 2	1	1	-3	-3	

Figura 12-Finestra 'Windings'

I campi per la definizione dell'avvolgimento riguardano il fattore di riempimento di cava, il numero di spire in serie per fase ed il raccorciamento di passo; è inoltre presente un'utile tabella per gestirne la configurazione.

Koil progetta automaticamente l'avvolgimento, a partire dalla conoscenza del numero di coppie polari e delle cave/polo/fase. Nel caso di default, è sufficiente modellizzare 6 cave per polo per determinare il comportamento complessivo del motore (data la periodicità).

Eventualmente, possono essere rappresentate porzioni più grandi di macchina agendo sul numero di slots per la simulazione. Nella Figura 13 è evidenziato il passaggio da 6 a 36 cave.

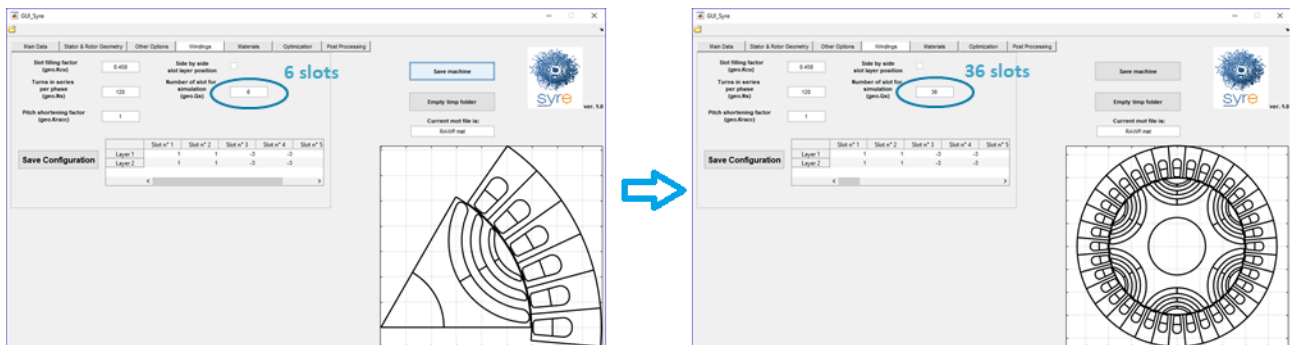


Figura 13-Modifica del numero di cave per la simulazione

2.1.5. Finestra Materials

‘Materials’ è la finestra dalla quale assegnare i materiali alle diverse regioni definite sulla macchina. Questi sono selezionabili da opportune librerie, suddivise per tipo. Di ciascun materiale è inoltre possibile visionarne le proprietà.

La schermata è quella di Figura 14.

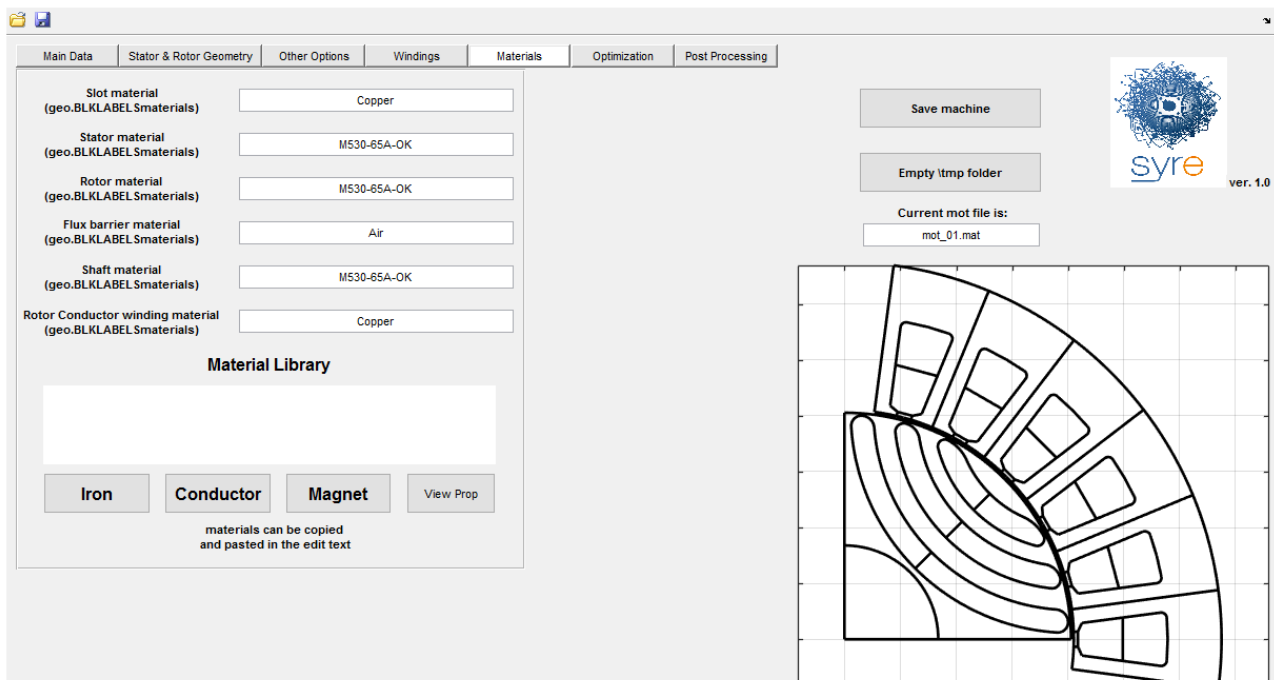


Figura 14-Finestra 'Materials'

2.1.6. Finestra Optimization

‘Optimization’ raccoglie le opzioni del processo di ottimizzazione (Figura 15): queste sono suddivisibili in campi dedicati alla definizione dei parametri dell’algoritmo “genetico” e campi relativi ai vincoli sulle variabili geometriche e/o elettriche. In particolare il numero di posizioni simulate si riferisce a posizioni tra loro equi-spaziate, da individuare sulla base dell’escursione angolare rotorica (definisce il “salto angolare” da una posizione all’altra).

È oltretutto possibile selezionare le grandezze rispetto alle quali determinare la frontiera di Pareto del processo.

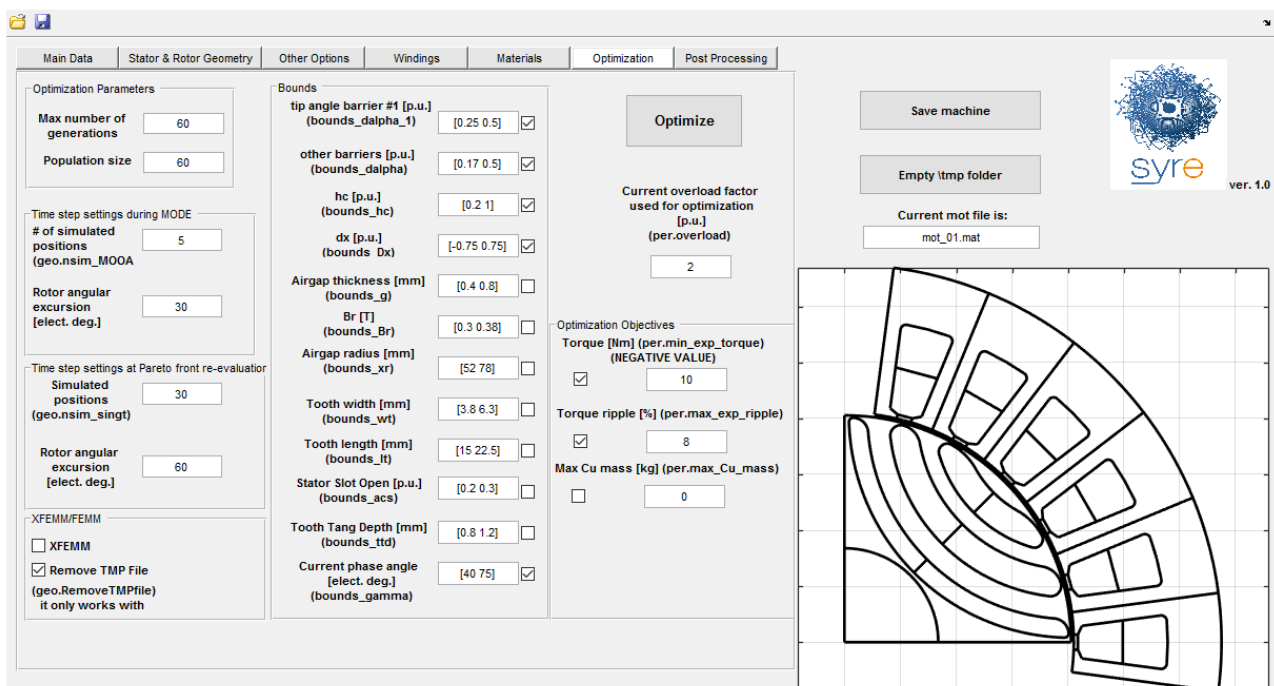


Figura 15- Finestra 'Optimization'

2.1.7. Post Processing

Infine, la finestra di ‘Post processing’ (Figura 16) consente di simulare la macchina in esame sotto specifiche condizioni.

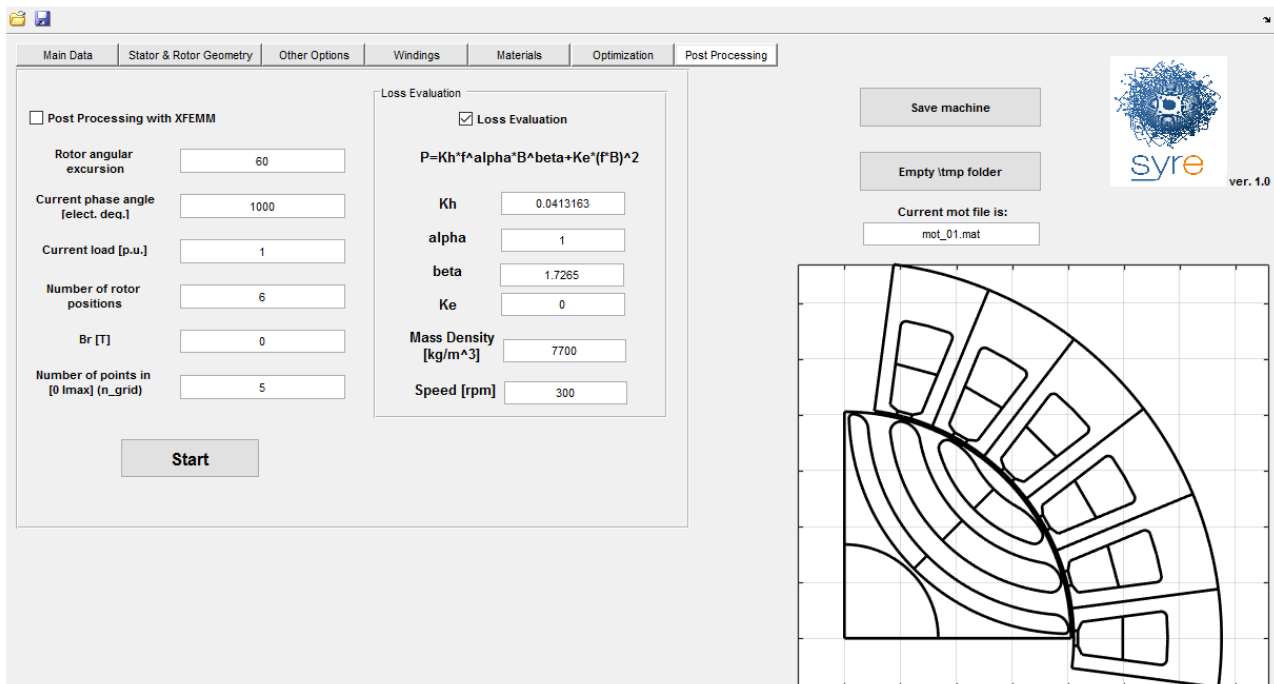


Figura 16-Finestra di 'Post processing'

Nel 'Post Processing', la simulazione può avvenire per singolo punto di lavoro (restituendo gli andamenti di flusso, coppia e IPF sui 360°). In alternativa, si possono ricostruire le caratteristiche magnetiche e le curve 3D di coppia e di ripple, il tutto in funzione delle componenti di corrente espresse su assi d e q.

Quest'ultimo tipo di simulazione è ottenibile agendo sulla voce 'Current phase angle', inserendo un valore di programmazione forfettario pari a 1000. In Figura 17 vengono raccolti dei risultati d'esempio.

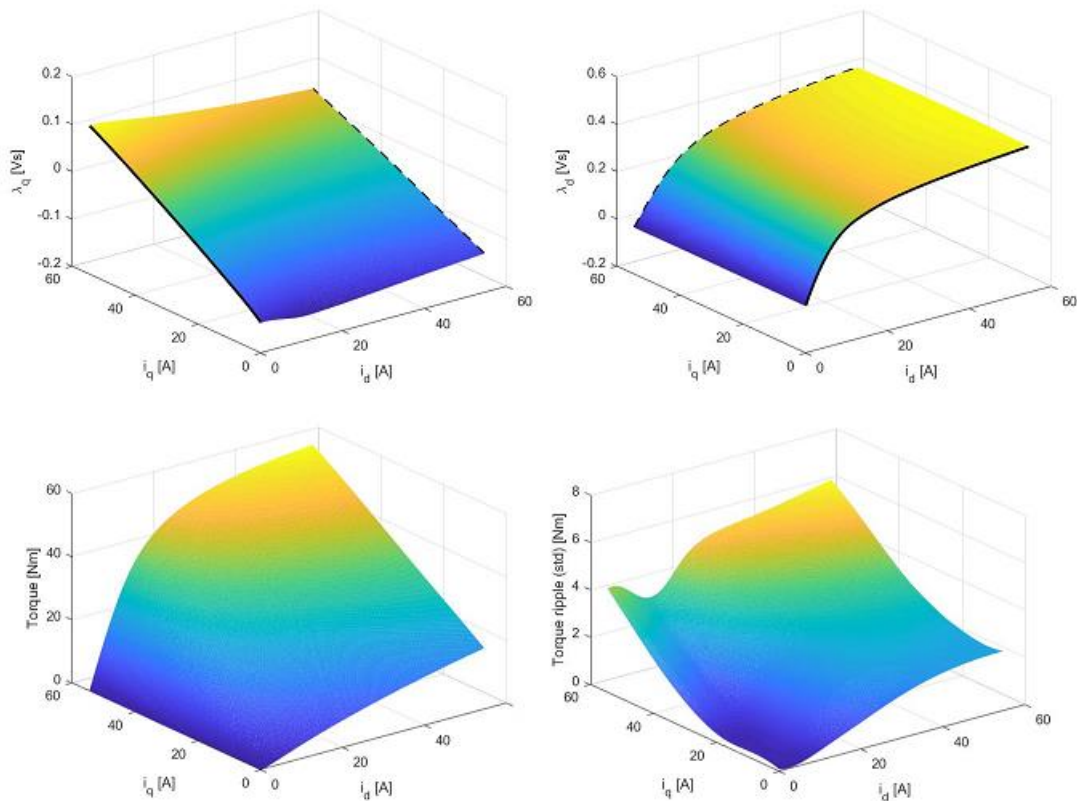


Figura 17-Risultati del 'post processing' con ricostruzione 3D delle mappe di flusso

La sezione 'Loss Evaluation' raccoglie i dati per il calcolo delle perdite, a determinati valori di velocità, basandosi sulla formulazione di Steinmetz.

2.2 Procedura di progettazione del motore PM-SyR

La progettazione del motore PM-SyR è affrontata partendo dal progetto di un motore SyR a cui, in un secondo momento, vengono aggiunti i magneti permanenti.

Il motore SyR iniziale viene progettato secondo le specifiche di prestazione attesa, tenendo in conto i vincoli dimensionali e costruttivi, il tipo di raffreddamento e le proprietà del lamierino magnetico. Successivamente, si progettano i magneti rispettando le dimensioni delle barriere del motore SyR.

A grandi linee, la progettazione del motore SyR iniziale determina le dimensioni del motore e la prestazioni in coppia della macchina PM-SyR finale, mentre il progetto dei magneti determina la capacità di deflussaggio delle macchine e il campo di velocità a potenza costante.

La procedura di progetto può essere articolata su tre livelli, come indicato nel diagramma di flusso di Figura 18.

La tesi si concentra sul terzo di questi tre passi, per le geometrie di tipo 'Seg' e 'ISeg'; prima del lavoro di tesi, il terzo passo della procedura era applicabile solo alla geometria 'Circular'.

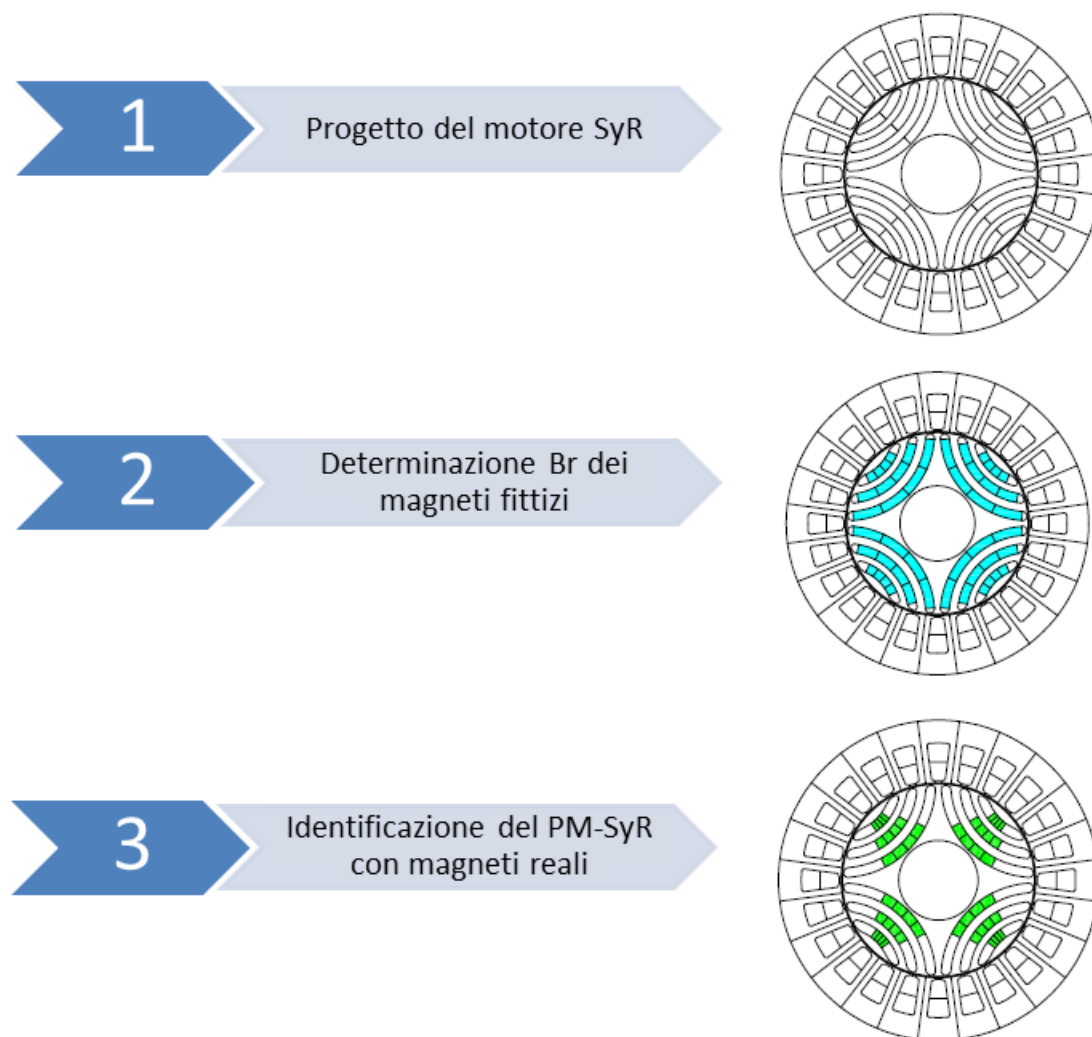


Figura 18-Procedura di progetto del motore "PM assisted"

1. Progettazione iniziale della macchina SyR, partendo dai dati geometrici in ingresso e dal carico termico ammesso.

Con l'utilizzo di SyR-e, questa fase può essere svolta scegliendo opportunamente il motore sul diagramma generato dalla funzione 'syrmDesign'. In generale, una buona scelta dovrebbe prevedere un Power Factor sufficientemente elevato ed una coppia erogata che corrisponda a circa il 75% del target fissato; tale accorgimento permetterà di ridurre la quantità di magneti che verrà utilizzata per rifasare.

La macchina così identificata viene quindi valutata tramite un'analisi agli elementi finiti (FEA).

2. La seconda fase consiste nello svolgere tre FEA, finalizzate ad identificare il valore di induzione dei magneti fittizi, inseriti all'interno delle barriere.

Due di queste analisi vengono svolte mediante l'introduzione di un materiale fittizio (definito in SyR-e come 'Bonded-Magnet'), il quale va a riempire l'intero spazio di barriera, in condizioni di corrente di alimentazione nulla; nel caso effettivo, il riempimento è realizzato in modo da lasciare vuote le punte delle barriere.

Le due FEA andranno a definire una relazione ad andamento lineare che legghi flusso ed induzione residua del 'Bonded-Magnet' simulato.

Viene quindi determinato, per proporzione, il valore di induzione residua dei magneti fittizi, equivalenti al magnete reale: ciò grazie alla terza simulazione. Quest'ultima è eseguita con "corrente caratteristica" pari alla corrente nominale, in assenza di materiale magnetico.

Per "corrente caratteristica" si intende quella condizione per la quale il flusso prodotto dal vettore corrente, posizionato in asse q, è tale da opporsi completamente al flusso che produrrebbero i magneti.

In questo modo, la simulazione evidenzia la condizione di deflussabilità ideale per la macchina, ottenibile dalla compensazione descritta.

Quanto detto verrà meglio approfondito nei successivi paragrafi.

In Figura 14 viene rappresentata la caratteristica di flusso, tenendo conto che ai più bassi valori di induzione corrisponde un valore di offset λ_{ribs} , legato all'effetto di saturazione dei ponticelli al traferro (situazione evidenziata).

Con riferimento a tale figura, l'induzione residua ricercata può essere espressa attraverso la seguente formulazione:

$$B'_r = \lambda_{rq,io} \frac{B_{r1} - B_{r2}}{\lambda_{m1} - \lambda_{m2}} \quad (1)$$

dove con $\lambda_{rq,io}$ si indica il valore di flusso ottenuto tramite la terza analisi agli elementi finiti, secondo le considerazioni precedentemente fatte.

Nella Figura 20 viene invece riportata una curva magnetica di flusso in asse q, associabile alla terza FEA, ottenuta su un intervallo di valori di corrente esteso fino al doppio del valore nominale (sia con segno positivo che negativo); entrando con il valore di corrente caratteristica, otteniamo il corrispondente valore di flusso $\lambda_{rq,io}$.

Il grafico è associabile alla seguente relazione:

$$\lambda_{rq} = \lambda_{ribs} + L_q i_q \quad (2)$$

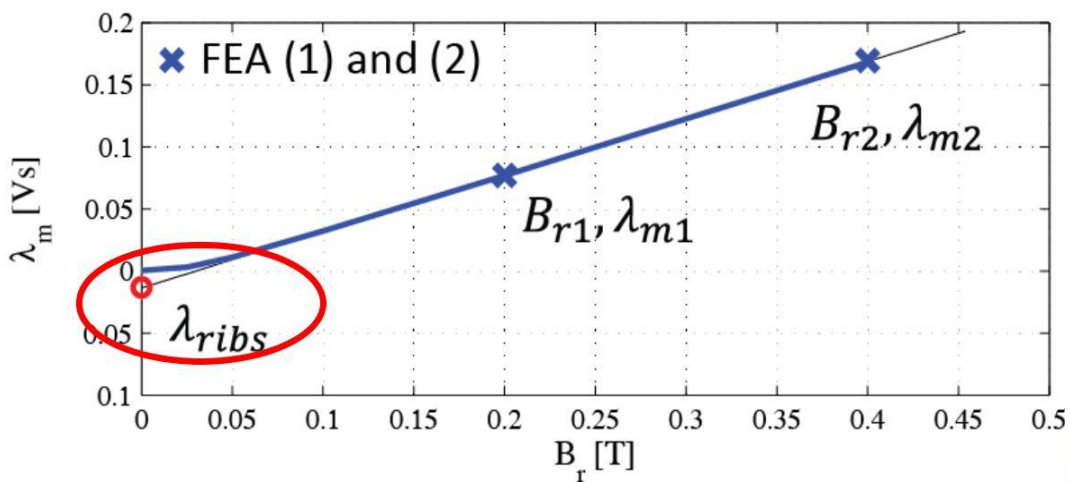


Figura 19-Caratteristica $\lambda_m(B_r)$ ottenuta con due FEA

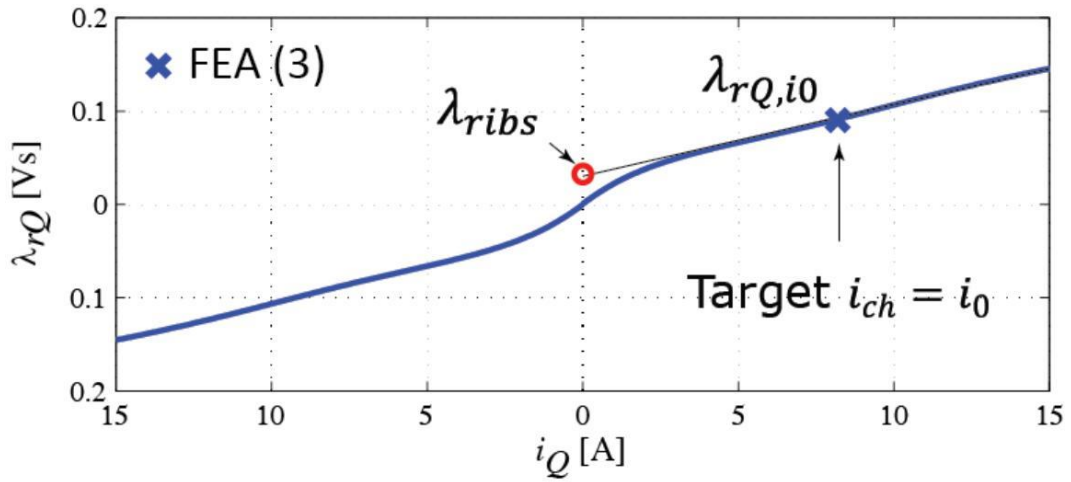


Figura 20-Caratteristica di flusso in asse q ad andamento non lineare ottenuta dal motore SyR

È importante precisare nuovamente che le caratteristiche sono ad andamento non lineare, a causa del comportamento dei ponticelli; in linea generale, però, si può pensare di inglobarne il contributo nella compensazione di flusso in asse q associata ai magneti. Ciò porta a definire il flusso dei magneti λ_m come:

$$\lambda_m = \lambda_{rq,i0} \quad (3)$$

anziché

$$\lambda_m = \lambda_{rq,i0} - \lambda_{ribs} \quad (4)$$

3. La terza ed ultima fase consiste nel passaggio dai magneti fittizi a quelli reali, scegliendo il materiale di riempimento tra quelli resi disponibili.

