



**Politecnico
di Torino**

Dipartimento di ingegneria meccanica e aerospaziale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea

*Studio numerico, caratterizzazione e paragone di due motori
elettrici per veicoli da lavoro in ambito agricolo*

Relatori

Prof. Aurelio Somà

Prof. Francesco Mocera

Candidato

Augusto Supertino

Dedicata a tutta la mia famiglia,
che mi ha sempre supportato e grazie alla quale
oggi sono riuscito a raggiungere questo traguardo.

Sintesi

Nel presente lavoro si svolge un'analisi comparativa tra due motori elettrici sincroni a magneti permanenti utilizzati su veicoli da lavoro in ambito agricolo quali i carri trincia miscelatori, cioè macchinari che vengono utilizzati per la trancatura, lo sminuzzamento, la miscelazione e la distribuzione dei prodotti alimentari per animali da allevamento.

Viene brevemente descritta l'architettura del macchinario e si introducono le diverse tipologie di motori elettrici presenti sul mercato.

A questo punto si procede con la vera e propria analisi dei due motori presi in considerazione, partendo dalla modellazione, passando per le analisi agli elementi finiti per poi terminare con la discussione dei risultati.

Per quel che riguarda la modellazione dei due motori, in alcuni casi si hanno a disposizione dati e grandezze rese disponibili dalla casa produttrice, in altri si dovrà procedere ad un processo di ingegneria inversa, seguendo quelle che sono le relazioni fisiche alla base del tipo di motore preso in considerazione (in questo caso PMSM).

L'effettuazione delle analisi, invece, si è svolta principalmente in due modi: il primo in condizioni nominali di funzionamento (anche per poter confermare la corretta modellazione dei motori), l'altra tramite duty-cycle.

Il duty-cycle preso in considerazione è proprio il ciclo di lavoro in campo di una macchina Supertino, in particolare sono stati utilizzati dei dati acquisiti tramite un sistema di telemetria installato sul macchinario, grazie ai quali si possono vedere ed elaborare i dati di funzionamento. Questo tipo di analisi è uno degli aspetti su cui si basa il concetto di industria 4.0, del cosiddetto IOT (internet of things), cioè quel processo di acquisizione, stoccaggio e elaborazione dei dati di un prodotto o processo grazie alle tecnologie digitali.

Il lavoro di tesi è stato svolto presso l'azienda di famiglia del candidato, la Supertino s.r.l. di Saluzzo in provincia di Cuneo.

Sommario

Sommario	1
1 Premessa e scopo del lavoro	1
2 Cos'è un carro trincia miscelatore	2
2.1 Classificazione generale	2
2.2 Tipologie di carri miscelatori	3
2.3 Architettura di un carro semovente elettrico	5
3 I motori elettrici	7
3.1 Motori d.c.	8
3.2 Motori a.c.	9
3.2.1 Asincroni	9
3.2.2 A riluttanza variabile e commutata	9
3.2.3 A magneti permanenti	11
4 Motori brushless a magneti permanenti (PMSM)	12
4.1 Struttura dei PMSM	12
4.2 Magneti permanenti	13
4.3 Alloggiamento dei magneti	15
4.4 Sistemi di raffreddamento nei PMSM	17
4.5 Principi di funzionamento	17
4.6 Principi di elettromagnetismo	19
4.7 Circuito magnetico equivalente	20
4.8 Asse diretto e asse in quadratura	23
4.9 Costanti di motore	25
4.9.1 Costante di back EMF K_e	26
4.9.2 Costante di coppia K_t	26
4.9.3 Costante di motore K_m	27

5	Design dei due motori.....	28
5.1	Tipologia di motori.....	28
5.2	Perché l'utilizzo di due motori?	28
5.3	Dati di targa.....	29
5.4	Caratteristiche geometriche.....	30
5.4.1	Caratteristiche geometriche motore 1	30
5.4.2	Caratteristiche geometriche motore 2	32
5.5	Avvolgimenti di statore.....	35
5.5.1	Avvolgimenti motore 1	35
5.5.2	Avvolgimenti motore 2	37
5.6	Analisi di convergenza	39
6	Analisi dei materiali.....	42
6.1	Materiali per lo statore	43
6.2	Materiali per il rotore	44
7	Dati di telemetria e scelta del duty cycle.....	47
8	Analisi termica.....	50
8.1	Analisi termica motore 1	52
8.2	Analisi termica motore 2	54
8.3	Analisi con il duty-cycle	56
9	Conclusioni.....	63
10	Indice delle figure	65
11	Indice delle tabelle	66
12	Indice dei grafici	67
13	Bibliografia	68

1 Premessa e scopo del lavoro

Questa tesi si pone come obiettivo quello di effettuare uno studio numerico e caratterizzazione tramite software Motorcad[®] di due motori elettrici utilizzati su veicoli da lavoro in ambito agricolo.