L'operazione viene eseguita tramite una proporzione tra i volumi di magneti, passando attraverso i valori di induzione residua. Vengono riportate come esempio, in Figura 21, le analisi FEM di due possibili materiali sostitutivi di quello fittizio.

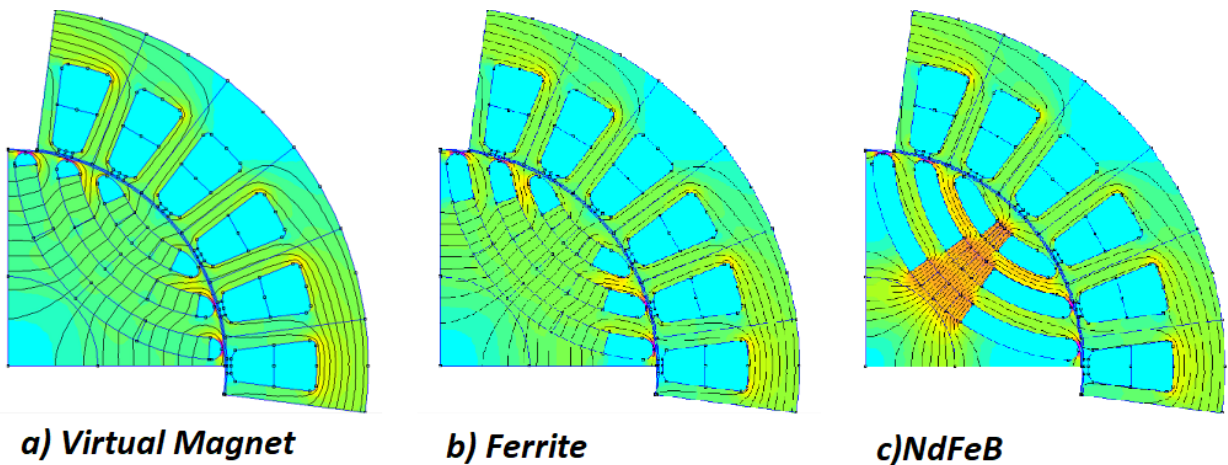


Figura 21-Analisi FEM corrispondenti a diversi materiali: a)materiale fittizio, b)ferrite e c)neodimio

Si noti come l'utilizzo della ferrite porti ad una minor concentrazione del materiale da collocare nelle barriere; ciò è preferibile sia per motivi di semplicità di inserimento in fase di assemblaggio del rotore, sia per evitare un'eccessiva formazione di saturazioni locali. All'aumentare del carico, il passaggio verso la soluzione a NdFeB tende ad essere sempre più obbligata.

2.3 Progetto del motore a riluttanza di riferimento

Viene di seguito svolta, a titolo d'esempio, la procedura di progetto di una generica macchina. I campi di SyR-e non menzionati vengono lasciati, per semplicità, uguali a quelli della macchina di default, caricata dal programma all'avvio.

Il diagramma di flusso di Figura 22 riporta l'intero processo.

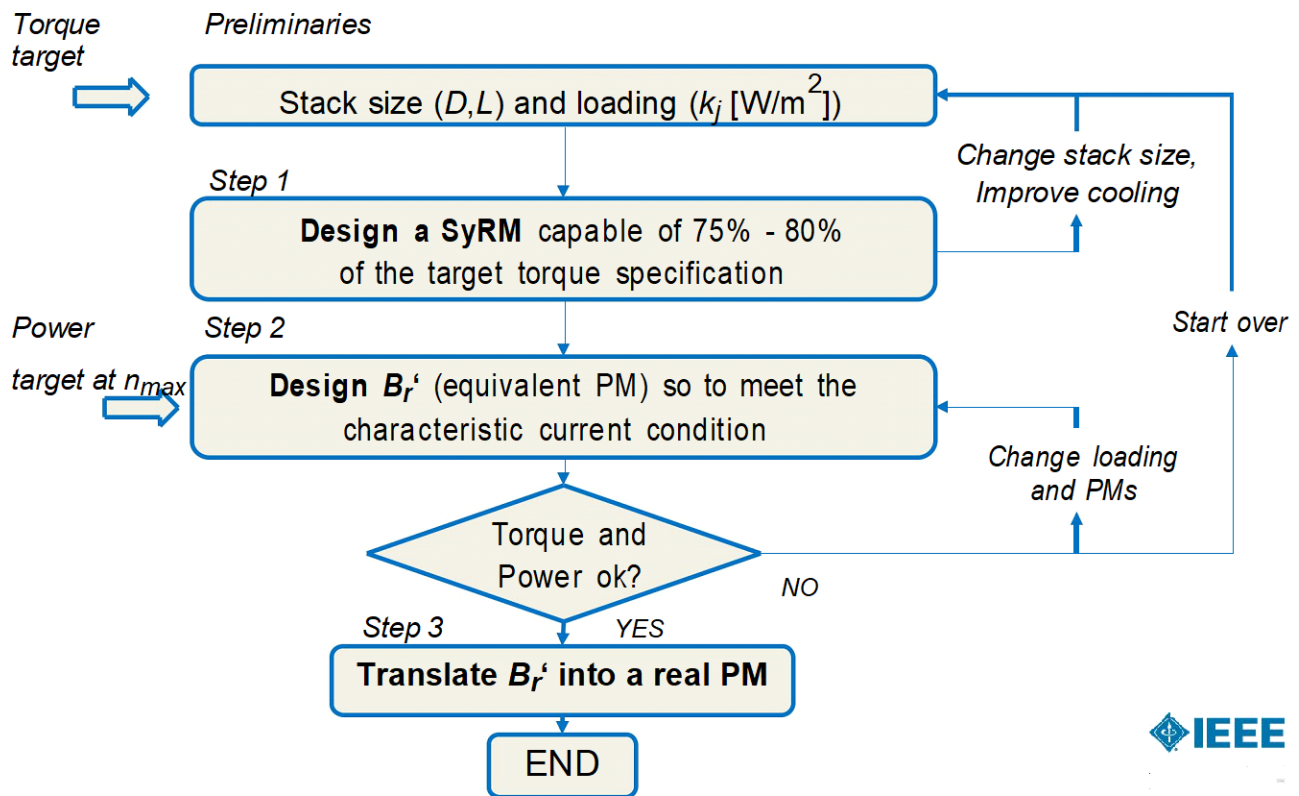


Figura 22-Diagramma di flusso della procedura di progetto

Si ipotizza che l'applicazione considerata richieda 5 kW fino ad una velocità di 6000 rpm.

Il target di coppia alla velocità base è di 24 Nm.

I dati che andranno inseriti su SyR-e saranno quelli della tabella.

Dati in input sulla GUI di SyR-e			
paia poli	p		2
Cave/polo/fase	q		2
Lunghezza stack	L	mm	101
Raggio esterno statore	R	mm	67.5
Spessore del traferro	g	mm	0.5
Numero strati di barriera	n		3
Temperatura di riferimento del rame		°C	130
Fattore di riempimento di cava	K _{cu}		0.407
Induzione di picco del ferro	B _{Fe}	T	1.5
Numero di spire in serie per fase	N _s		170

L'avvolgimento statorico è realizzato a doppio strato a passo intero e verrà mantenuto tale anche per i successivi esempi, salvo diversamente specificato.

Tra i dati in ingresso va oltretutto considerato il carico termico specifico della macchina, indicato con K_j (è un modo analogo di definire il carico elettrico della macchina, o la sua densità di corrente).

Esso fornisce le perdite per unità di superficie nel rame statorico, escludendo quelle nel ferro.

Il raffreddamento dovrà quindi tenere conto delle perdite totali.

Fissato il valore del K_j , in base al sistema di raffreddamento, verrà stabilito il valore delle perdite allo stallo: esse, infatti, sono correlate al carico termico a mezzo della geometria di macchina.

$$K_j = \frac{\frac{3}{2} R_s i_o^2}{2\pi R L} \quad (5)$$

R_s è il valore stimato della resistenza di fase statorica.

i_o è il valore di picco della corrente nominale.

Il termine a numeratore rappresenta le perdite allo stallo.

Fissate le perdite, viene determinata la corrente nominale (in valore di picco) ed il corrispondente valore di temperatura del rame, con quest' ultimo che non deve superare il valore di riferimento.

Valori di K_j di riferimento possono essere i seguenti:

Tipo di raffreddamento		Valore del K_j
Totalmente chiuso	1.5÷3	kW
Ventilazione forzata	5÷12	kW
A liquido	12÷20	kW

Nel caso considerato, si ipotizzano delle perdite allo stallo pari a 600 W.

In base alle specifiche richieste, si seleziona la macchina SyR con l'ausilio della funzione 'syrmDesign'.

In Figura 26 si può notare il diagramma (x,b) con definizione di curve di livello, sia di coppia che di PF.

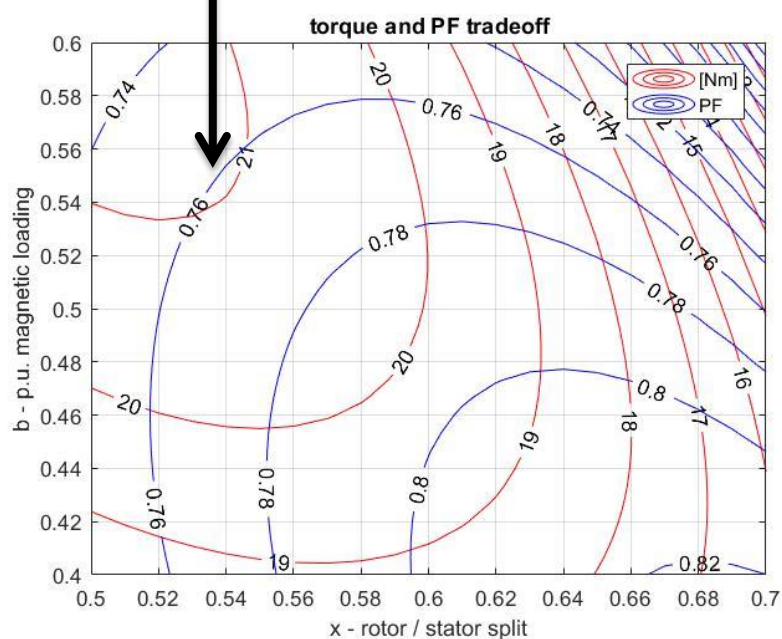
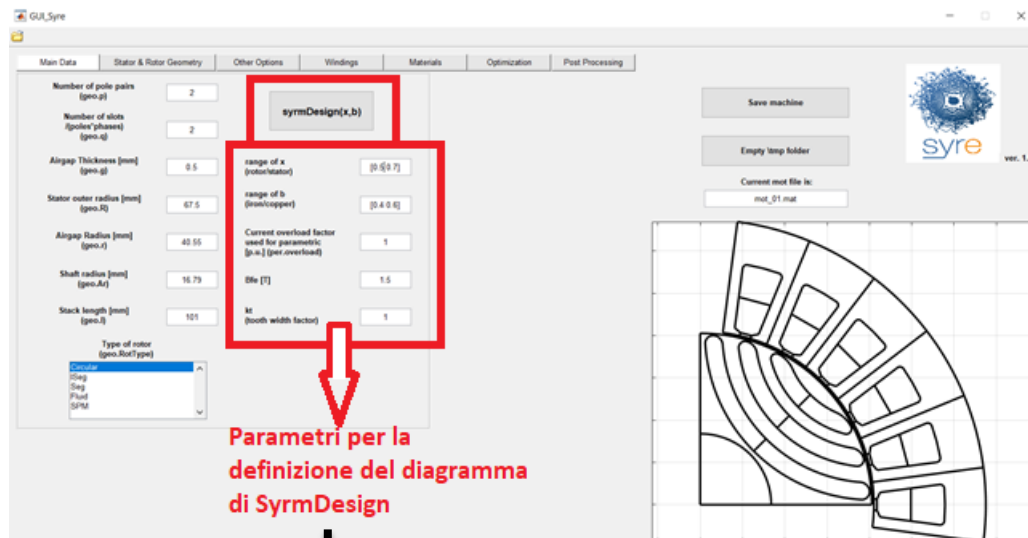


Figura 23-Definizione diagramma (x,b) con syrmDesign

Se dalle mappe parametrizzate dovesse risultare che le macchine non siano in grado di fornire un adeguato valore di coppia, andrebbero variate la grandezza dello stack e/o il tipo di raffreddamento, come indicato in precedenza.

Vengono richiesti, ai fini della ricostruzione, sia l'intervallo di x (rapporto raggio rotorico/raggio statorico) che quello di b (rapporto ferro/rame) sui quali lavorare. La scelta sulla mappa può variare, andando da motori con elevato b e basso x al caso opposto con minor carico magnetico e un più alto valore del rapporto tra i raggi di macchina.

La selezione va effettuata tenendo conto delle seguenti considerazioni qualitative:

- All'aumentare di x corrisponde una diminuzione dell'area totale delle cave statoriche, con conseguente diminuzione del carico elettrico; contemporaneamente, aumenta il flusso per polo (Figura 24).

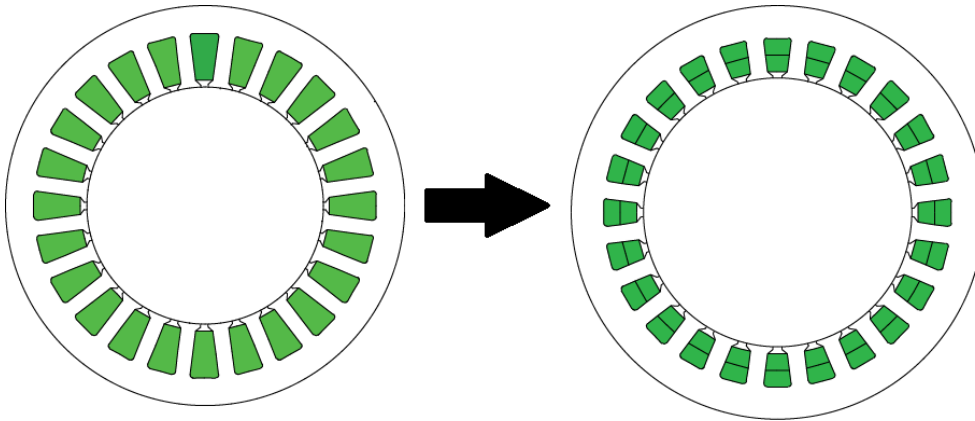


Figura 24-Conseguenze dell'aumento del valore di x

- All'aumentare di b corrisponde un aumento del ferro di giogo statorico e della larghezza dei denti di statore, situazione congeniale nei casi in cui si richieda un carico magnetico più elevato; diminuisce, invece, il carico elettrico, a causa della diminuzione di grandezza delle cave (Figura 25).

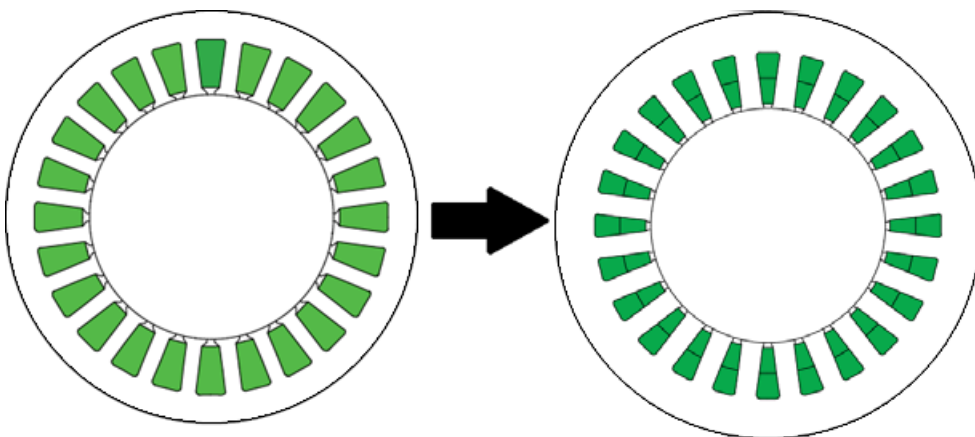


Figura 25-Conseguenze dell'aumento del valore di b

Si supponga di scegliere un motore nella regione in alto a sinistra (Figura 26), associato ai seguenti valori:

- $x = 0.56$;
- $b = 0.54$;
- Coppia media = 22 Nm;
- PF = 0.77;

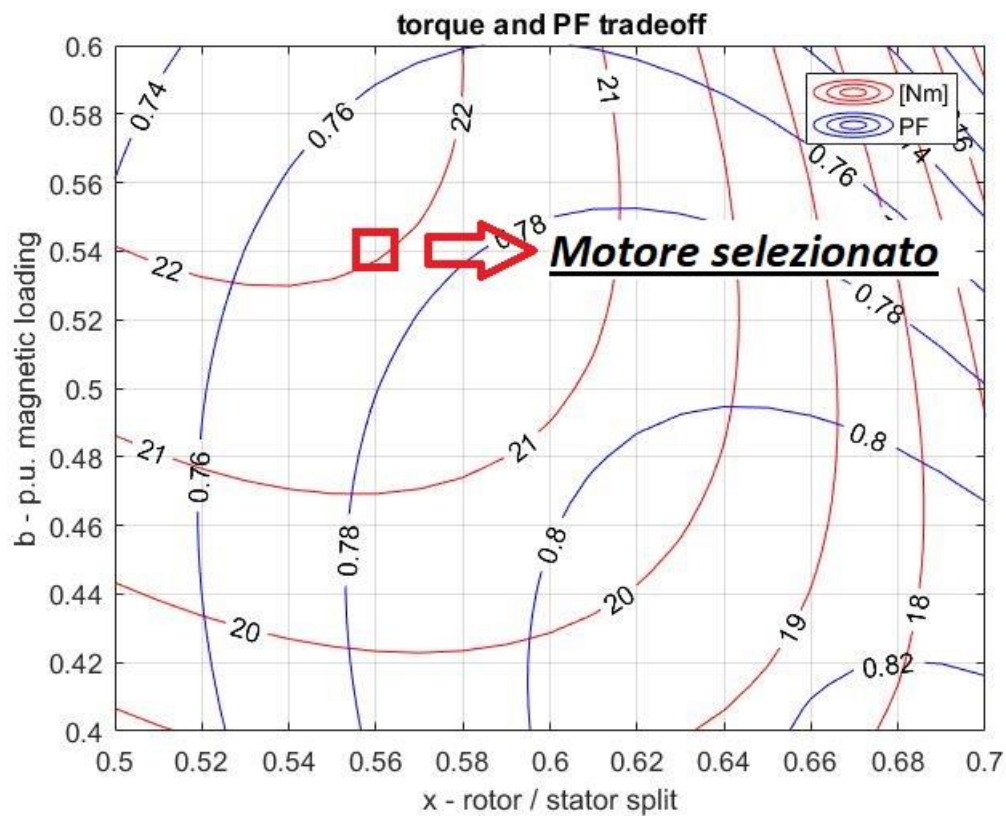


Figura 26-Selezione del motore

I parametri della macchina scelta, sopra indicati, sono da considerarsi approssimativi.

In Figura 27, se ne riporta il modello FEMM.

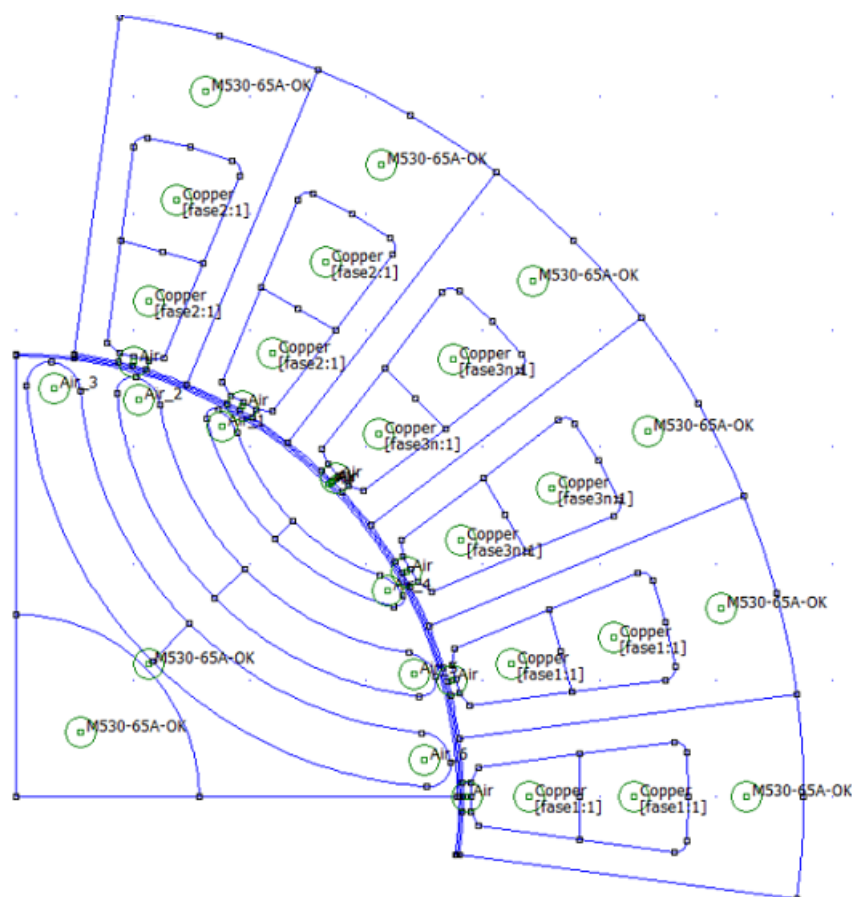


Figura 27-Modello FEMM del SyRM in esame

I dati di riferimento sono i seguenti:

Dati del motore SyR		
Potenza	kW	2.9
Coppia	Nm	18
Velocità base	rpm	1540
Tensione di fase	V(pk)	179
Corrente di fase	A(pk)	16.5
Paia poli		2
Frequenza	Hz	50
Power Factor		0.65

Individuata la macchina, si potrà procedere alla fase successiva di inserimento dei magneti fittizi. Tale fase dovrà tenere conto , come obiettivo principale, del soddisfacimento della specifica di potenza richiesta sul valore massimo di velocità, in condizioni di deflussaggio.

I magneti daranno anche un contributo alla coppia prodotta dalla macchina, incrementandola, ma circa il 75 % sarà prodotta dal motore SyR di partenza.

2.4 Progetto dei magneti fittizi

La prima operazione è quella di identificare il valore di corrente caratteristica, cosa che SyR-e non effettua in maniera diretta.

Noti il valore di tensione del DC link V_{dc} e il valore di potenza richiesta in deflussaggio P_{ch} (alla velocità massima n_{max}), si identifica la corrente caratteristica I_{ch} (valore di picco) sapendo che:

$$P_{ch} = \frac{3}{2} V_{max} I_{ch} \quad (6)$$

$$V_{max} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

A questo punto si modifica il numero di spire in serie per fase, fino a far all'incirca coincidere il valore di corrente nominale I_0 con il valore appena determinato.

Tale operazione è ovviamente molto delicata, essendo fissato il valore di velocità base alla tensione nominale. Una eccessiva modifica porterebbe al significativo spostamento (in anticipo o in ritardo) del valore effettivo di velocità base, rispetto al valore di riferimento.

Nel caso in esame, il numero di spire in serie per fase verrà portato ad un valore di $N_s = 160$, non troppo distante dal precedente : ciò comporta una corrente I_0 di 17.8 A.

Il materiale fittizio viene indicato con il nome di 'Bonded-Magnet', ed è riportato nella lista materiali; una volta selezionato, vengono eseguite due analisi FEM a due diversi valori di induzione residua (supponiamo $B_r=0.2$ T e $B_r=0.4$ T).

In Figura 28 si riportano gli andamenti di flusso in assi d e q ottenuti con magneti a $B_r=0.2$ T.

In Figura 29 le stesse grandezze sono riferite al caso con $B_r=0.4$ T.

L'interesse è rivolto alle componenti in asse q.

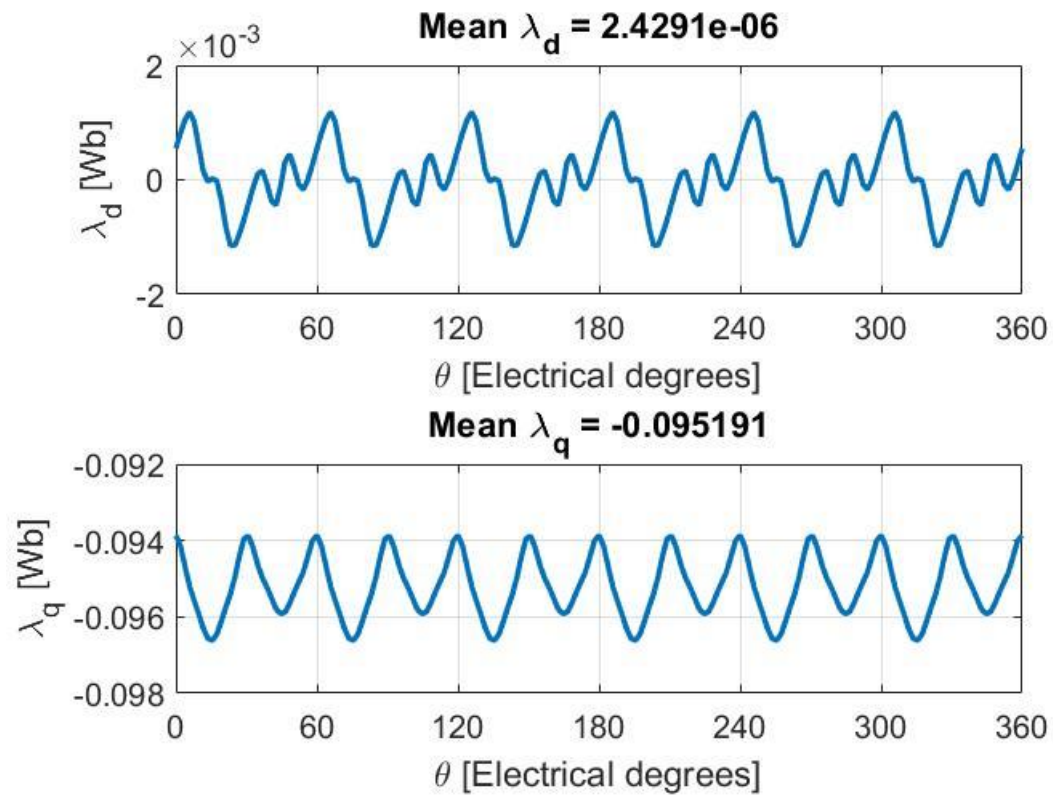


Figura 28-Andamenti di flusso per FEA con materiale a $B_r=0.2$ T e corrente nulla

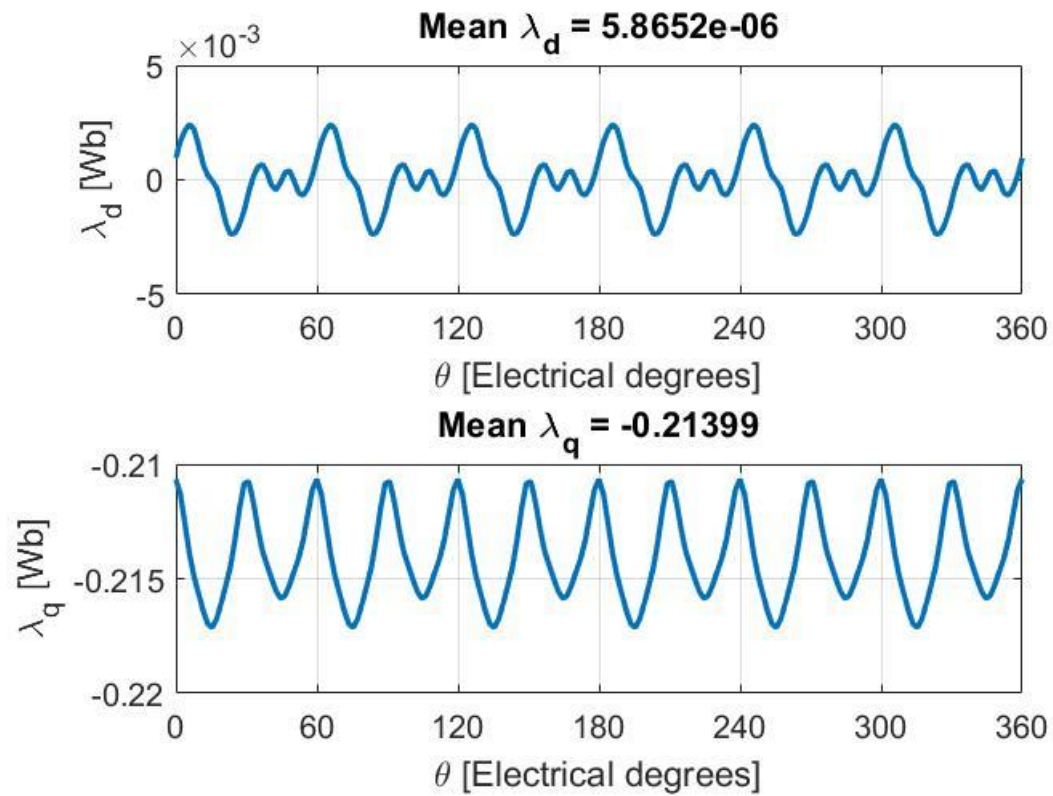


Figura 29-Andamenti di flusso per FEA con materiale a $B_r=0.4$ T e corrente nulla

A questo punto si passa a considerare la terza analisi agli elementi finiti, in assenza di magneti e con una corrente interamente in asse q, pari al valore di corrente caratteristica (teoricamente coincidente con il valore nominale).

Nella Figura 30 sono rappresentate le caratteristiche magnetiche associabili al motore SyR in esame.

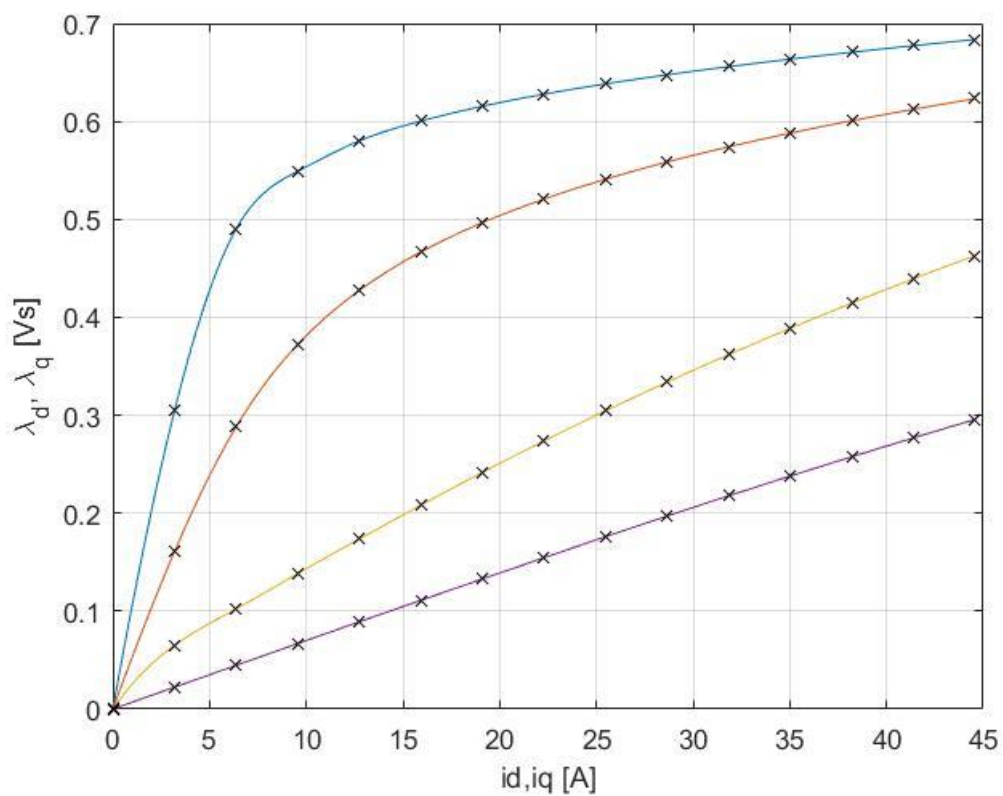


Figura 30-Caratteristiche magnetiche del motore SyR

Entrando con il valore di corrente caratteristica, si ricava il corrispondente valore di $\lambda_{rq,io}$; in termini operativi, si esegue un'analisi a singolo punto di lavoro.

I risultati, in termini di andamento di flusso, sono quelli di Figura 31.

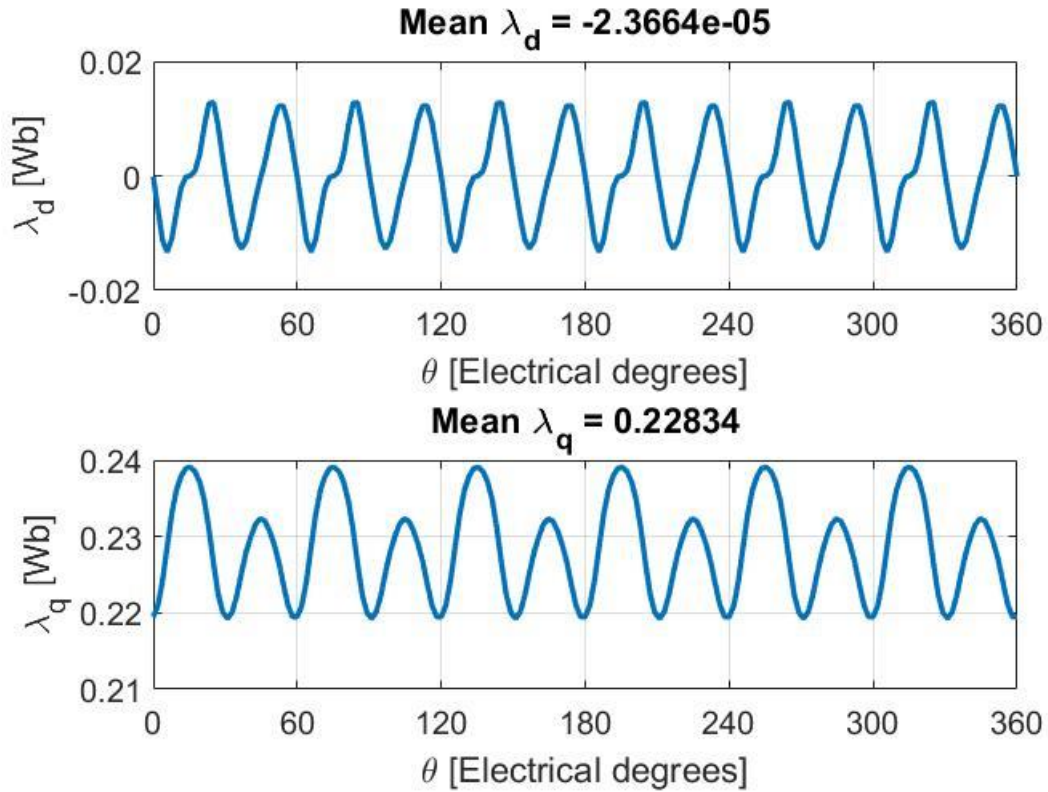


Figura 31-Andamento di flusso per la terza FEA

Applicando la relazione (1), si ricava il valore B_r' di induzione residua dei magneti equivalenti; nel caso considerato, si avrà $B_r' = 0.38$ T.

2.5 Passaggio da magneti fittizi a magneti reali

Questa fase è quella sulla quale si concentra il lavoro di tesi e su cui sono state apportate modifiche. Verrà dapprima seguita la procedura originaria, salvo poi mostrare più avanti le criticità del metodo e la soluzione proposta.

Scelto il materiale per la sostituzione, ad esso corrisponderà un valore di induzione residua della sua caratteristica magnetica; l'equivalenza viene quindi impostata a mezzo dei volumi di materiale coinvolti.

$$\frac{PM \text{ Volume}}{PM \text{ Volume}'} = \frac{B_r'}{B_r} \quad (8)$$

essendo PM Volume' corrispondente a 1 p.u. del volume di barriera.

Supponiamo che la scelta ricada sul 'NdFeB 32 MGOe'; il valore di induzione ad esso associato è di 1.16 T. Si ottiene quindi un volume di magnete (espresso in p.u.) pari a 0.33.

Analizzando magneticamente le macchine ricavate, si ottiene la Figura 32.

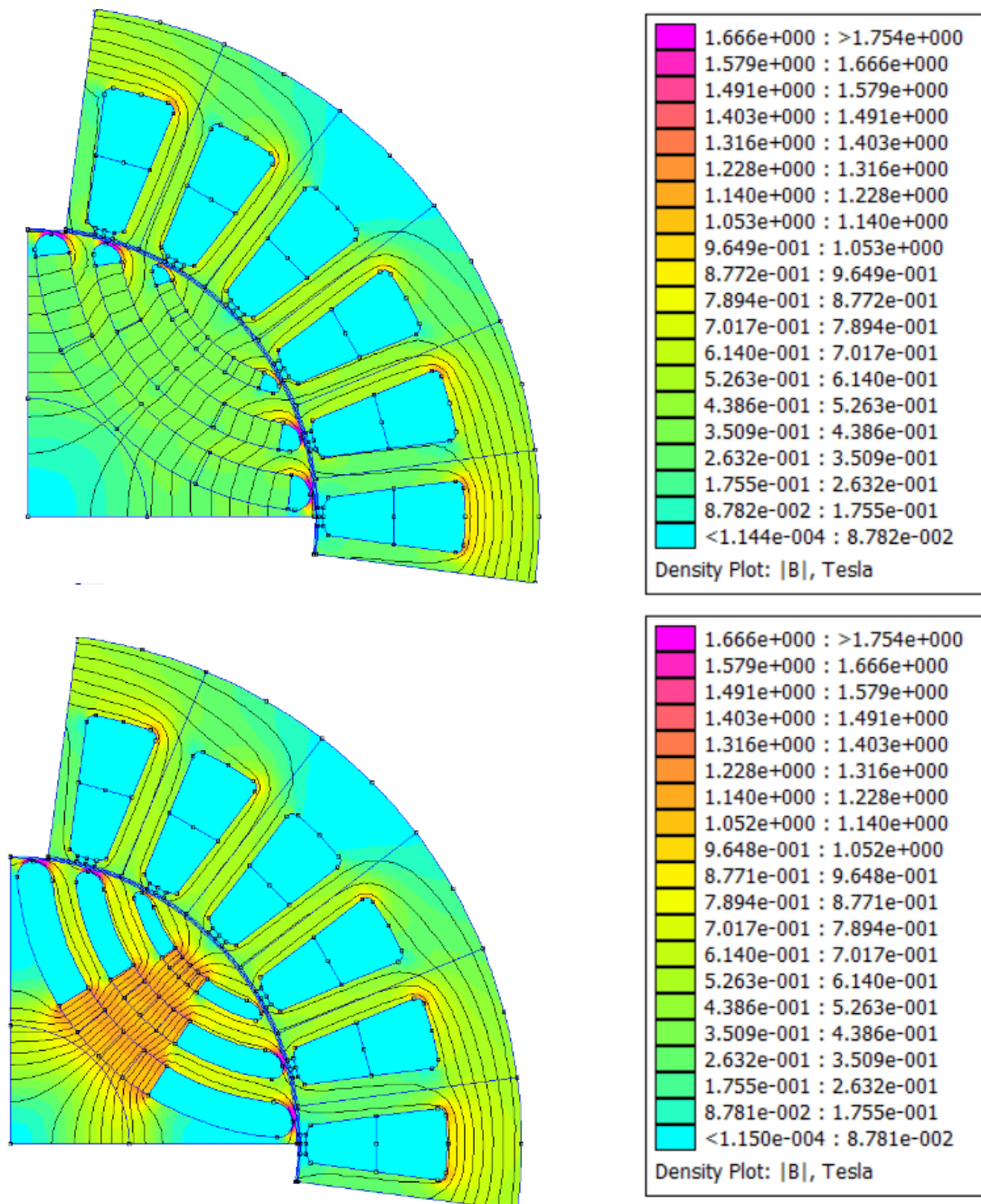


Figura 32-Modelli magnetici a confronto per magnete fittizio e reale

2.6 Post processing della macchina

La valutazione finale la si effettua con l'elaborazione offline delle mappe magnetiche, ottenute dal 'Post Processing'. Tali mappe vengono ricostruite su un valore di corrente pari a 2.5 p.u. del valore nominale.

L'elaborazione consente, tramite specifici script all'interno della cartella 'syreManipulateMM', di ottenere diverse curve, alcune qui di seguito riportate.

Per il caso considerato, in Figura 33 e Figura 34 vengono raffigurate le caratteristiche coppia-velocità e potenza-velocità alla corrente nominale.

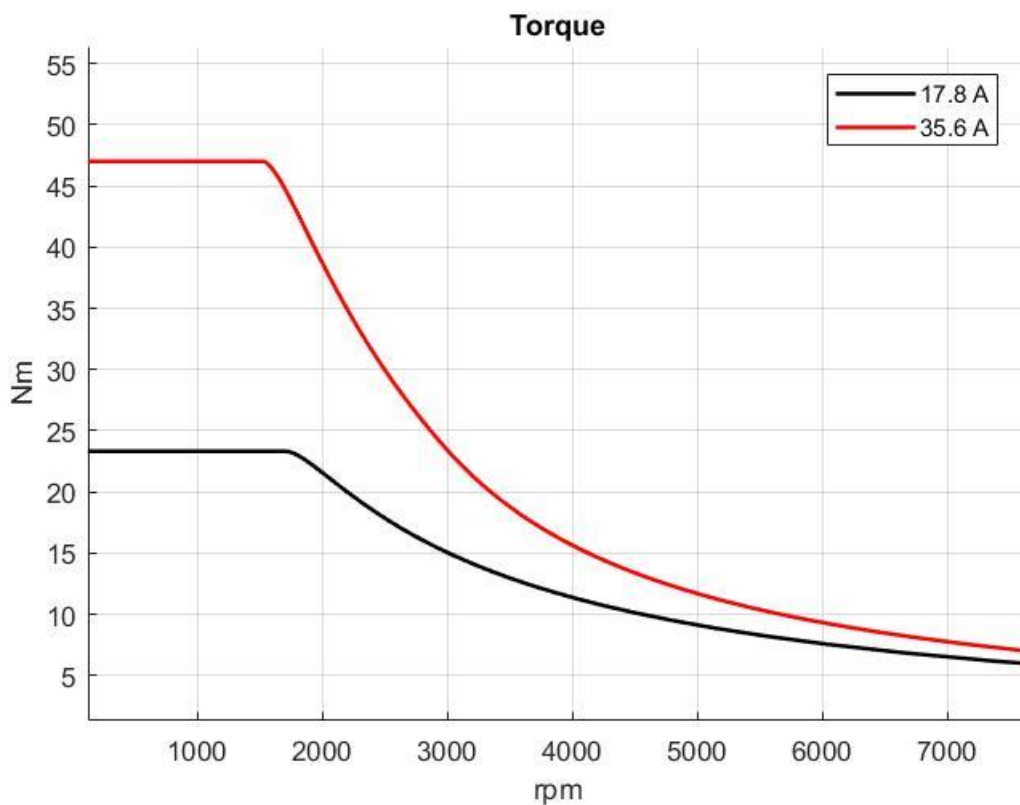


Figura 33- Curve coppia-velocità ottenuta dall'elaborazione offline delle mappe magnetiche

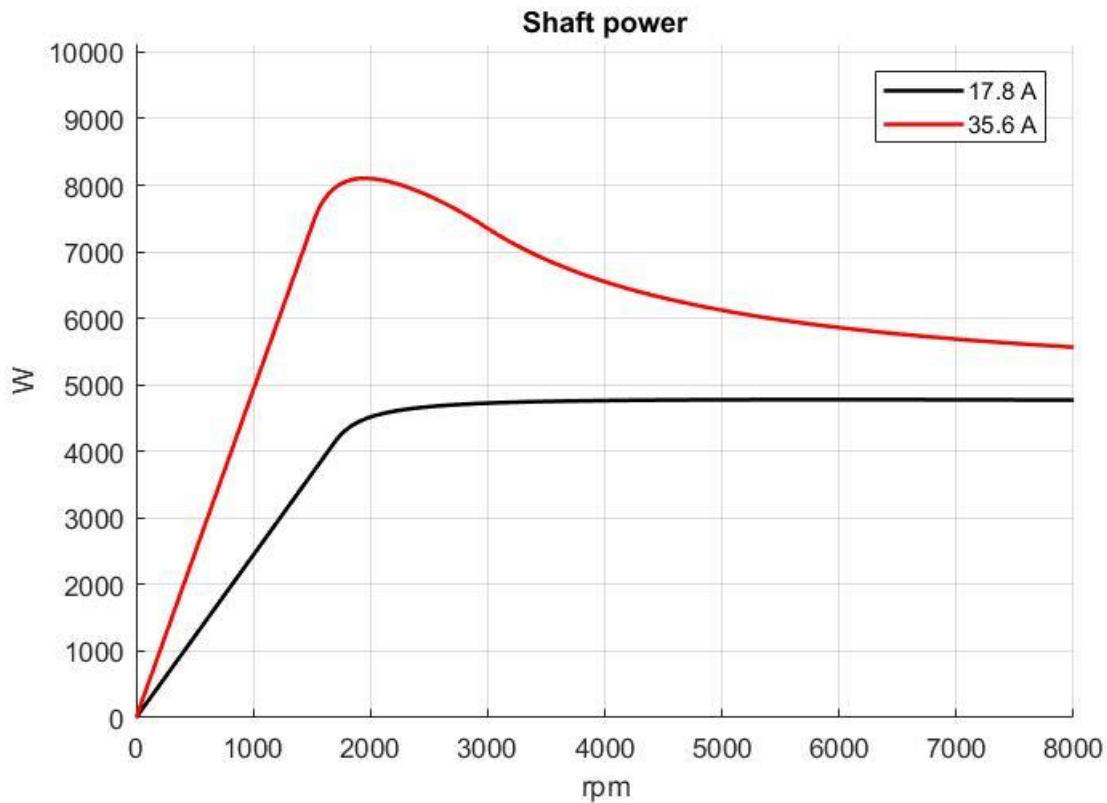


Figura 34-Curve potenza-velocità ottenuta dall'elaborazione offline delle mappe magnetiche

Dai risultati si vede come le specifiche non siano pienamente soddisfatte: ciò anche a causa della ricostruzione delle curve con 'syrmDesign', la quale avviene in maniera abbastanza approssimata.

La macchina scelta quindi non riuscirà ad erogare esattamente la coppia desiderata ma, per via di non idealità trascurate, ne fornirà di meno.

Analogamente, la potenza resa disponibile in deflussaggio, sul range di velocità d'interesse, non è esattamente 5 kW, ma poco meno.

Oltretutto, si nota come il valore di velocità base si sia spostato in ritardo rispetto al valore nominale: ciò a causa della modifica del numero di spire in serie per fase dell'avvolgimento statorico.

Risulta conveniente, da un lato, modificare il carico termico o il numero di spire, per venire incontro alle esigenze di coppia erogata; dall'altro, si potrebbero variare le dimensioni di macchina. Le soluzioni proposte possono anche migliorare il comportamento in potenza.

Aumentare la quantità di magneti, in generale, non produce significativi effetti sulla potenza ad alta velocità, rischiando anzi di peggiorare le prestazioni.

Le modifiche possono essere direttamente applicate al motore della fase finale, oppure si può ripartire dalla scelta sul 'syrmDesign'.

Oltre ai profili di coppia e potenza, vengono ricreate curve utili al controllo del motore

In Figura 35 si riportano l'MTPA e l'MTPV del PM-SyR progettato.

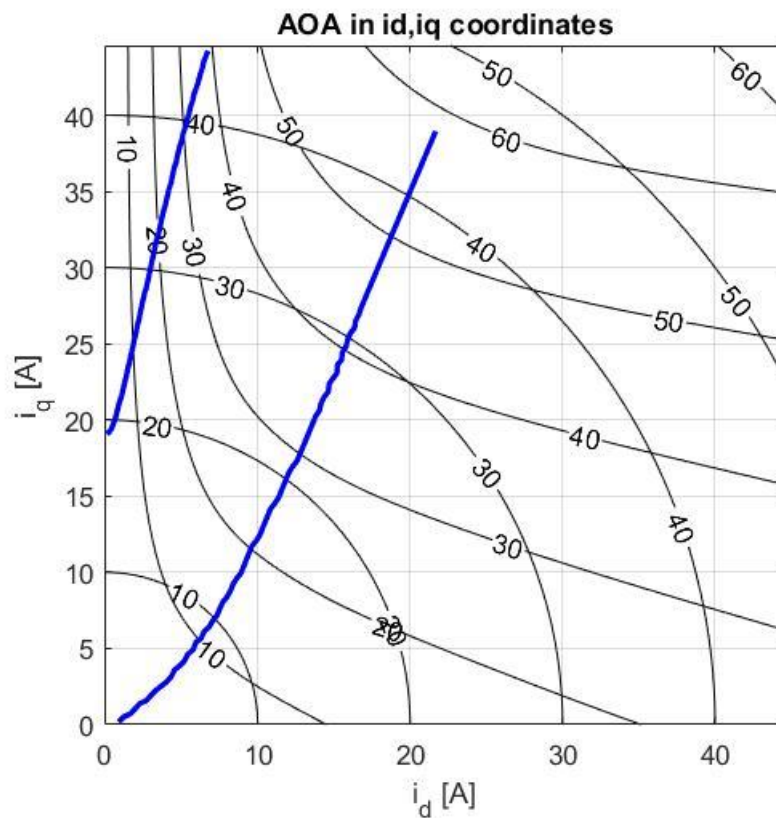


Figura 35-Curve di MTPA ed MTPV

2.7 Processo di ottimizzazione

Effettuate le correzioni necessarie per soddisfare le specifiche, la macchina può essere ottimizzata.

Con la funzione di ottimizzazione di SyR-e è possibile selezionare le grandezze da includere nel calcolo della frontiera di Pareto, oltre che i vincoli geometrici e/o elettrici. In generale vengono inclusi entrambi gli obiettivi di coppia e ripple associato.