Questi verranno poi comparati in termini di efficienza e dispersione termica.

In particolare, questi motori vengono montati su carri trincia-miscelatori semoventi, macchinari che hanno il compito di miscelare, tagliuzzare e scaricare il cibo d'alimentazione per animali quali mucche, vitelli, ecc.

Il lavoro di tesi è stato svolto all'interno dell'azienda di famiglia "Supertino s.r.l.", che si occupa della progettazione e costruzione di macchinari per uso agricolo, più particolarmente nei settori della zootecnia e della fienagione.

2 Cos'è un carro trincia miscelatore

In questo capitolo verrà illustrata l'architettura di un carro trincia miscelatore comune, in particolar modo verranno descritti i compiti che questa macchina deve svolgere e ne verranno descritti i diversi modelli esistenti ad oggi sul mercato.

2.1 Classificazione generale

Un carro trincia miscelatore è una macchina che, come detto in precedenza, serve per sminuzzare, miscelare e distribuire in mangiatoia tutti i prodotti utilizzati per l'alimentazione animale (quali foraggi, paglia, mangimi, insilati, tuberi, ...).

Queste macchine sono impiegate solitamente in allevamenti di bovini (da ingrasso e da latte) per la preparazione di razioni alimentari uniche (unifeed), ma anche in allevamenti suinicoli e avicoli.

Ogni carro trincia miscelatore è composto da (guardare fig.1):

1. Vasca di miscelazione con all'interno coclee su cui sono montati coltelli per il taglio delle fibre d'alimentazione (fieno e paglia);
2. Braccio dessilatore;
3. Sportelli di scarico;
4. Sistema di trasmissione.