3 Automatizzazione del progetto dei magneti

3.1 Descrizione del problema

Il passaggio dai magneti fittizi a quelli reali, come visto in precedenza, equivale al calcolo eseguito tramite l'equazione (7). Rielaborando:

$$B_r \times PM\ Volume = B_r' \times PM\ Volume' \quad (9)$$

Nell'impostazione di un problema 2D, anziché i volumi, vengono prese in considerazione le sezioni di barriera, nota la lunghezza di macchina.

Nonostante la semplicità di calcolo, l'operazione descritta non viene eseguita direttamente da SyR-e: essa, infatti, è da svolgersi in maniera totalmente manuale.

È su questo aspetto che si concentra il lavoro di tesi: rendere tale procedura semi-automatica ed eseguibile dall'interfaccia del software.

Con semi-automatica si intende che il riempimento non avviene in maniera autonoma, ma è l'utente che fissa il prodotto tra induzione residua e area di barriera occupata dal magnete reale.

In questo modo è possibile regolare la quantità di magneti da inserire, tenendo sempre in considerazione il prodotto associato ai magneti fittizi.

3.2 Modifiche implementate in SyR-e

Le modifiche riguardano sia la parte di codice che d'interfaccia grafica.

Dal punto di vista del codice, si è trattato di implementare un metodo di tracciamento e calcolo delle aree, che si appoggiasse ai punti fondamentali della geometria di barriera.

Le aree vengono quindi utilizzate per l'esecuzione dei prodotti con i valori di induzione residua del materiale che si desidera usare.

I valori finali vengono riportati sulla GUI, in appositi campi aggiuntivi abilitabili solo per le geometrie 'Seg' e 'ISeg'. L'abilitazione è subordinata alla scelta di una delle due geometrie (Figura 36).

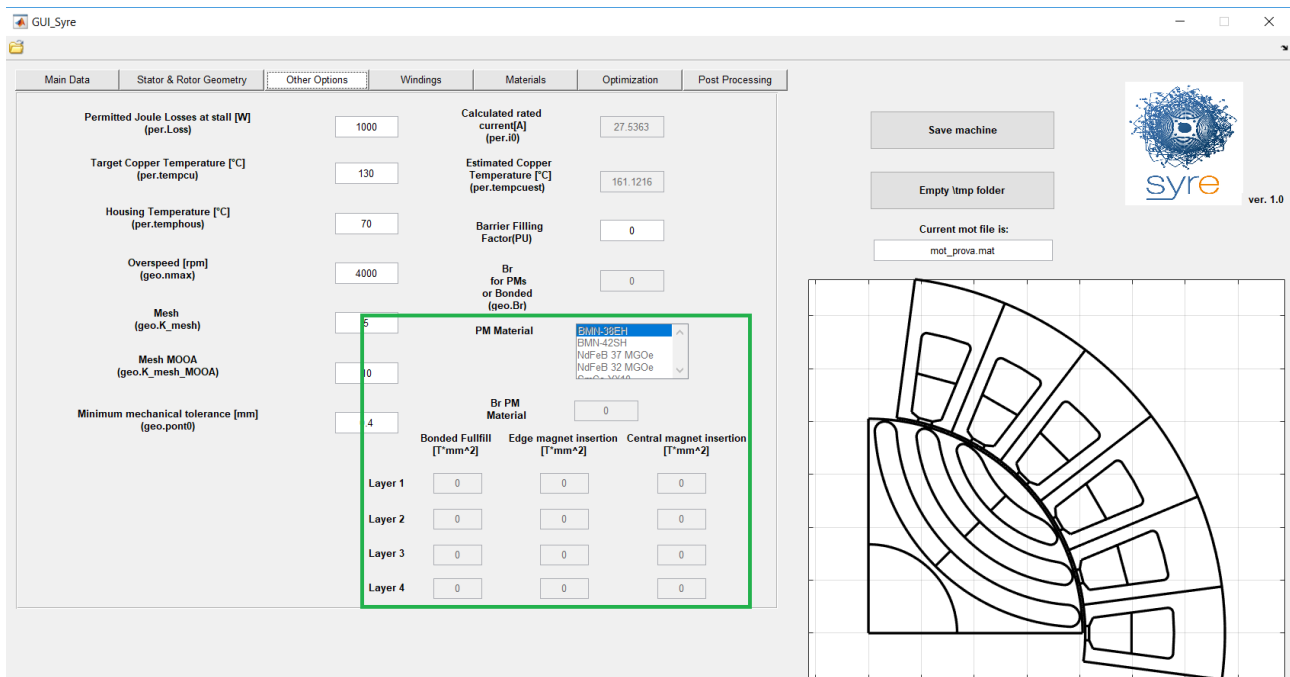


Figura 36-Campi per l'inserimento del magnete nella schermata 'Other Options'

Nel lavoro proposto, è possibile operare l'inserimento dei magneti per una struttura con un numero massimo di strati pari a 4; tuttavia, il numero è ampliabile.

La prima colonna di caselle è associata al materiale fittizio, le altre due fanno riferimento al materiale vero.

Il materiale di riempimento predefinito è l'aria: di conseguenza, i campi saranno inizialmente nulli. I materiali magnetici sono selezionabili da un apposito menù 'PM Material', integrato anch'esso nella schermata 'Other Options'. Questi fanno parte di quelli già inseriti nella libreria esistente.

I valori corrispondenti di induzione residua sono riportati direttamente sotto la lista ('Br PM Material').

Di default, la voce 'Br for PMs or Bonded' è disabilitata per le geometrie in esame, a meno di selezionare il 'Bonded-Magnet'.

A differenza del magnete reale, quello fittizio ha dei campi modificabili tramite la finestra 'Materials'; impostata la voce 'Bonded-Magnet', verrà abilitata la casella 'Br for PMs or Bonded'.

Fatto ciò, sarà possibile agire sul valore del B_r e riempire i campi del 'Bonded-Magnet'. Essi, tuttavia, non saranno modificabili manualmente, per le ragioni di progetto precedentemente spiegate.

Come si può vedere, le aree sono delimitate da delle linee rosse: a meno di cambiamenti sui corrispettivi valori, avranno la massima estensione compatibile con la geometria di barriera.

L'eventuale modifica comporterà il ricalcolo delle aree e l'aggiornamento del disegno sulla GUI.

Entrando nello specifico, con riferimento alla geometria Seg, è stata adottata la procedura esposta di seguito.

3.3 Identificazione dei punti per il tracciamento ed il calcolo delle aree

L'identificazione è stata realizzata con un opportuno script, denominato "area_magnet_Seg", consistente in una funzione con input le strutture 'geo' e 'temp'.

Le due strutture contengono l'una i dati geometrici della macchina (struttura 'geo'), l'altra le coordinate dei punti necessari alla costruzione della barriera (struttura 'temp'). A partire da tali coordinate, è possibile individuare i nuovi punti che identificano le aree di effettivo inserimento dei magneti, ed effettuare il calcolo di queste ultime.

Qualitativamente, l'operazione consiste nel tracciare le proiezioni di un lato della barriera sull'altro, in modo da ottenere aree rettangolari (come meglio indicato in Figura 32).

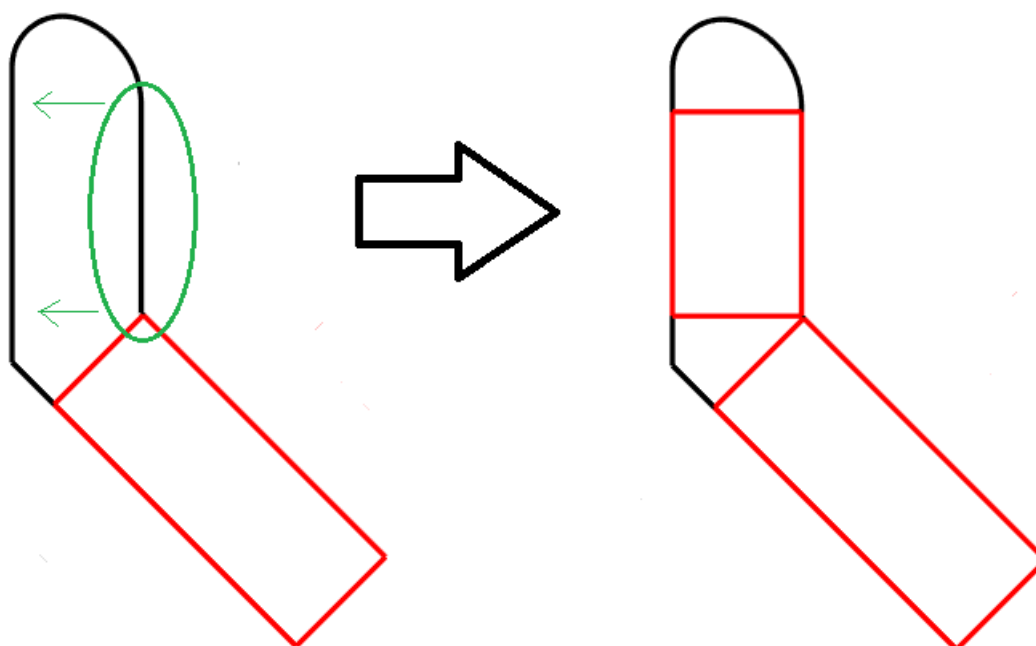


Figura 37-Proiezione per l'ottenimento dell'area rettangolare a partire dai punti caratteristici della geometria

Data la simmetria rispetto all'asse bisettore del polo, il processo viene applicato solo a metà di esso, salvo poi essere esteso per semplice ribaltamento dei punti.

Le informazioni vengono quindi salvate all'interno delle stesse strutture in ingresso, sotto forma di una matrice di coordinate e di quattro vettori, contenenti i valori delle aree.

La matrice, denominata 'Mag', è organizzata in modo che ogni riga corrisponda ad una linea di delimitazione delle aree. La sua struttura viene in questo modo mantenuta analoga a quella della matrice 'Rot', che raccoglie i collegamenti per la ricostruzione delle barriere di flusso (linee ed archi).

Come si può notare dalle figure precedenti, la scelta è stata quella di escludere spigoli e punte delle barriere, considerandole come zone non riempibili. Ciò porta a "spezzare" le superfici, definendo i quattro vettori menzionati, ovvero 'Areaob0', 'Areaob', 'Areavert0', 'Areavert' ed 'Areatot'.

I due vettori '0' vengono calcolati solo durante la ricostruzione iniziale, essendo associati alla massima superficie occupabile su ciascun tratto di barriera. Gli altri due vettori omonimi, invece, sono quelli che subiscono le variazioni volute dall'utente.

Il vettore 'Areatot' viene invece utilizzato per definire il volume 1 p.u. occupabile dal materiale fittizio (ovvero tutta la barriera ad esclusione della punta).

Le nomenclature nello script seguono la Figura 33.

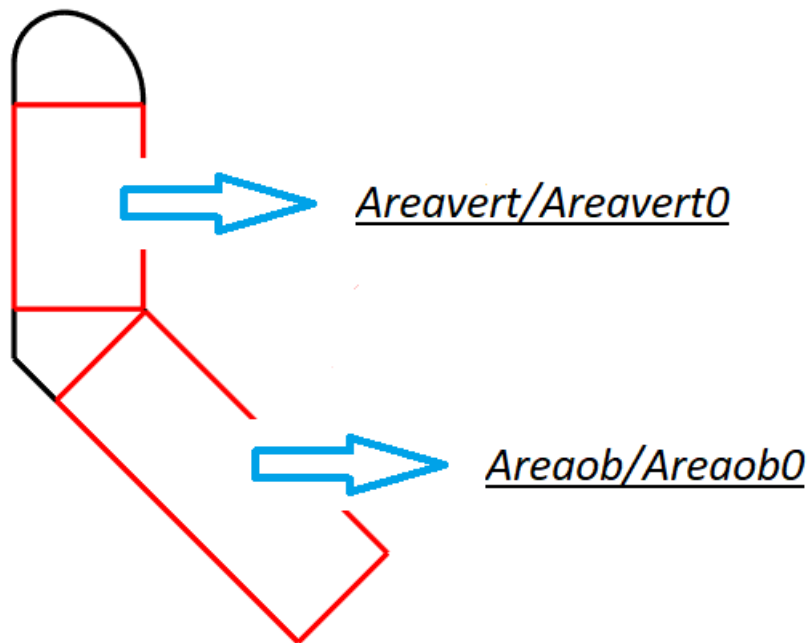


Figura 38- Nomi utilizzati per ciascuna area

3.4 Compatibilità della soluzione con il codice preesistente.

Oltre a raffigurarle su un polo della macchina sulla GUI, è necessario che le aree vengano riprodotte anche sul corrispettivo modello FEM. La modifica è una semplice estensione del codice, introdotto per il tracciamento grafico sulla GUI, anche al disegno su FEMM.

Un aspetto fondamentale riguarda la definizione del materiale in ciascuna parte della barriera, con spigoli e punte che non devono in ogni caso presentare riempimento con materiale magnetico. Vengono allora ricalcolati, tenendo in conto la nuova suddivisione, i centri di ciascuna zona; a ciascuna di esse, poi, viene assegnato il materiale.

In Figura 34 viene riportato un esempio con un magnete 'NdFeB 32', disponibile nella lista dei materiali.

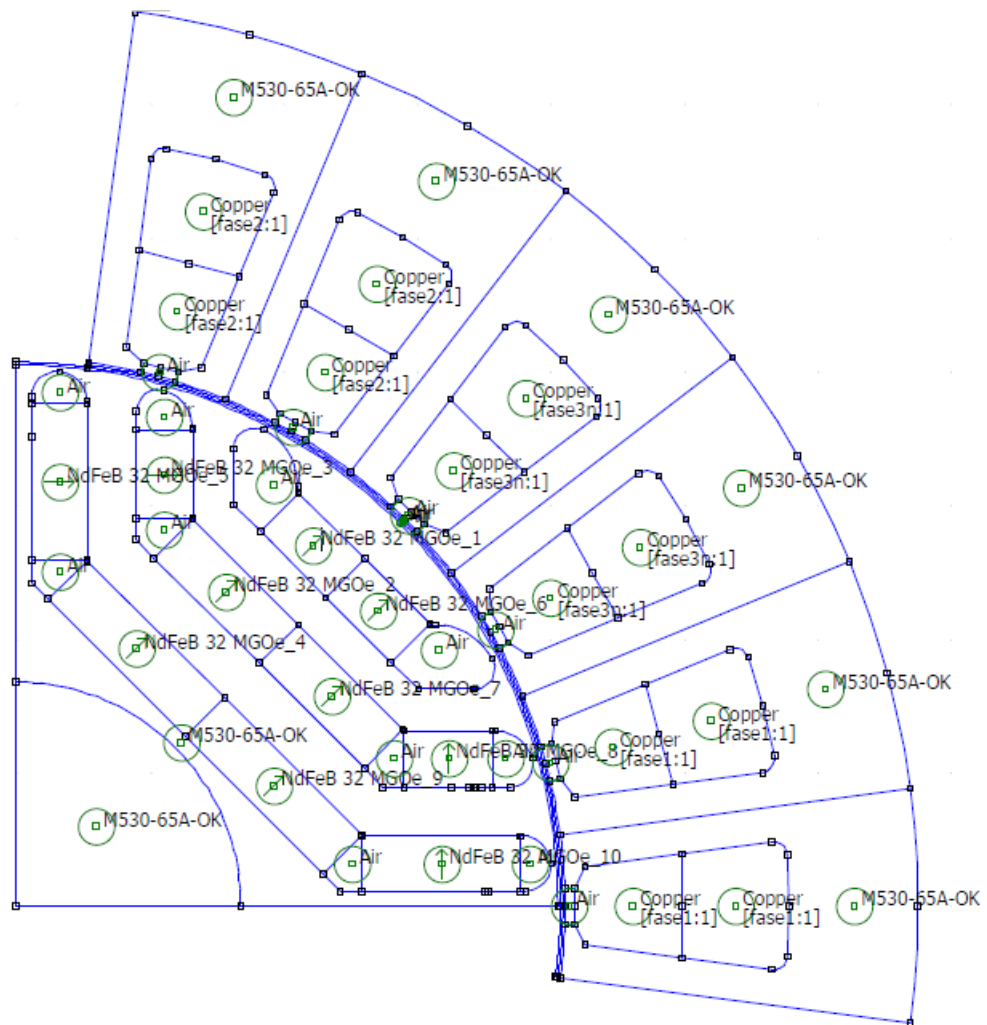


Figura 39-Definizione dei materiali di macchina sul modello FEM

In correlazione a quanto detto, è stato riscontrato, in fase di prova, un problema di compenetrazione degli archi, costituenti le punte, con i lati delle corrispettive barriere. Il materiale non è, in tal caso, definito correttamente su tutte le porzioni di superficie.

La criticità è meglio evidenziata nella Figura 35.



- 1) La regione di spazio indesiderata si viene a creare a causa di un non corretto processo di proiezione. Infatti, nello scegliere il lato da cui partire per effettuarla, andrebbe considerato quale dei due punti 'D1k' e 'D2k' sta più in alto sul proprio lato. La proiezione deve iniziare dal punto che sta più in basso.
- 2) La regione di spazio è determinata da un fattore ancora più rilevante del precedente, ovvero la non sovrapponibilità dei due lati di barriera (non c'è proiezione).

Infine, il 'syrmDesign' non permette, allo stato originario, di tracciare le curve parametrizzate per le geometrie 'Seg' e 'ISeg': ciò a causa dell'assenza del calcolo delle permeanze di barriera.

Nel caso della geometria 'Circular', per determinare la permeanza di barriera viene preso come riferimento il percorso lungo la circonferenza media.

Per la geometria 'Seg', si considera un percorso, spezzato in due tratti (per ciascun semi-polo), che non è esattamente quello medio. Esso, in particolare, si basa sulla posizione del punto indicato con 'pont' sulla figura precedente.

Analogo discorso può essere fatto per la 'ISeg'.

L'approssimazione può essere esaminata con riferimento alla Figura 36.

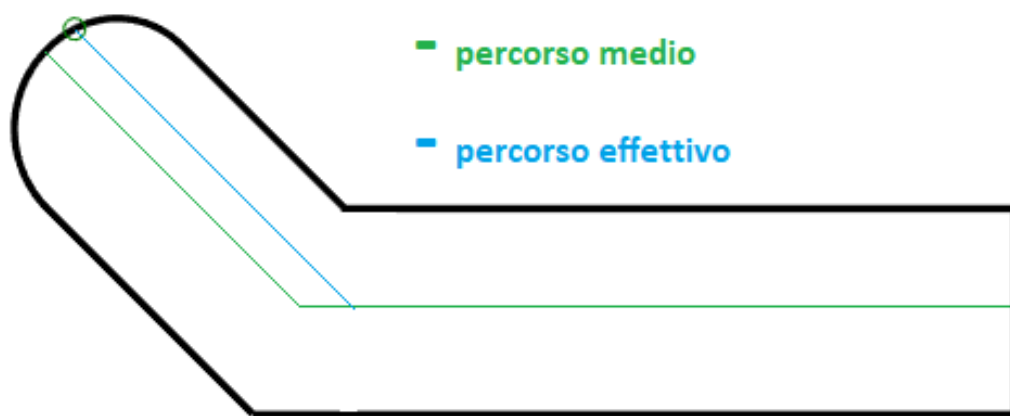


Figura 41-Dettaglio di metà barriera

3.5 Modifica della GUI.

L'aggiornamento dell'interfaccia può essere suddiviso in due fasi.

In primo luogo vanno collocati i "box" per l'inserimento dei valori e la lista dei materiali magnetici.

Si agisce quindi sul file 'GUI_Syre.fig' (vedere Figura 37).

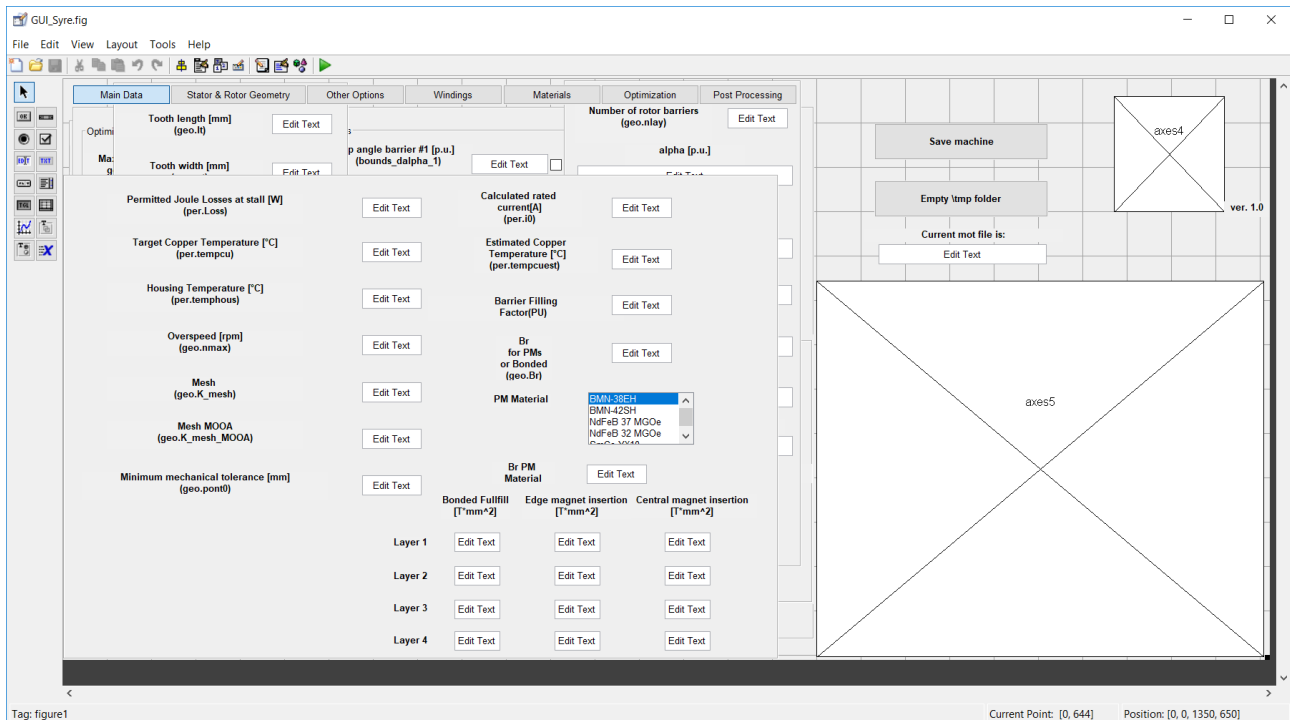


Figura 42-Schermata per la modifica della GUI

Ciascuno dei nuovi box corrisponde alla creazione di una function sul file 'GUI_Syre.m', ovvero il file di costruzione dell'interfaccia: è all'interno di queste function che vengono riportate le indicazioni da seguire.

Variazioni sui campi comportano l'esecuzione delle corrispondenti function.

La seconda fase consiste proprio nel ricreare tali function: in esse vengono definiti i modificatori di lunghezza, da applicare ai lati delle aree.

Supponendo di riferirci alla i-esima barriera:

$$dvert(i) = \frac{Areavert(i)}{Areavert0(i)} \quad (10)$$

$$dob(i) = \frac{Areaob(i)}{Areaob0(i)} \quad (11)$$

Il modificatore (inizialmente di valore unitario) viene quindi utilizzato per il ridimensionamento delle aree, facendo nuovamente girare lo script 'area_magnet_Seg'.

Le aggiunzioni effettuate in questa fase sono molteplici, per evitare ambiguità nell'esecuzione del programma.

Innanzitutto, il metodo di abilitazione dei campi deve adattarsi ad una GUI dove il materiale, per geometrie 'Seg' ed 'ISeg', può essere impostato da due posizioni. Sia la lista 'PM Material' che la schermata 'Materials' consentirebbero, infatti, di scegliere il materiale magnetico di riempimento.

La soluzione proposta prevede che, ad una selezione su 'PM Material', corrisponda l'impostazione automatica dello stesso materiale sull'altra finestra. Ciò è vero per i materiali magnetici reali, ma non per quelli fittizi, che non vengono inclusi nella lista. Da qui la necessità, come detto in precedenza, che il progetto dei magneti fittizi passi da 'Materials': scelto 'Bonded-Magnet', il suo Br' sarà indicato in 'Other Options'.

Un altro accorgimento riguarda l'adattamento al numero di strati 'nlay': la sua variazione, porta automaticamente ad abilitare, oppure disabilitare, i campi aggiuntivi.

Il modello del motore all'apertura della GUI, caricato in maniera predefinita, è diverso rispetto a quello originario ('mot_prova' anziché 'mot_01'). Il modello precedente non conteneva, infatti, campi necessari al funzionamento del lavoro svolto. L'aspetto fondamentale, però, è assicurare la compatibilità con il caricamento di progetti esterni (quindi anche lo stesso 'mot_01').

A tal proposito, è sufficiente operare sul file 'back_compatibility.m', aggiungendo i campi vuoti necessari al "workspace" caricato con il progetto.

3.6 Esempio: passaggio da magneti fittizi a magneti reali equivalenti

Viene di seguito sviluppato un esempio su come procedere per la progettazione dei magneti.

In base al secondo dei tre "step" di progetto, è noto il valore di induzione residua dei magneti fittizi. Con riferimento all'esempio sviluppato nel capitolo 2, il valore di Br' era di 0.37 T.

Supponiamo di conservarlo, ai fini di un'analisi qualitativa.

Si ipotizza di mantenere gli stessi dati, cambiando solo la geometria di barriera ('Seg').

Sul menù 'Materials', partendo dal motore SyR individuato con 'syrmDesign', si sostituisce la voce 'Air' con 'Bonded-Magnet' (Figura 43).

The image shows a software interface for selecting materials for a motor design. On the left, there are labels for different components: Slot material, Stator material, Rotor material, Flux barrier material, Shaft material, and Rotor Conductor winding material. Each label is followed by a text box containing the selected material. The 'Flux barrier material' text box contains 'Air' and is circled in red. A blue arrow points from the 'Material Library' section below to this text box. The 'Material Library' section has a title 'Material Library' and a list of materials. The first item in the list is 'Air Bonded-Magnet', which is also circled in red. Below the list, there are four buttons: 'Iron', 'Conductor', 'Magnet', and 'View Prop'. The 'Magnet' button is highlighted with a blue border. At the bottom, there is a note: 'materials can be copied and pasted in the edit text'.

Component	Material
Slot material (geo.BLKLABELSmaterials)	Copper
Stator material (geo.BLKLABELSmaterials)	M530-65A-OK
Rotor material (geo.BLKLABELSmaterials)	M530-65A-OK
Flux barrier material (geo.BLKLABELSmaterials)	Air
Shaft material (geo.BLKLABELSmaterials)	M530-65A-OK
Rotor Conductor winding material (geo.BLKLABELSmaterials)	Copper

Material Library

- Air Bonded-Magnet, BMN-38EH, BMN-42SH, NdFeB 37 MGOe, Virgin Bonded-Magnet 04T, NdFeB 32 MGOe

Iron **Conductor** **Magnet** View Prop

materials can be copied and pasted in the edit text

Figura 43-Selezione del materiale 'Bonded-Magnet' dalla libreria

Fatto ciò, va modificato il valore del campo 'Br for PM or Bonded', situato in 'Other Options'. Il valore di Br' predefinito è 0.5 T, cosa che porta alla compilazione della prima colonna di caselle.

Il valore d'interesse è però 0.37 T, con conseguente ricalcolo dei prodotti induzione/area.

L'aggiornamento è quello riportato in Figura 44.

Br for PMs or Bonded (geo.Br): 0.5

PM Material: BMN-38EH

Br PM Material: 0.5

	Bonded Fullfill [T*mm ²]	Edge magnet insertion [T*mm ²]	Central magnet insertion [T*mm ²]
	12.8444	0	0
	34.2626	0	0
	59.0975	0	0
	0	0	0

Br for PMs or Bonded (geo.Br): 0.37

PM Material: BMN-38EH

Br PM Material: 0.5

	Bonded Fullfill [T*mm ²]	Edge magnet insertion [T*mm ²]	Central magnet insertion [T*mm ²]
	9.5049	0	0
	25.3543	0	0
	43.7322	0	0
	0	0	0

Figura 44-Inserimento del valore di Br' e ricalcolo dei prodotti per nlay=3

Si passa quindi alla scelta del materiale vero, tramite la lista 'PM Material'. Si supponga che la scelta ricada sul 'BMN-42SH' (Figura 45).

Esso ha un valore di induzione residua pari a 1.09 T, indicato su 'Br PM Material'.

Br for PMs or Bonded (geo.Br): 0.37

PM Material: BMN-42SH

Br PM Material: 1.09

	Bonded Fullfill [T*mm ²]	Edge magnet insertion [T*mm ²]	Central magnet insertion [T*mm ²]
Layer 1	9.5049	0	17.1459
Layer 2	25.3543	25.336	40.4428
Layer 3	43.7322	50.6873	66.1167
Layer 4	0	0	0

Figura 45-Scelta del magnete reale da 'PM Material' e calcolo dei prodotti per nlay=3

I valori nelle caselle del magnete reale verranno sostituiti da quelli di progetto; va tenuto in conto che la soluzione è un po' imprecisa, ovvero ci sarà una leggera discrepanza tra i valori digitati e quelli visibili. Ciò lo si nota meglio in Figura 46, dove vengono anche rappresentati i modelli SyR-e e FEM a seguito degli aggiustamenti.

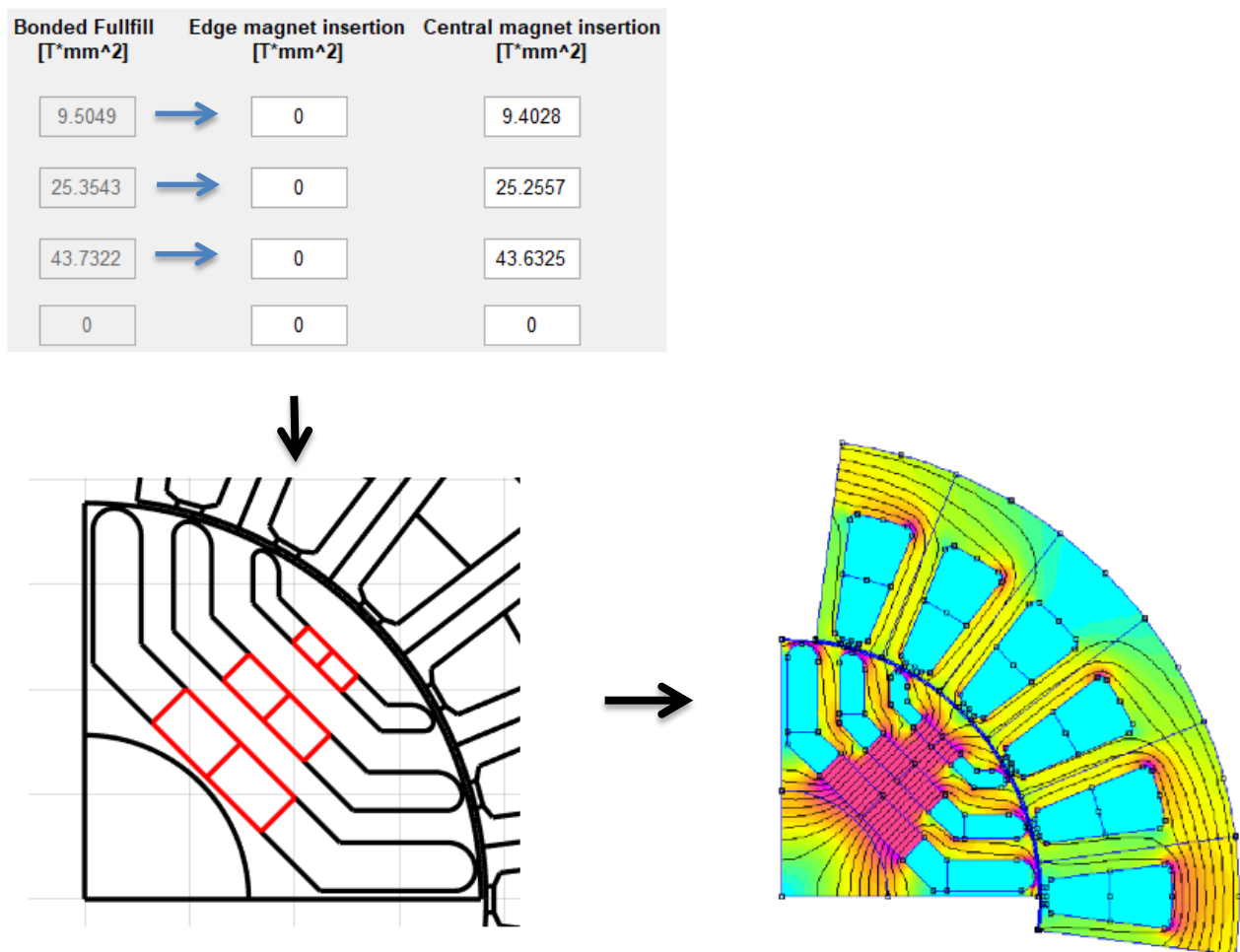


Figura 46-Correzione dei campi con conseguente geometria e modello FEM con densità di flusso

3.6.1. Ulteriori verifiche: adozione di magneti diversi nella stessa macchina

È possibile proporre un confronto tra una macchina riempita con il 'NdFeB 32 MGOe' ed una realizzata, ad esempio, con il 'SmCo YX10'.

Il progetto, sviluppato dalla macchina SyR usata nelle esempio precedente, porta alla determinazione di un Br' pari a 0.33 T.

La differenza è ovviamente riscontrabile nel grado di riempimento delle barriere, per via del diverso valore di induzione residua dei due materiali.

L'induzione B_r del 'NdFeB 32 MGOe' è pari a 1.16 T, a dispetto dei 0.6 T per il 'SmCo YX10'.

Nelle figure successive, si confrontano i risultati per le due macchine in esame. Il 'post-processing' è eseguito con delle simulazioni a 2.5 p.u. del valore di corrente nominale.

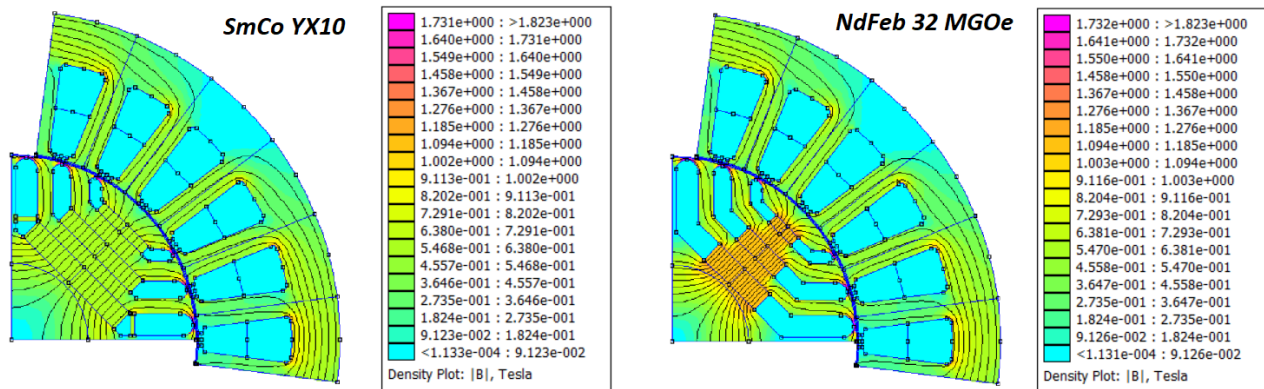


Figura 47-Densità di flusso a confronto: a sinistra il modello con 'SmCo YX10, a destra quello con 'NdFeB32 MGOe'

Dalla Figura 47 si può notare la maggior concentrazione di materiale magnetico 'NdFeB 32 MGOe'.

In Figura 48 vengono confrontate le curve magnetiche, senza che vi siano sostanziali differenze.

Il flusso in asse q tende ad assumere un valore prossimo allo zero in corrispondenza del valore di corrente caratteristica (corrente nominale di circa 23.5 A).

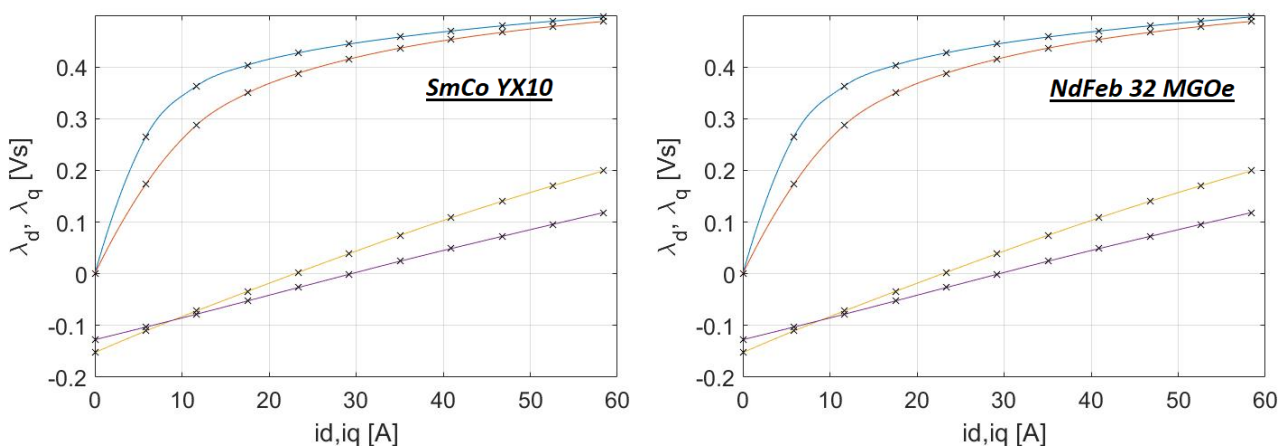


Figura 48-Curve magnetiche dei due motori su un intervallo di corrente 0-2.5 p.u.

Un ulteriore confronto riguarda le prestazioni di potenza e coppia sull'intervallo di velocità (rispettivamente Figura 49 e Figura 50). Il confronto è effettuato su un range che va da 0 a 8000 rpm.

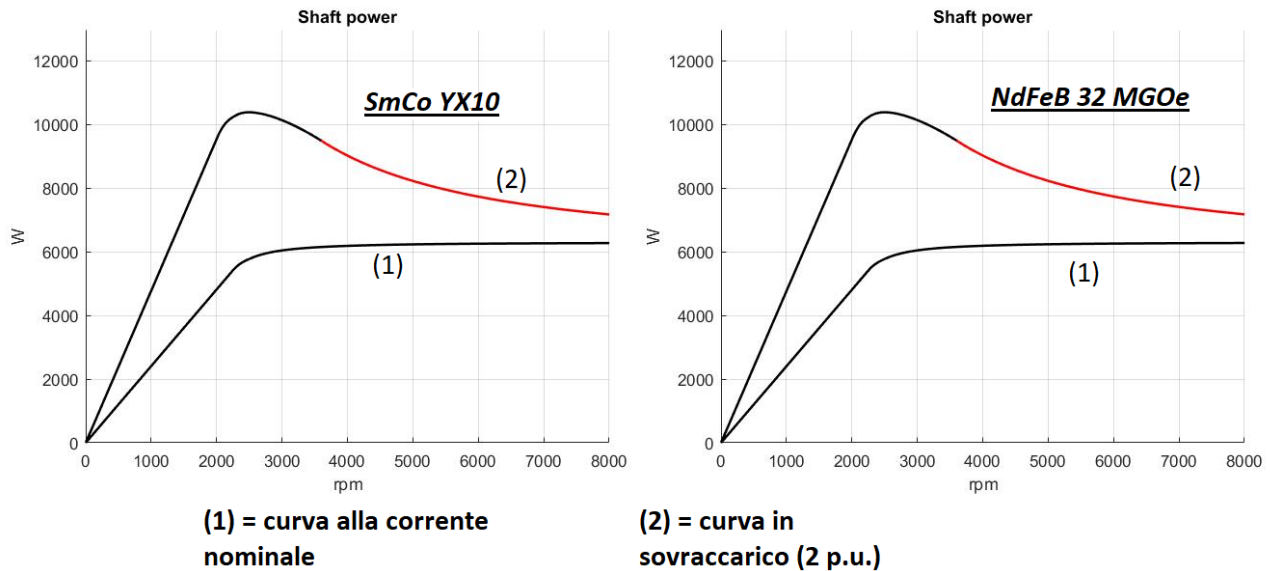


Figura 49- Curve potenza-velocità

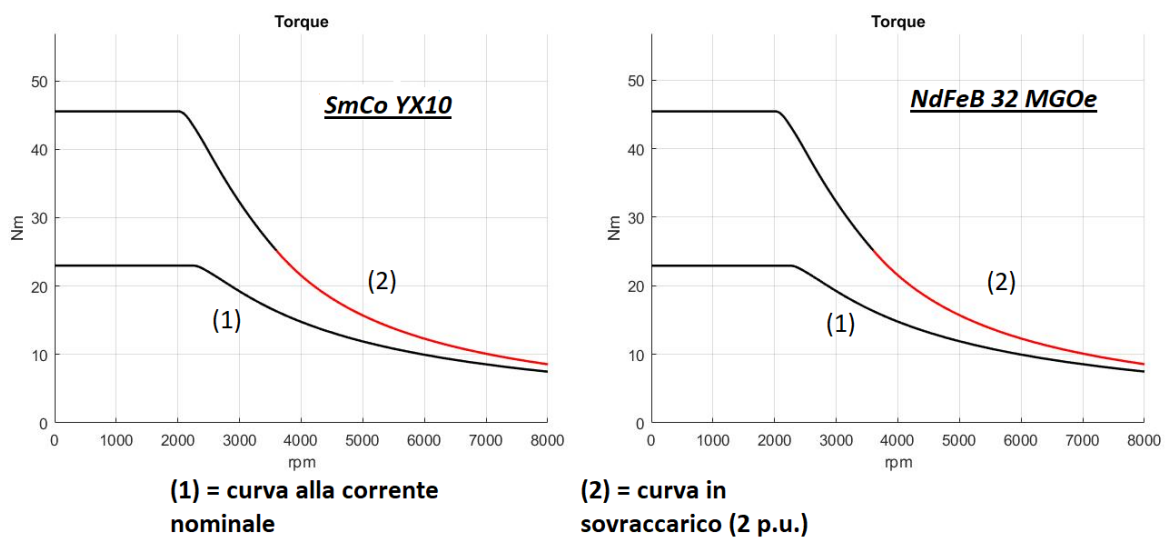


Figura 50-Curve coppia-velocità

Le curve vengono ottenute su due valori di corrente, ovvero 1 p.u. e 2 p.u. del valore nominale.

In definitiva, le prestazioni riprodotte dai due motori sono praticamente le stesse, con qualche leggera differenza (non percepibile dai grafici). Questo a causa delle imprecisioni di calcolo associate al metodo proposto, che non applica una perfetta equivalenza tra i quantitativi di magneti.

3.7 Estendibilità del metodo ad altre geometrie di barriera

Come detto in precedenza, la 'ISeg' si presenta molto simile alla 'Seg', con dei punti caratteristici analoghi (Figura 51 e Figura 52).

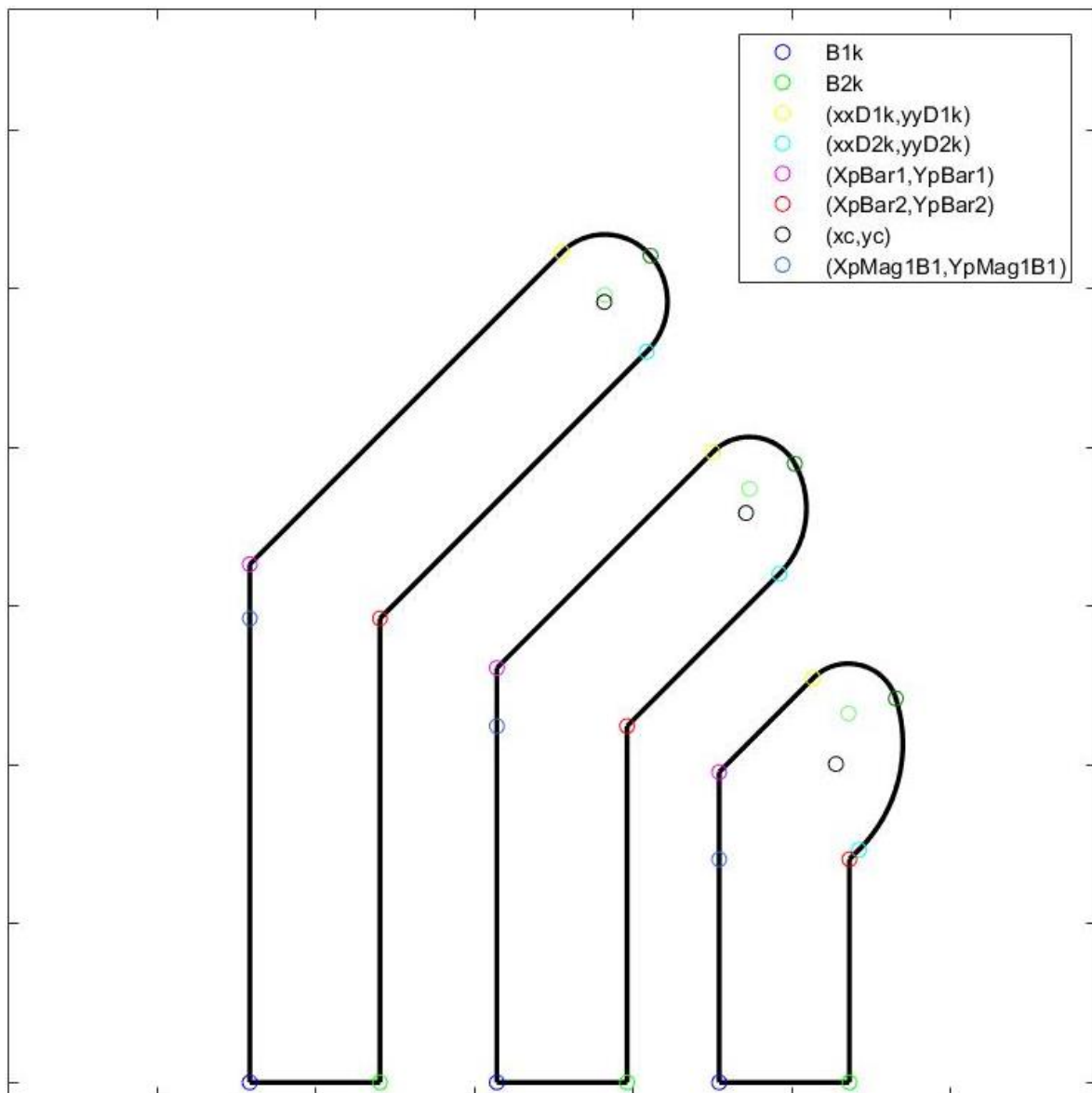


Figura 51-Geometria Seg e punti caratteristici

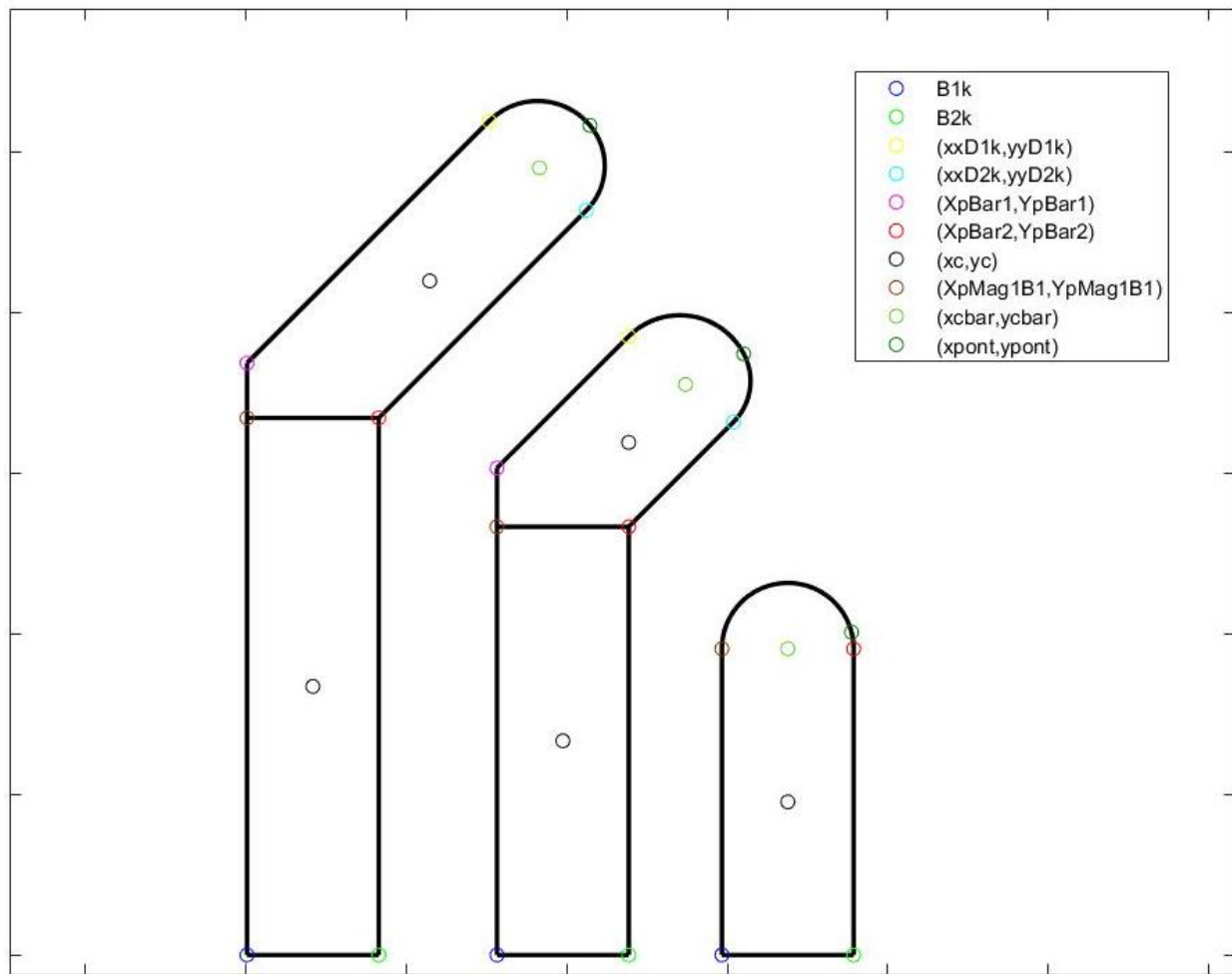


Figura 52-Geometria ISeg e punti caratteristici

Ciò considerato, l'estensione del lavoro svolto è alquanto semplice.

Il discorso è diverso per le geometrie 'Circular' e 'Fluid' , le quali presentano sostanziali differenze rispetto alle precedenti.

4 Risultati

4.1 Motore a riluttanza RAW Power e prestazioni di riferimento

Come riportato nel capitolo introduttivo, i motori presi come riferimento sono due: il primo è un SyR RAW Power di cui è disponibile un prototipo, il secondo corrisponde alla versione “PM-assisted” del precedente, progettata con l’utilizzo di SyR-e. Del prototipo sono note le specifiche, mentre le prestazioni sono state calcolate per entrambi.

La macchina prototipo è ottenuta da un motore ad induzione, al quale viene sostituito il rotore con uno di tipo sincrono. Di seguito se ne indicano i dati di progetto.

Dati di progetto - motore SyR RAW Power

Potenza	kW	4.8
Coppia	Nm	19.4
Velocità	rpm	2420
Tensione di linea	V(rms)	380
Corrente di fase	A(pk)	15
Frequenza	Hz	50
Paia poli		3
PF		0.70
Efficienza		85.0 %

La struttura del motore è quella di Figura 53.

I files corrispondenti sono contenuti nella directory di SyR-e, con il nome di “IEMDC2017”.

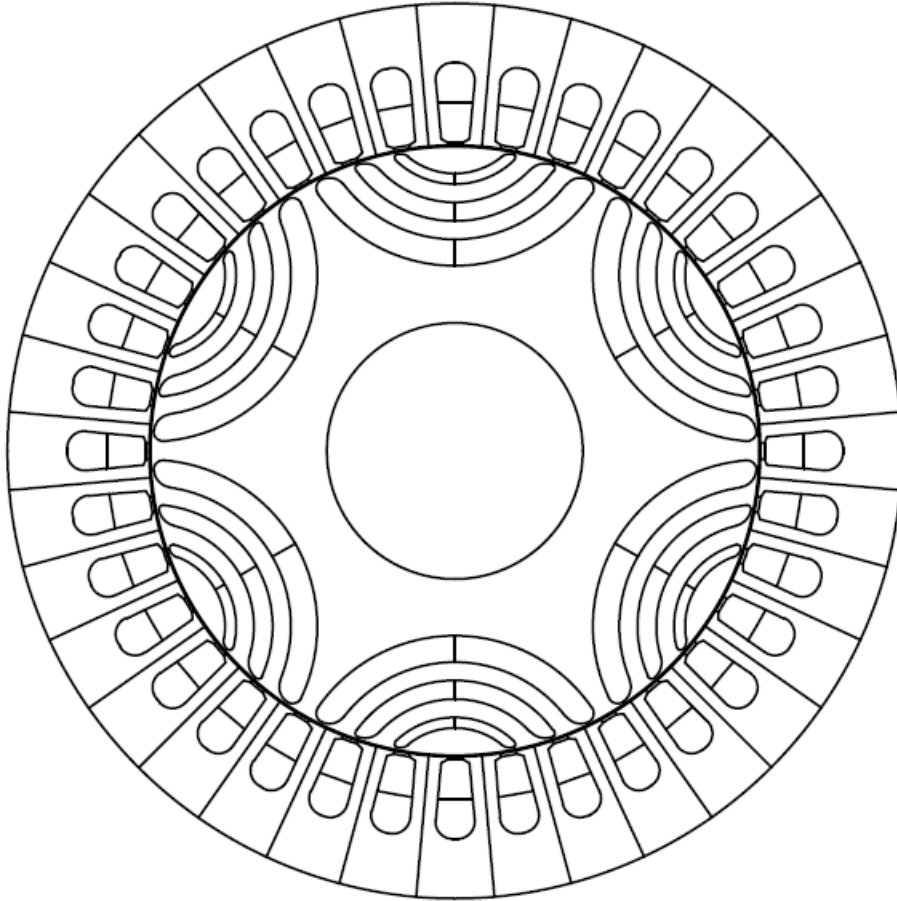


Figura 53-Motore SyR RAW Power

La macchina è stata ottimizzata con riferimento alla coppia media erogata ed al ripple di coppia.

Le prestazioni vengono calcolate sulla base di un target di potenza di 6.8 kW @ 6000 rpm, per generica applicazione industriale.

I dati in input al software sono quelli della seguente tabella:

Dati in input sulla GUI	Valore di riferimento
Dimensioni dello stack	
Diametro esterno di macchina (D)	175 mm
Lunghezza dello stack (L)	110 mm
Spessore traferro (g)	0.325 mm
Raffreddamento	
Carico termico specifico (K_j)	2.8 kW/m ²
Temperatura del rame	80°C
Altri dati	
Numero di coppie polari (p)	3
Numero di cave per polo e per fase (q)	2
Numero di cave statoriche	36
Fattore di riempimento di cava (K_{Cu})	0.46
Numero di barriere per polo (nlay)	3
Picco di induzione magnetica nel ferro (B_{Fe})	1.4 T
Fattore di larghezza di dente (K_t)	0.88
Numero di spire in serie per fase (N_s)	120

Le curve magnetiche sono ricavate con un valore di corrente pari a 2.5 p.u. di quello nominale (Figura 54).

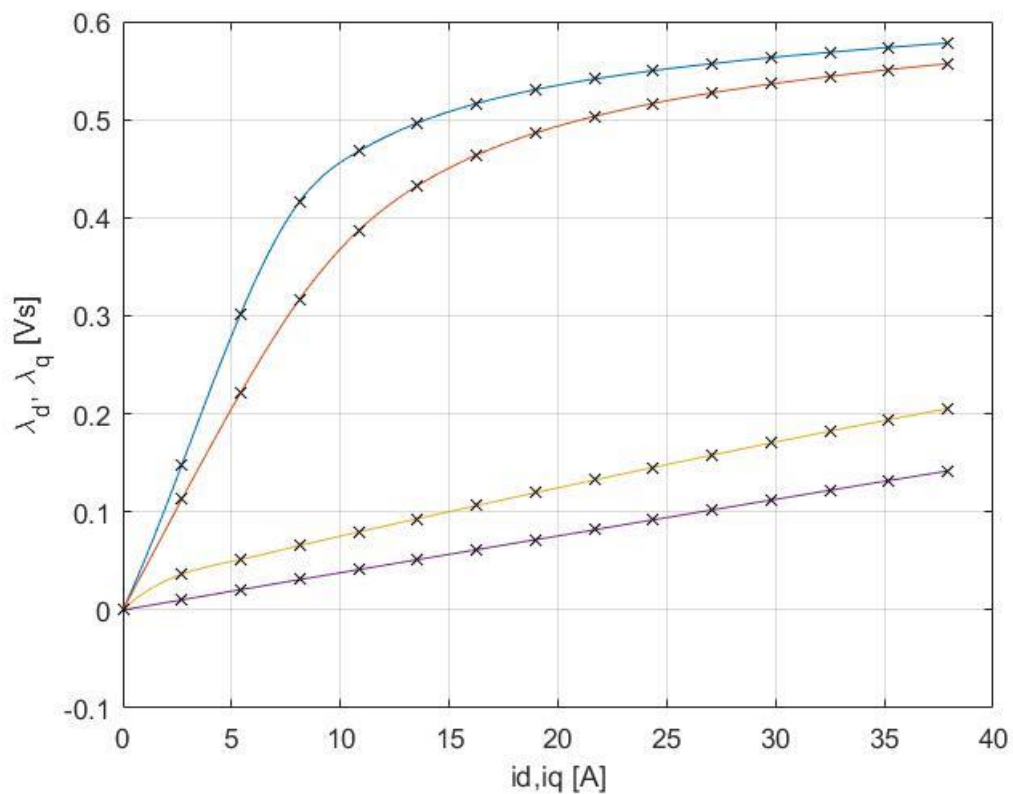


Figura 54-Curve magnetiche del prototipo RAW Power

Le caratteristiche di coppia e potenza, ottenute in condizioni nominali e di sovraccarico (2 p.u.), sono riferite ad un range di velocità pari a 8000 rpm. Gli andamenti sono, rispettivamente, quelli di Figura 55 e Figura 56.

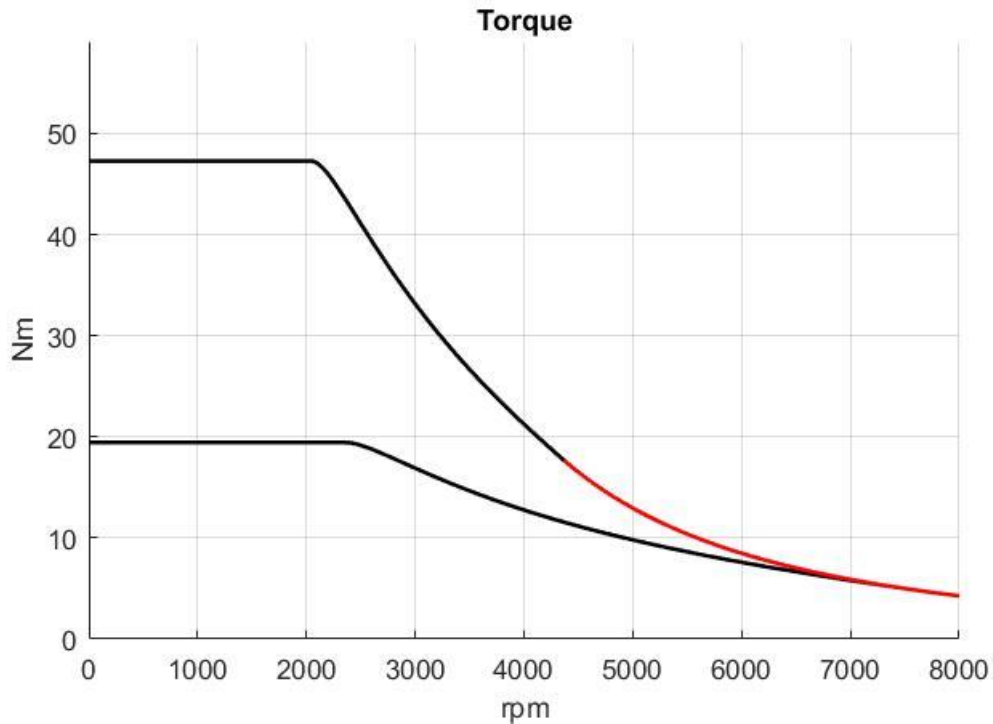


Figura 55-Curve di coppia del prototipo RAW Power in condizioni nominali e di sovraccarico

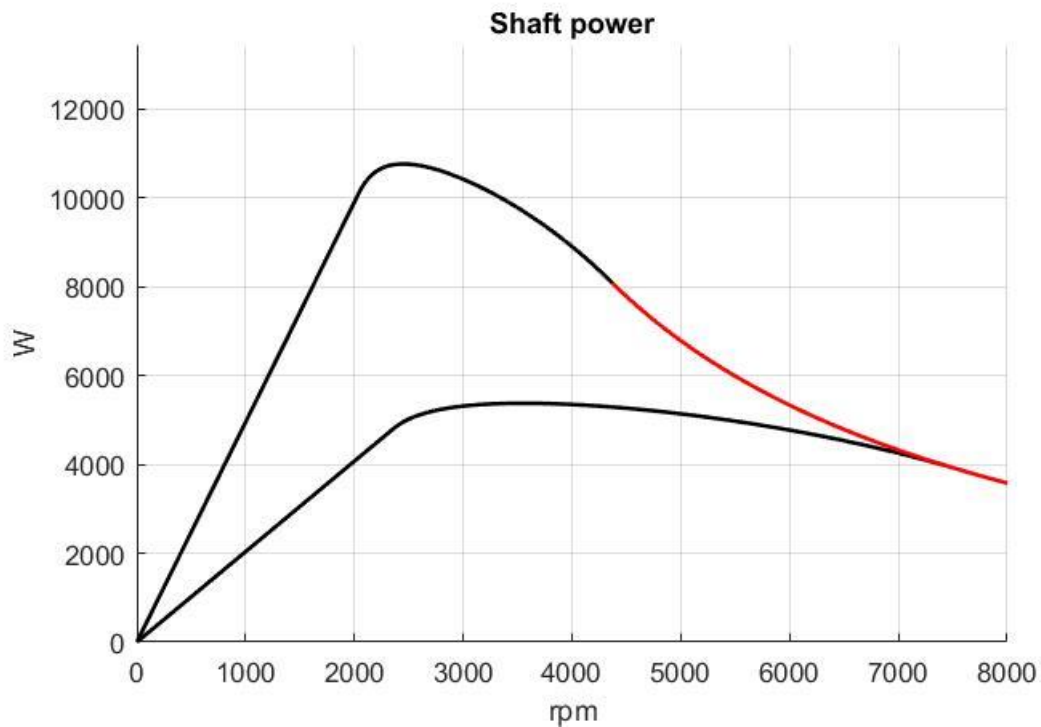


Figura 56-Curva di potenza del prototipo RAW Power in condizioni nominali e di sovraccarico

Rispetto ai soli andamenti di MTPV ed MTPA dell'esempio al capitolo 2, vengono qui riportate delle caratteristiche aggiuntive. Ciò per proporre un più completo confronto con la macchina che verrà progettata nel seguito, la quale dovrà riprodurre delle prestazioni paragonabili al riferimento.

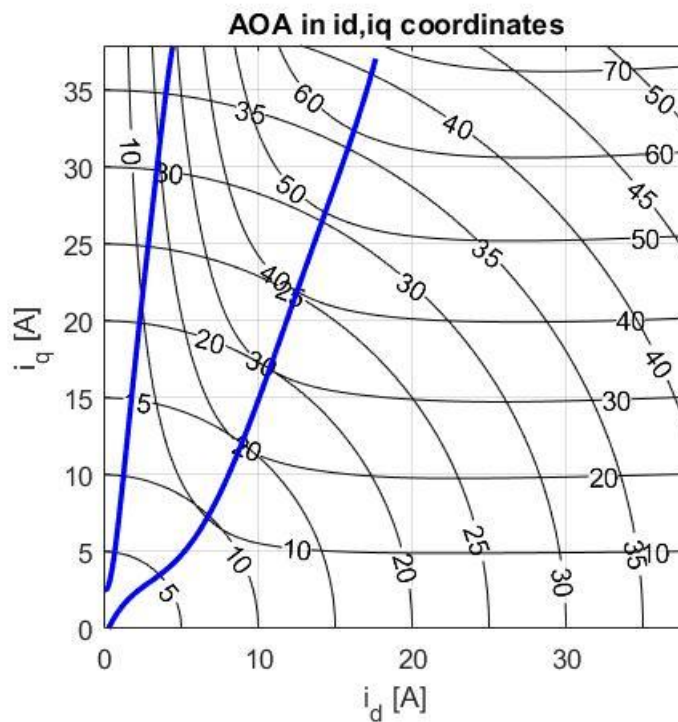


Figura 57-MTPA ed MTPV del prototipo RAW Power

4.2 Progetto della macchina SyR

In questo paragrafo ci si focalizzerà sul progetto di un motore, con geometria rotorica 'Seg', che abbia prestazioni analoghe al prototipo.

A partire dal progetto di default 'mot_prova', vengono inseriti i dati della precedente tabella.

La scelta viene effettuata con il 'syrmDesign', così come indicato in Figura 58.

Il progetto verrà eseguito in modo tale da produrre un confronto, con il motore RAW Power, a parità di tensione e corrente di alimentazione.

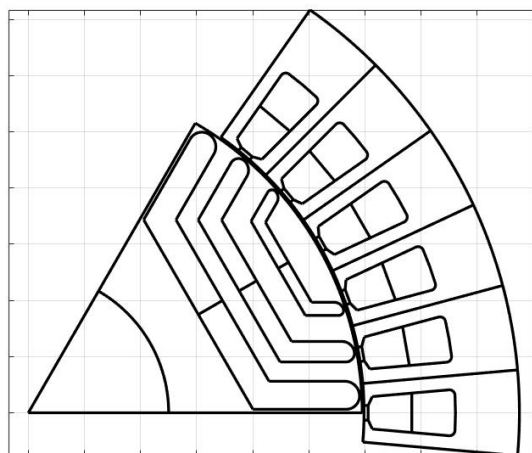
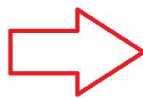
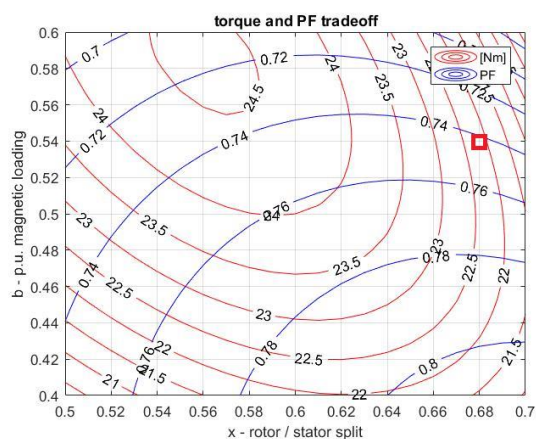


Figura 58-Scelta del motore SyR dal 'syrmDesign'

La macchina selezionata ha un valore di picco di corrente nominale confrontabile con quello del motore RAW Power, ovvero 15 A. In Figura 59 se ne rappresenta la struttura completa.

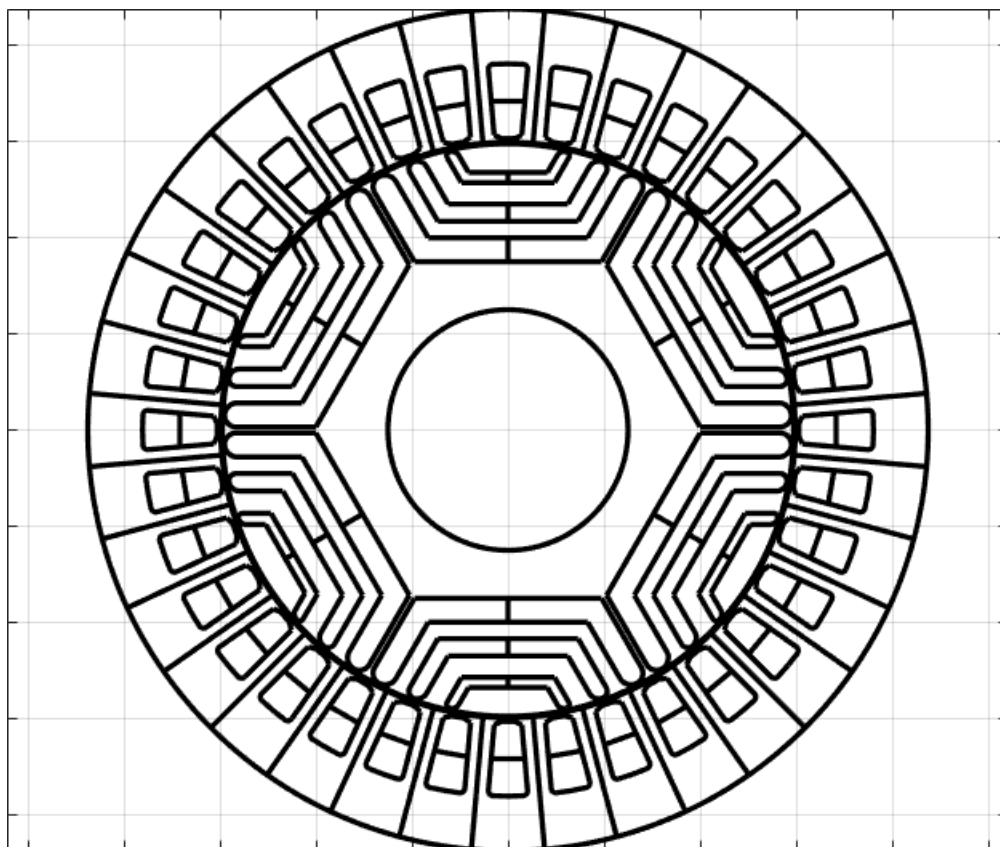


Figura 59- Struttura geometrica del motore SyR progettato

Fatto ciò, si ricavano le mappe di flusso (Figura 60) e si procede all'elaborazione delle curve di coppia – velocità (Figura 61) e potenza – velocità (Figura 62). L'intervallo di velocità per il tracciamento grafico è sempre di 8000 rpm.

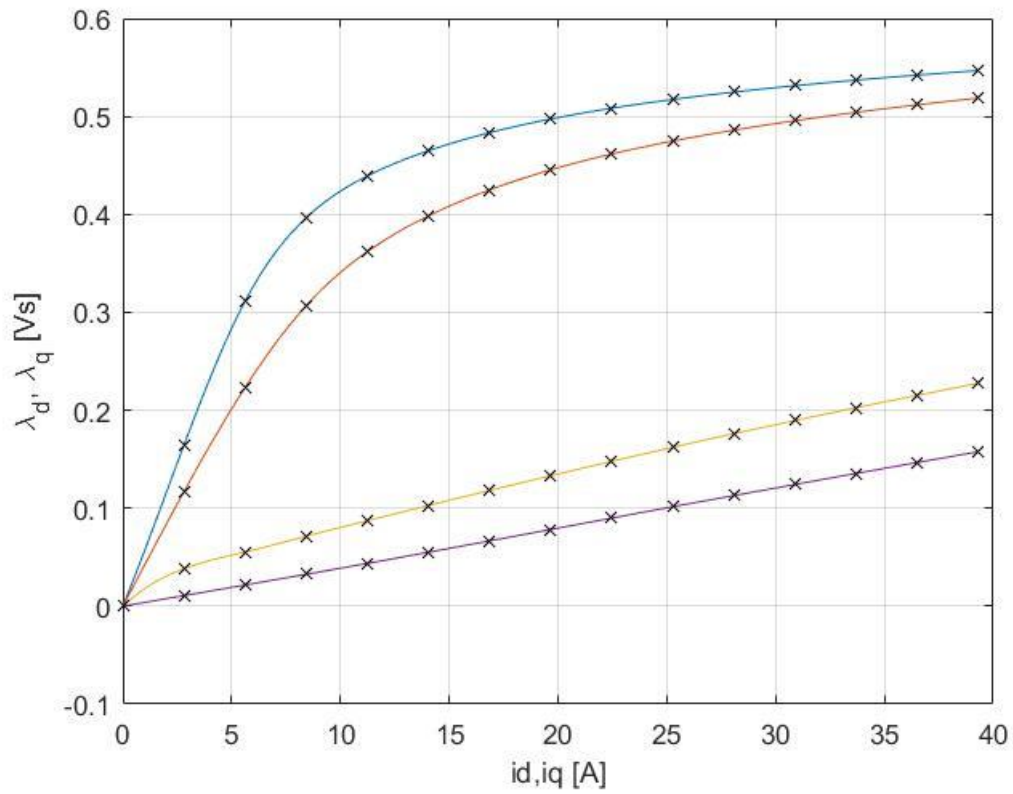


Figura 60-Caratteristiche magnetiche del motore SyR progettato

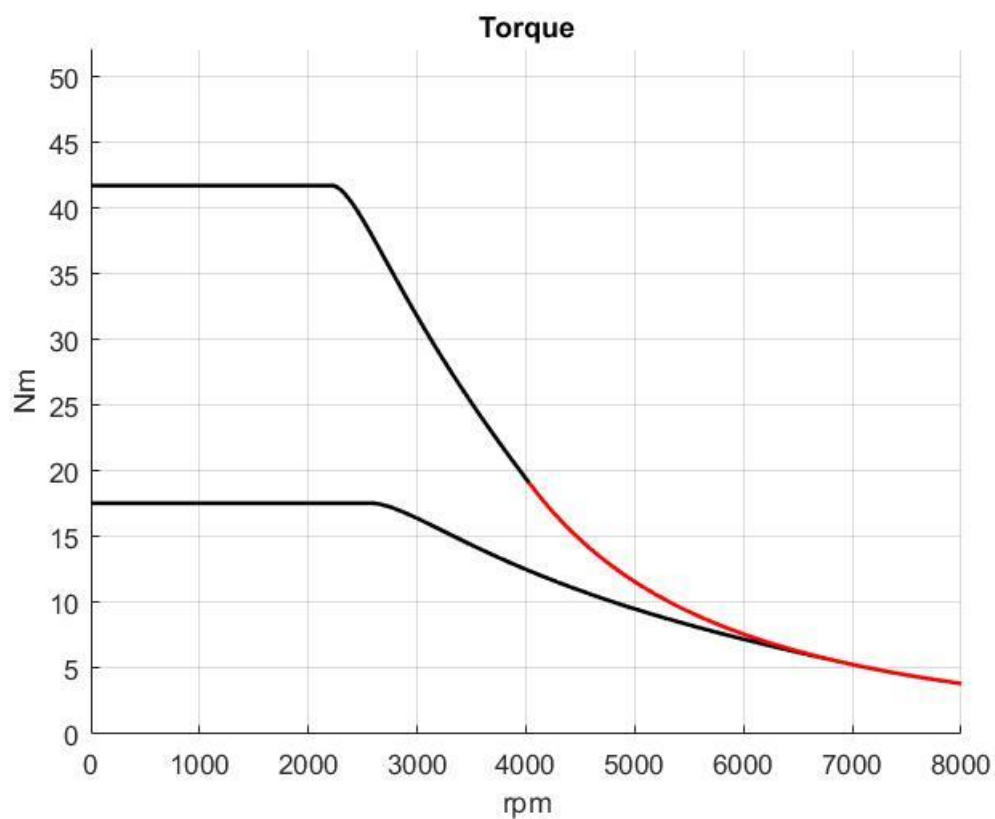


Figura 61-Curve di potenza del motore SyR progettato

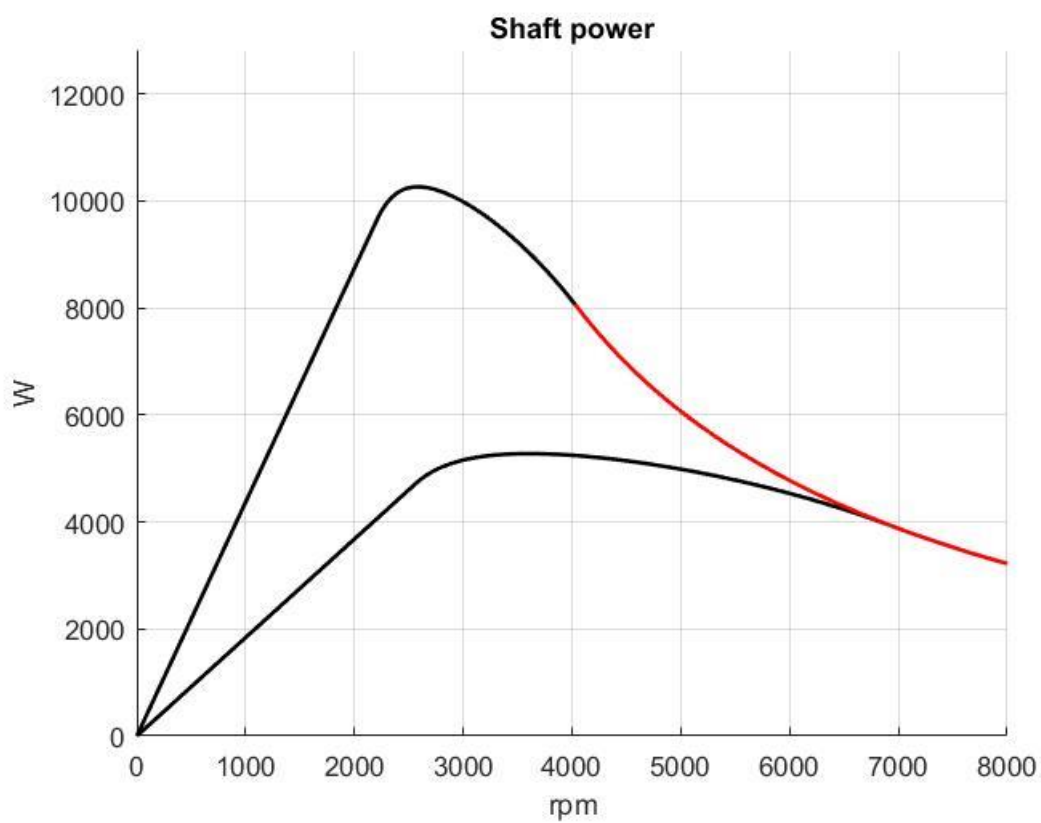


Figura 62-Curve di potenza del motore SyR progettato

Nella Figura 63 si riportano l'MTPA e l'MTPV del motore.

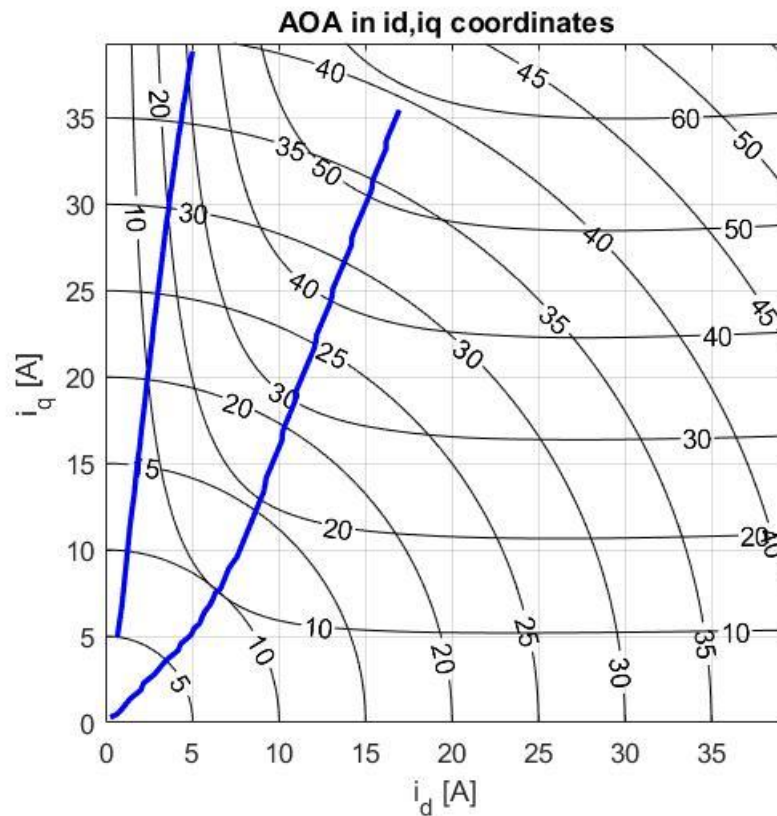


Figura 63-MTPA ed MTPV del motore SyR progettato

A questo punto vanno eseguite le due prove con il 'Bonded-Magnet', in corrispondenza di due valori arbitrari di induzione residua (si supponga nuovamente 0.2 T e 0.4 T). I risultati delle simulazioni sono quelli di Figura 64 e Figura 65.

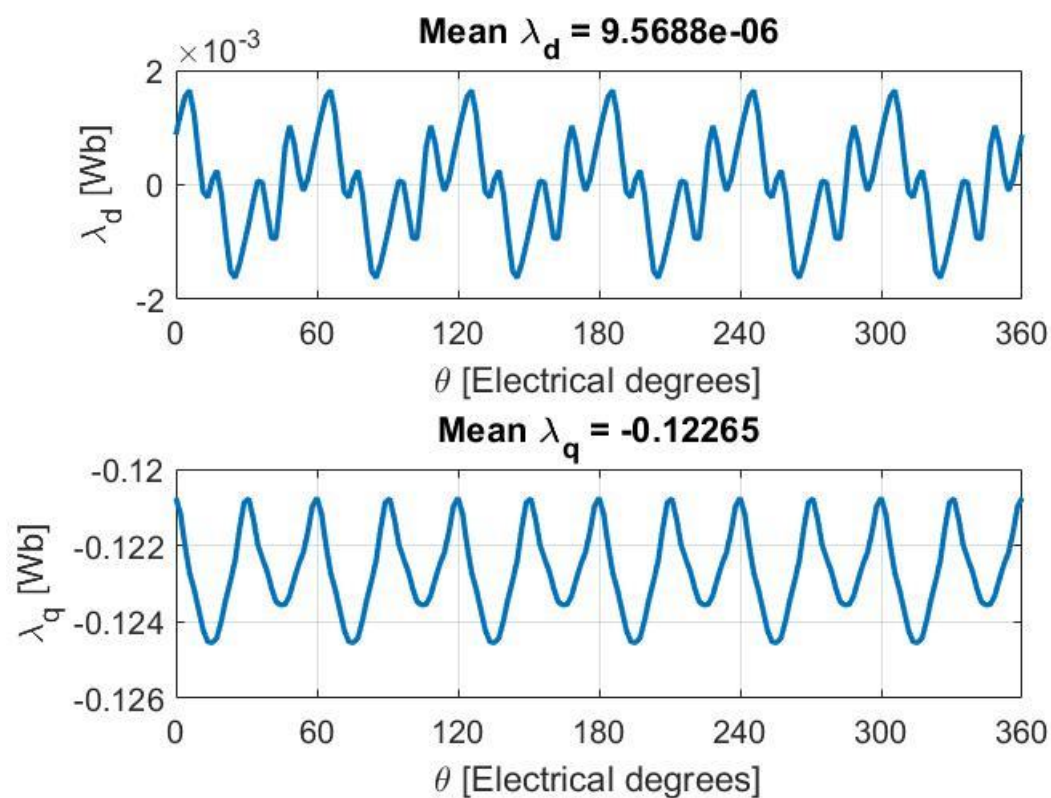


Figura 64-Andamenti di flusso per Br=0.2 T

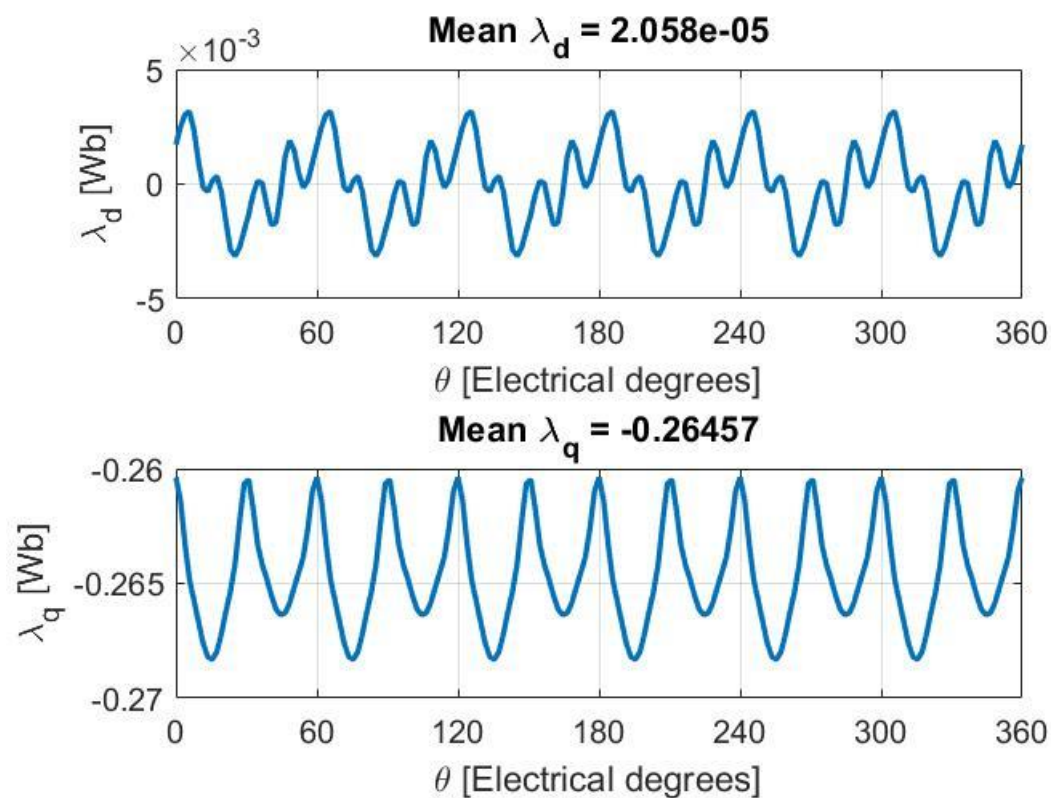


Figura 65-Andamenti di flusso a Br=0.4 T

La terza FEA (dal SyR di partenza) restituisce l'andamento di flusso in asse q di Figura 66.

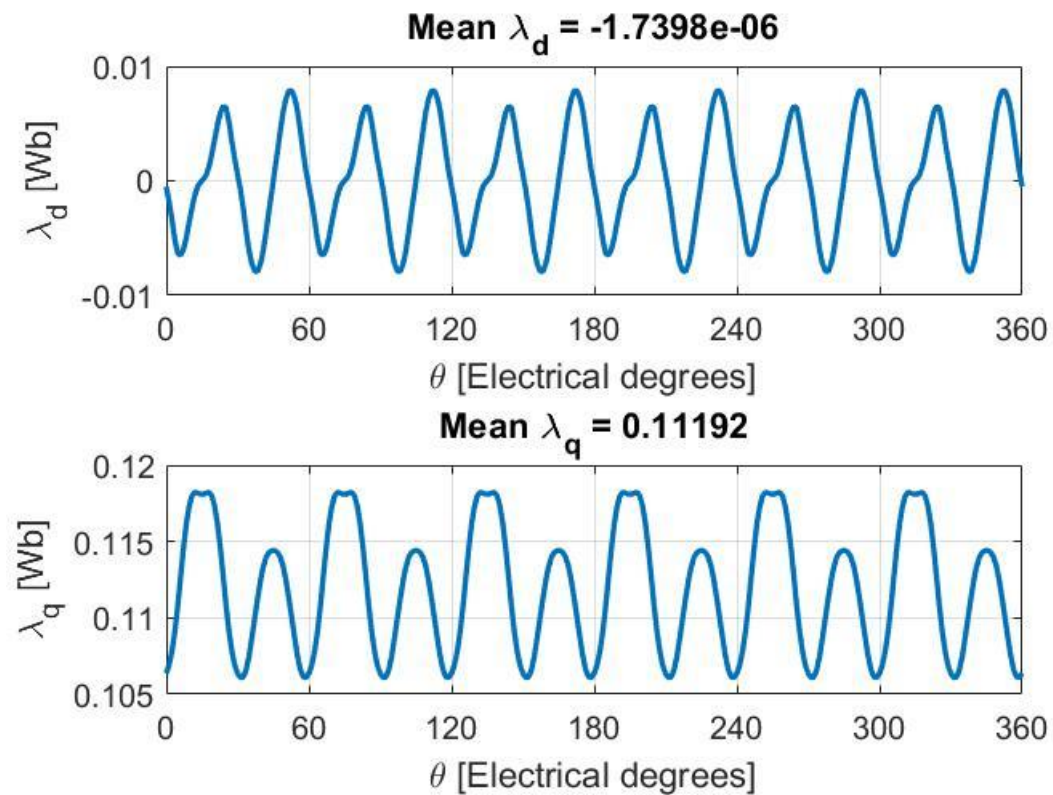


Figura 66-Andamenti di flusso per corrente in asse q di valore 1 p.u.

Il valore di induzione del magnete fittizio equivalente che ne deriva è di 0.158 T.

L'equivalenza viene effettuata con due diversi tipi di magnete reale, ovvero una ferrite ed un neodimio.

4.3 Versione 1: magneti in ferrite

Il materiale selezionato viene opportunamente inserito nella libreria dei materiali, sotto il nome di 'Ferrite 35H'.

In Figura 67 vengono raffigurati i due modelli FEMM del PM-SyR con ferrite.

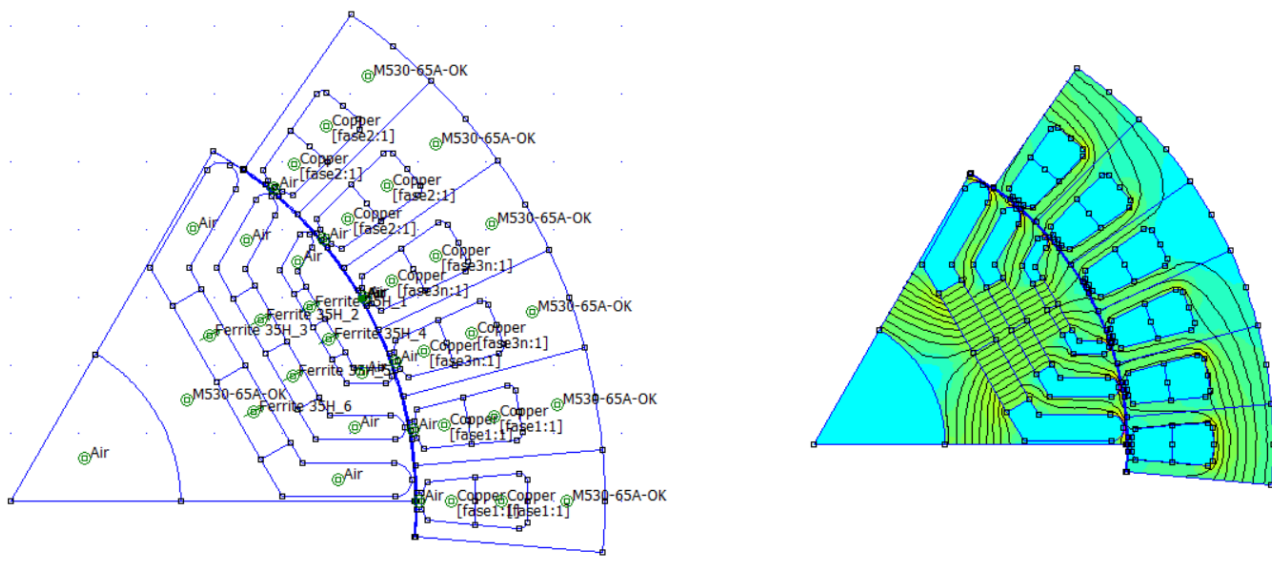


Figura 67-Modello FEMM del PM-SyR con ferrite

Le prestazioni in coppia e potenza sono quelle di Figura 68 e Figura 69.

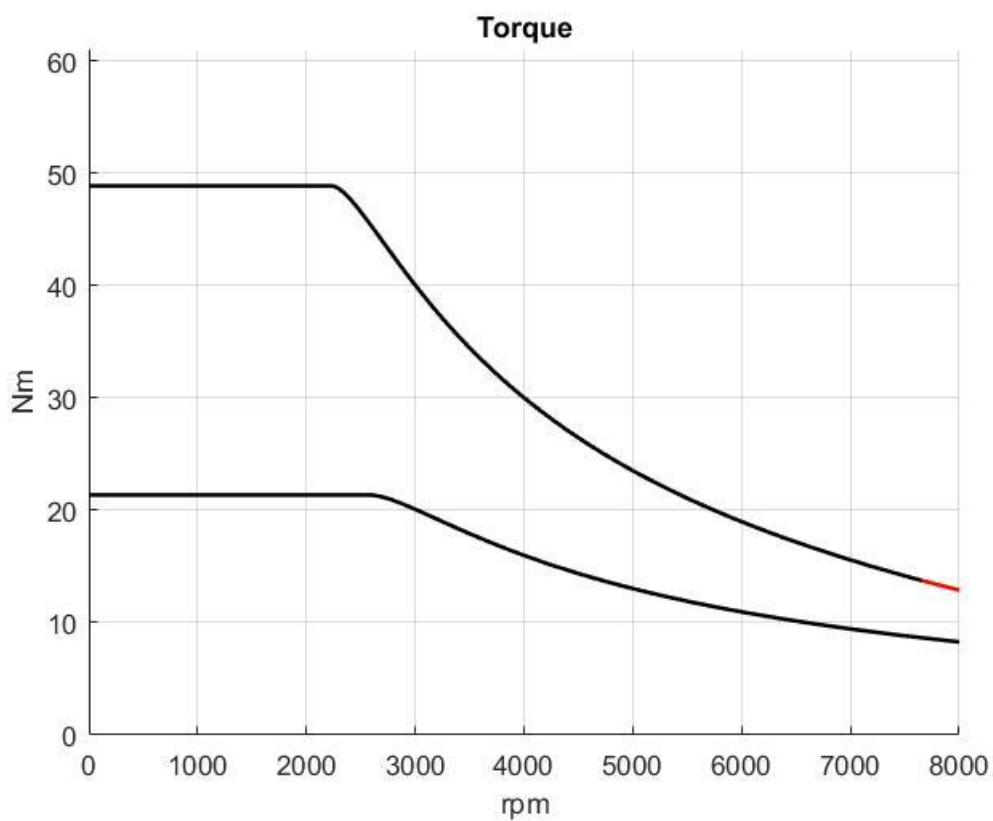


Figura 68-Curve di coppia del PM-SyR progettato con ferrite

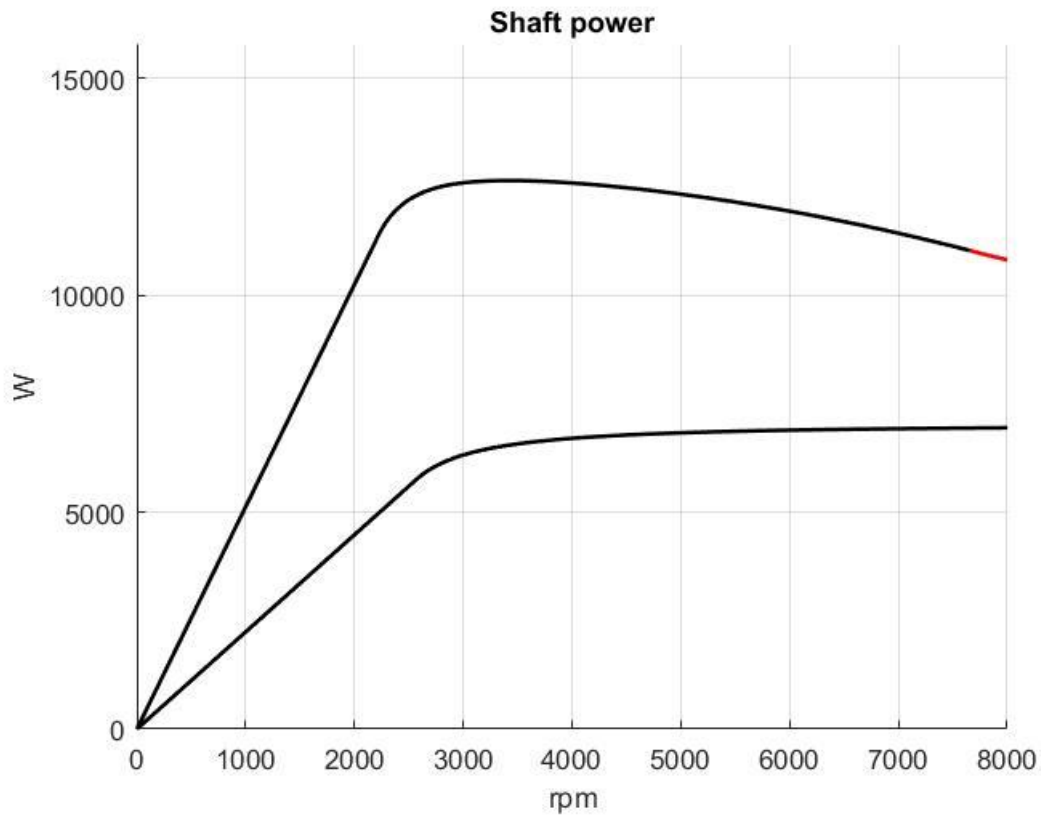


Figura 69-Curve di potenza del PM-SyR progettato con ferrite

4.4 Versione 2: magneti in neodimio

In questo caso il materiale è già presente nella libreria, con il nome di 'NdFeb32 MGOe'.

Si riportano figure analoghe a quelle del caso in ferrite, con modello FEMM (Figura 70) e curve di coppia e potenza (Figura 71 e 72).

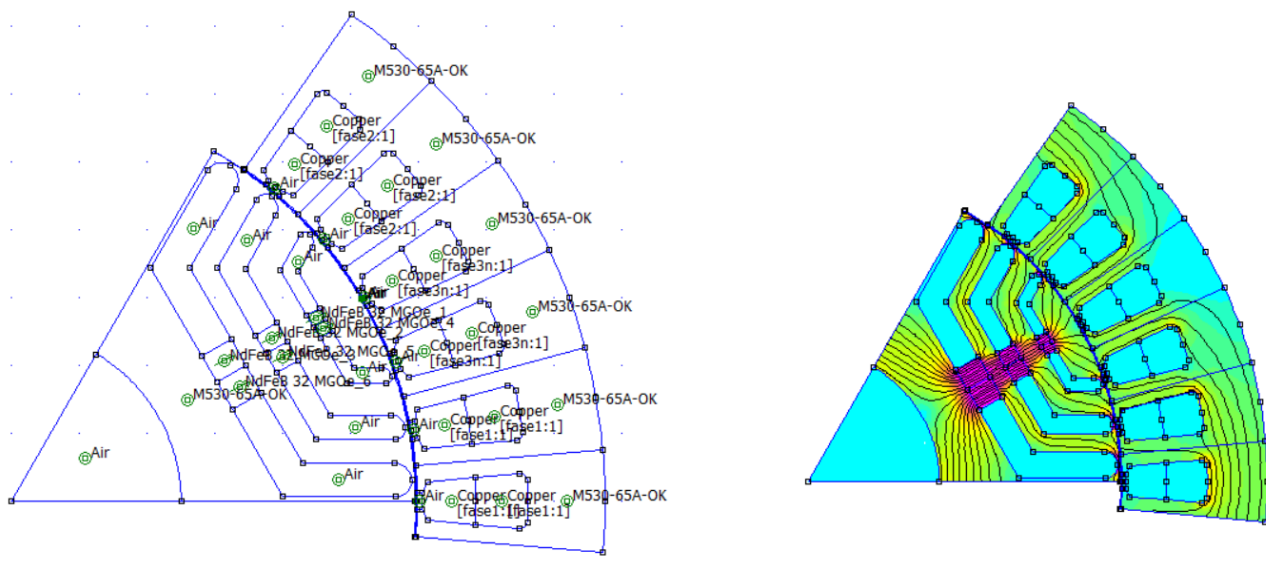


Figura 70-Modello FEMM del PM-SyR con neodimio

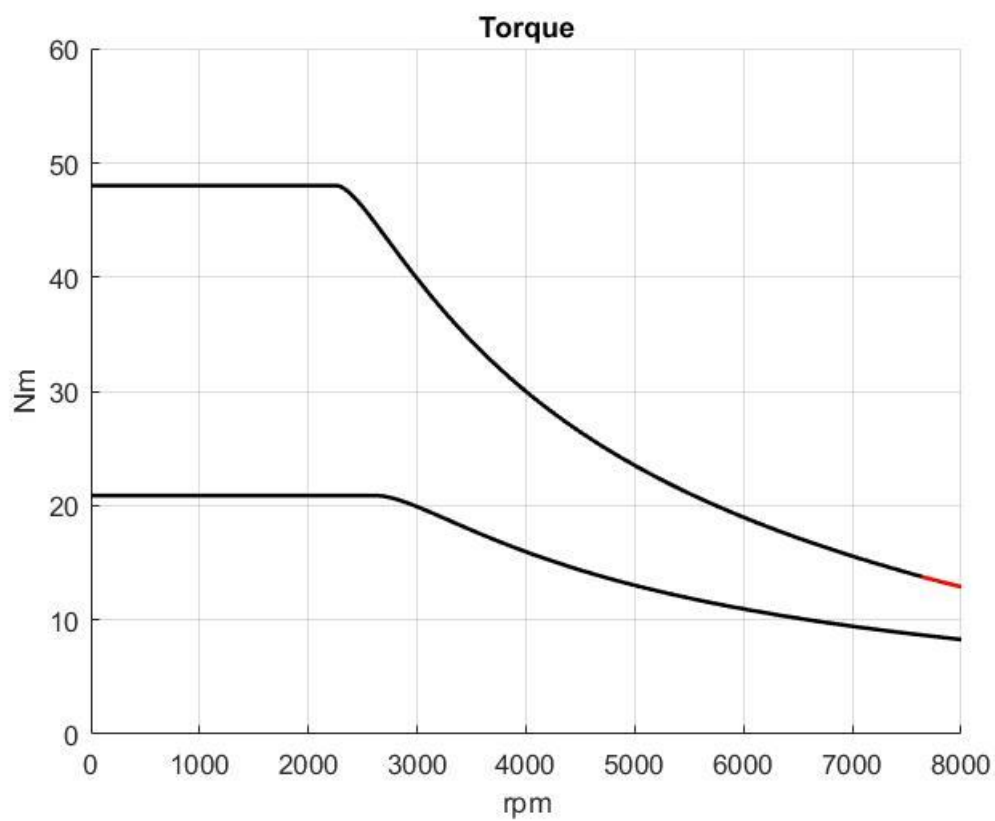


Figura 71-Curve di coppia del PM-SyR progettato con neodimio

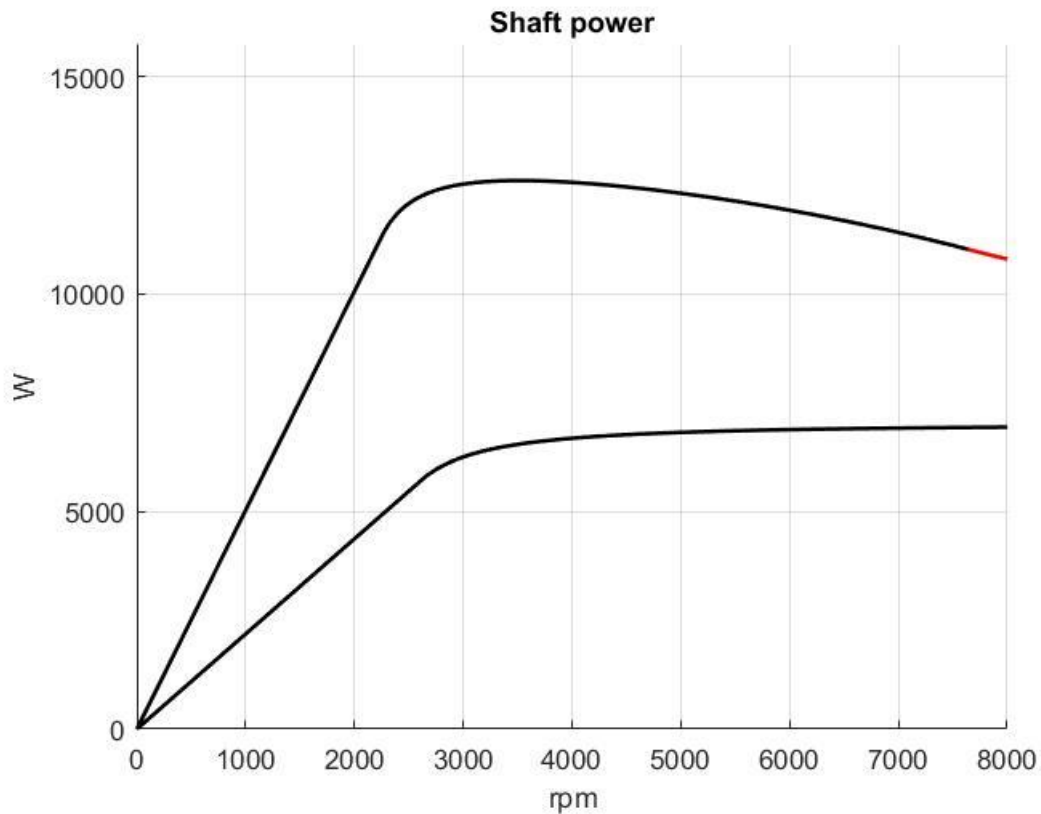


Figura 72-Curve di potenza del PM-SyR progettato con neodimio

4.5 Confronto delle prestazioni e del limite di sovraccarico

In questa sezione finale si propone il confronto tra il prototipo, in entrambe le versioni SyR e PM assisted, ed il motore progettato.

In Figura 73 e 74 si hanno le prestazioni in coppia e potenza, dei due motori SyR, tra di loro comparate.

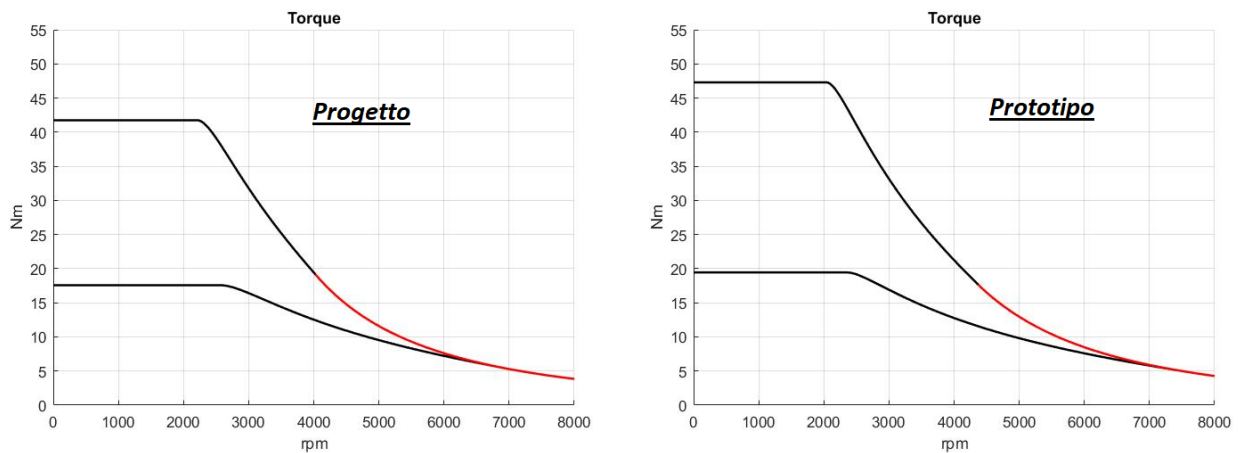


Figura 73-Confronto prestazioni di coppia ad 1 p.u. e 2 p.u. di corrente

Dalla Figura 73 si nota come il prototipo, a parità di condizioni di alimentazione, eroghi una coppia leggermente superiore ma confrontabile, sia alla corrente nominale che in sovraccarico.

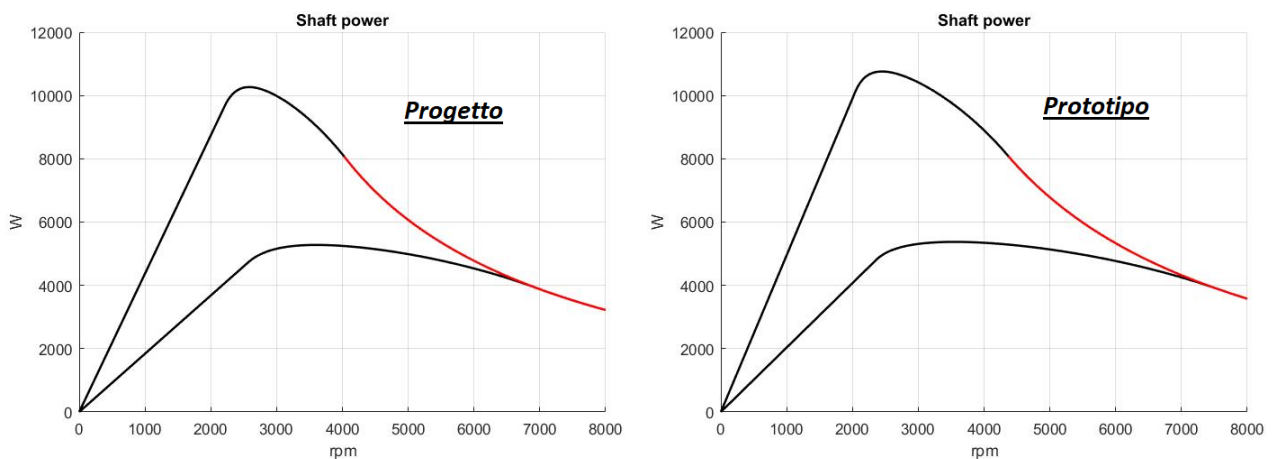


Figura 74-Confronto prestazioni di potenza ad 1 p.u. e 2 p.u. di corrente

Gli andamenti in potenza sono qualitativamente analoghi, con dei valori di poco maggiori per il prototipo.

Gli stessi grafici sono tracciati anche per le soluzioni a magneti permanenti. Per i PM-SyR, si riportano anche i modelli FEMM, suddivisi per materiale magnetico utilizzato.

Il primo progetto esaminato è quello con ferrite.

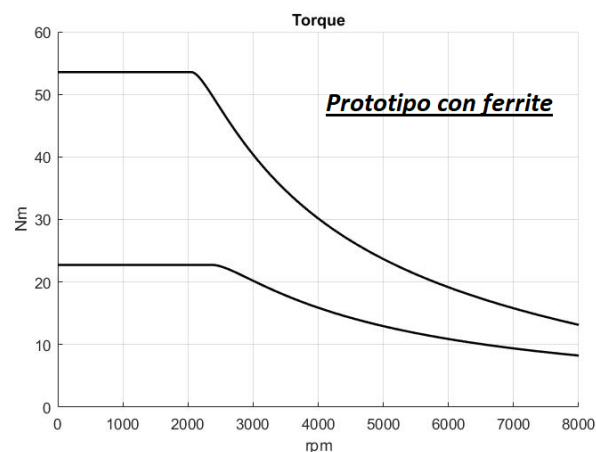
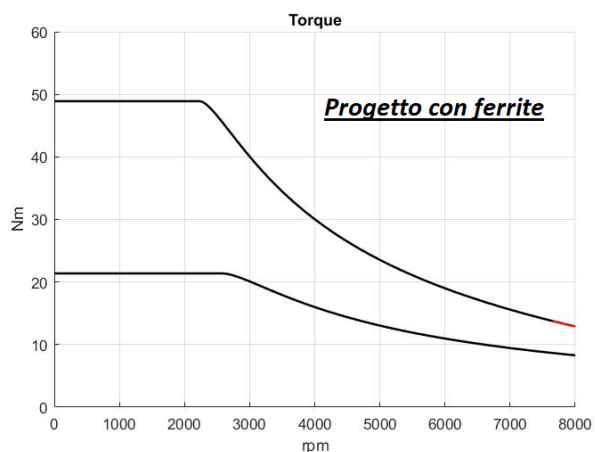


Figura 75-Curve di coppia dei PM-SyR realizzati con ferrite ad 1 p.u. e 2 p.u. di corrente

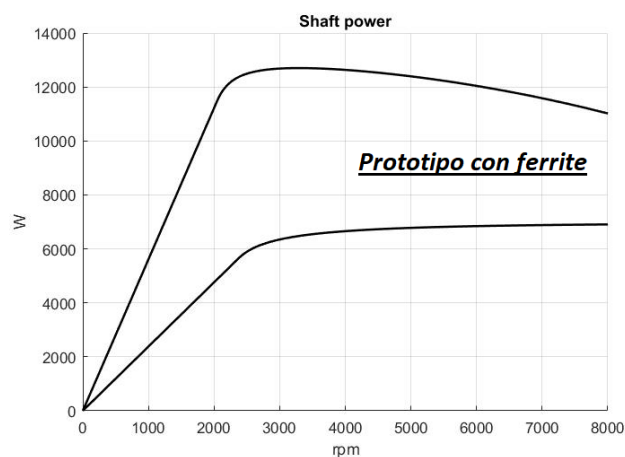
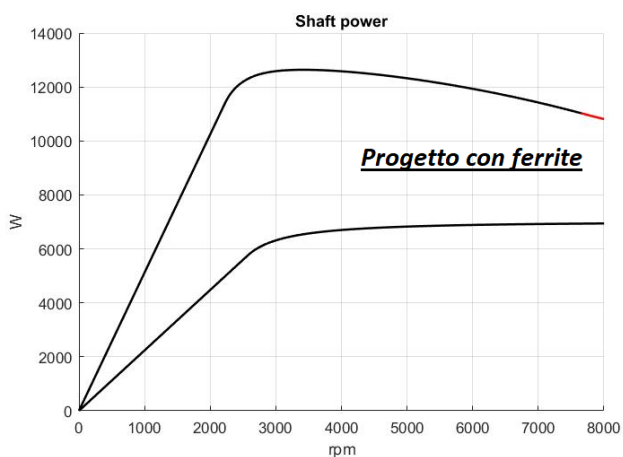


Figura 76-Curve di potenza dei PM-SyR realizzati con ferrite ad 1 p.u. e 2 p.u. di corrente

Le prestazioni di Figura 75 pendono a favore del prototipo; in ogni caso, quelle del motore progettato sono sufficienti a soddisfare la specifica di coppia richiesta, ovvero 21 Nm.

Per quanto riguarda la potenza, la Figura 76 mostra l'equivalenza tra le due soluzioni.

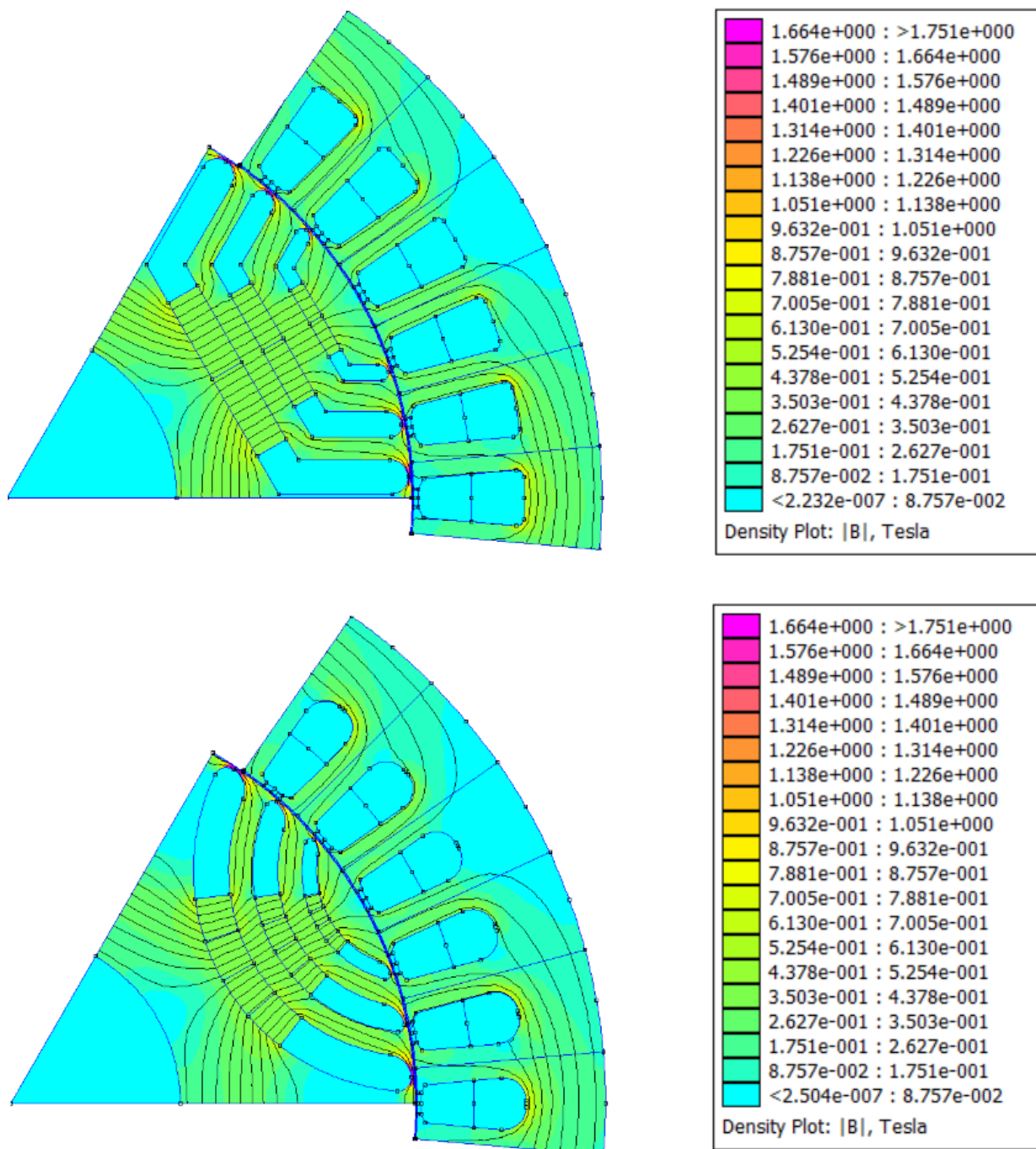


Figura 77-Confronto dei modelli FEMM dei PM-SyR con ferrite

Anche l'analisi magnetica non mostra sostanziali differenze (Figura 77).

Analogamente, viene proposto il confronto tra le soluzioni al neodimio.

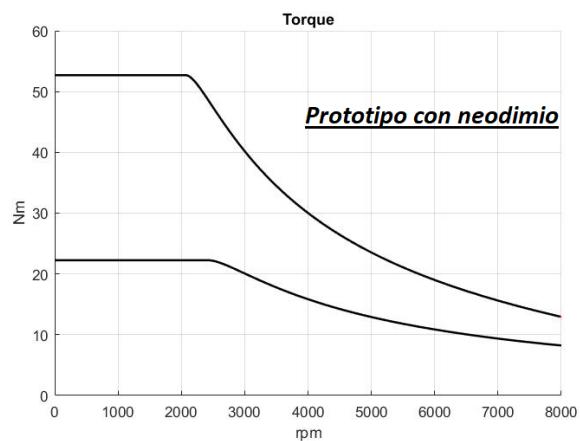
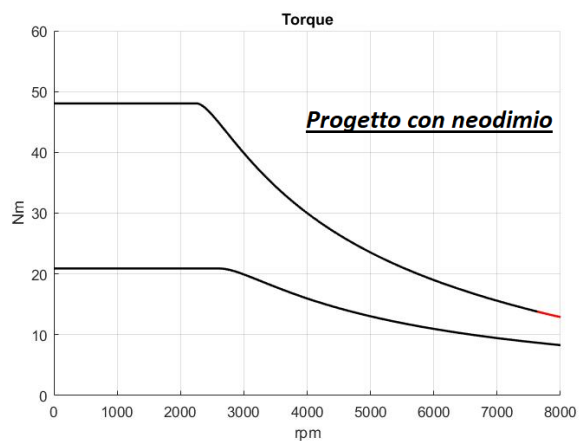


Figura 78-Curve di coppia dei PM-SyR realizzati con neodimio ad 1 p.u. e 2 p.u. di corrente

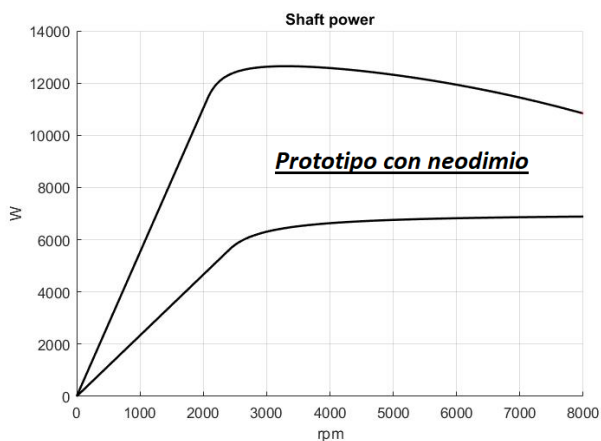
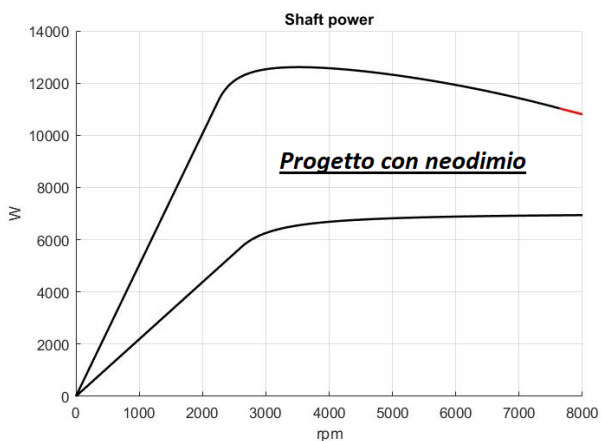


Figura 79-Curve di potenza dei PM-SyR realizzati con neodimio ad 1 p.u. e 2 p.u. di corrente

Le considerazioni che si possono sviluppare, sui grafici di coppia e potenza, sono del tutto analoghe alle precedenti.

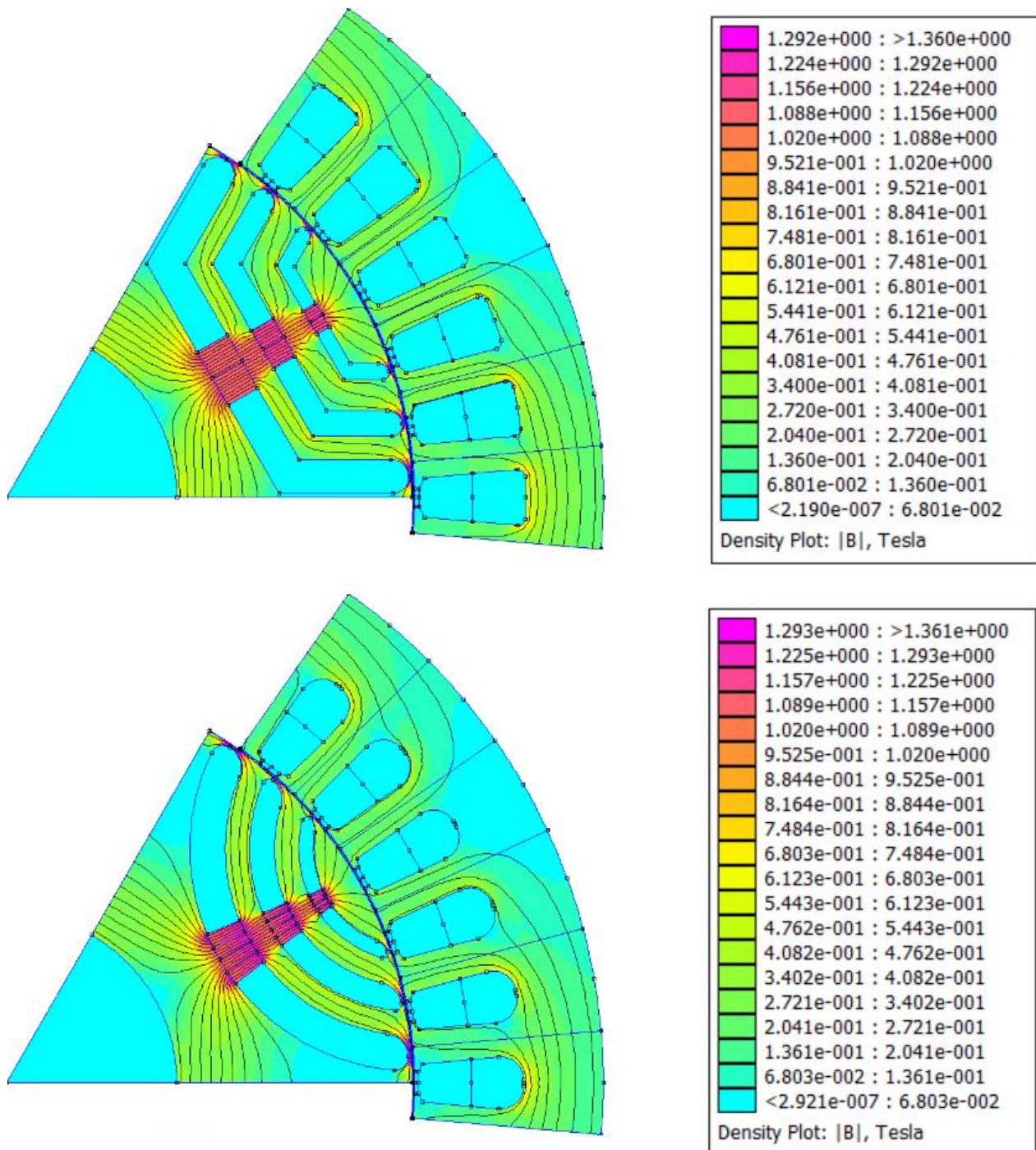


Figura 80- Confronto dei modelli FEMM dei PM-SyR con neodimio

I due modelli di Figura 80 mostrano chiaramente il maggior carico magnetico sul ferro, dovuto alla più alta concentrazione del neodimio, rispetto al caso con ferrite.

5 Conclusioni

Il lavoro svolto ha consentito l'integrazione di una funzionalità aggiuntiva, sul software già esistente, per l'inserimento dei magneti in due specifiche geometrie di barriera. Gli obiettivi conseguiti possono essere riassunti come segue:

- Sviluppo di un algoritmo capace di identificare e tracciare le aree di inserimento.
- Semi-automatizzazione del progetto dei magneti con modifica della GUI.
- Risoluzione dei problemi di compatibilità con il codice originario.
- Progettazione di un motore con prestazioni analoghe al prototipo RAW Power, sfruttando le modifiche introdotte.

Possibili estensioni potrebbero riguardare le altre due geometrie, adattando, dove necessario, le metodologie utilizzate.

Ulteriori migliorie possono essere applicate al comportamento dei campi inseriti sulla GUI, in corrispondenza delle variazioni introdotte dall'utente.

6 Bibliografia

- SyR-e_user_manual_v1.6.pdf (download: <https://sourceforge.net/projects/syr-e/>)
- User manual di FEMM (<http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>)
- [1] C. Bianchini, M. Davoli, G. Pellegrino, F. Immovilli and E. Lorenzani, "Low cost PM synchronous servo-applications employing asynchronous-motor frame," 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, 2015, pp. 6090-6095
- [2] Vagati, A.; Fratta, A.; Franceschini, G.; Rosso, P., "AC motors for high-performance drives: a design-based comparison," Industry Applications, IEEE Transactions on, vol.32, no.5, pp.1211,1219, Sep/Oct 1996
- [3] Pellegrino, G.; Vagati, A.; Boazzo, B.; Guglielmi, P., "Comparison of Induction and PM Synchronous Motor Drives for EV Application Including Design Examples," Industry Applications, IEEE Transactions on, vol.48, no.6, pp.2322,2332, Nov.-Dec. 2012
- [4] Mahmoudi, A., Soong, W., Pellegrino, G. and Armando, E., "Efficiency Maps of Electrical Machines", accepted for presentation at ECCE 2015, Montreal.