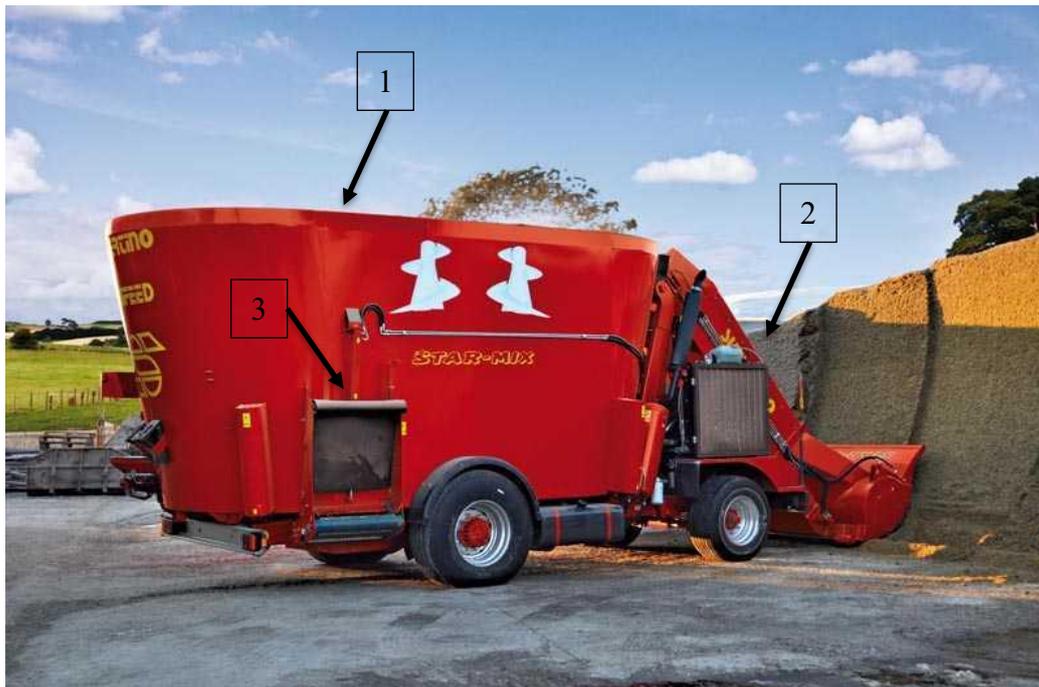


Figure 2.1, Carro miscelatore "Star-mix" Supertino

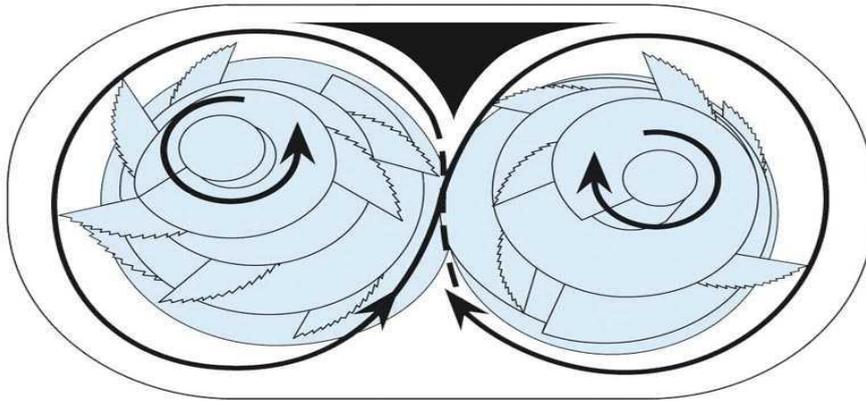


Figure 2.2, Coclee di miscelazione all'interno della vasca

2.2 Tipologie di carri miscelatori

Esistono diversi tipi di carri miscelatori ed è comune distinguerli in base al “metodo di miscelazione” e in base al fatto che siano o meno dotati di un proprio motore per il proprio funzionamento e movimentazione.

In base al metodo di miscelazione abbiamo la distinzione tra carri trincia miscelatori verticali (coclee con asse verticale) e orizzontali (coclee ad asse orizzontale).

Per quanto riguarda la provenienza della forza motrice, essi si suddividono in semoventi (con motore e cabina di guida a bordo) e trainati, cioè che per funzionare devono essere trainati da un trattore e collegati tramite una presa di forza ad esso.

La principale differenza tra un carro miscelatore trainato e semovente sta nella maneggevolezza del macchinario. Nel primo caso l'operatore deve stare seduto in cabina del trattore e per questo motivo durante la fresatura degli insilati deve lavorare andando indietro (la fresa dessilatrice è posta sul retro); dunque deve essere in grado di manovrare la macchina tramite l'uso di telecamere, specchietti, ecc.

Nel secondo caso, invece, l'operatore gode di un'ottima visibilità essendo seduto nella cabina propria della macchina e può fresare andando in avanti.

CARRI MISCELATORI ORIZZONTALI:



Figure 2.3. Carro trincia miscelatore orizzontale trainato, Supertino

CARRI MISCELATORI VERTICALI:

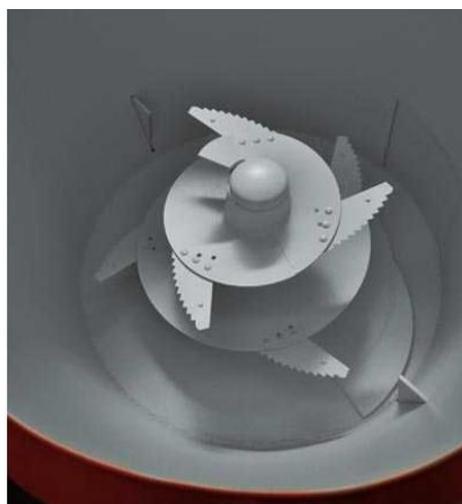


Figure 2.4. Carro trincia miscelatore verticale trainato, Supertino

CARRI MISCELATORI TRAINATI

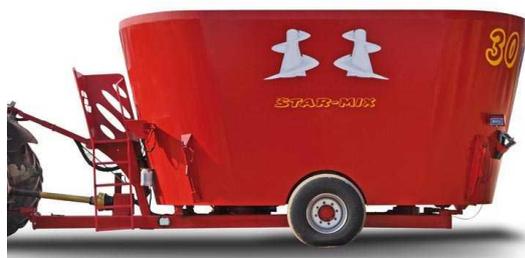


Figure 2.6. Carro miscelatore trainato, Supertino

CARRI MISCALTORI SEMOVENTI



Figure 2.5. Carro miscelatore semovente, Supertino

I carri semoventi possono essere alimentati da un motore a combustione interna o da un motore elettrico, a seconda dell'autonomia richiesta dal cliente.

La modellizzazione che si andrà a fare riguarda proprio due motori che sono stati utilizzati per la propulsione del carro semovente elettrico.

2.3 Architettura di un carro semovente elettrico

Il carro semovente full-electric sul quale lo studente ha lavorato è composto dai seguenti componenti:

- Un motore elettrico;
- Un sistema di trasmissione del moto;
- Un apparato deessilatore;
- Una vasca con coclee verticali per la miscelazione;
- Una cabina di guida.

L'elettrificazione del mezzo riprende le architetture sviluppate in ambiente automotive che prevedono la presenza dei seguenti componenti:

- Un motore elettrico (in questo caso un motore brushless a magneti permanenti);
- un sistema di accumulo costituito da batterie ricaricabili (agli ioni di litio);
- un inverter che trasforma e modula la corrente continua delle batterie in corrente alternata da inviare al motore;
- un sistema di controllo che va ad agire sull'azionamento del motore.

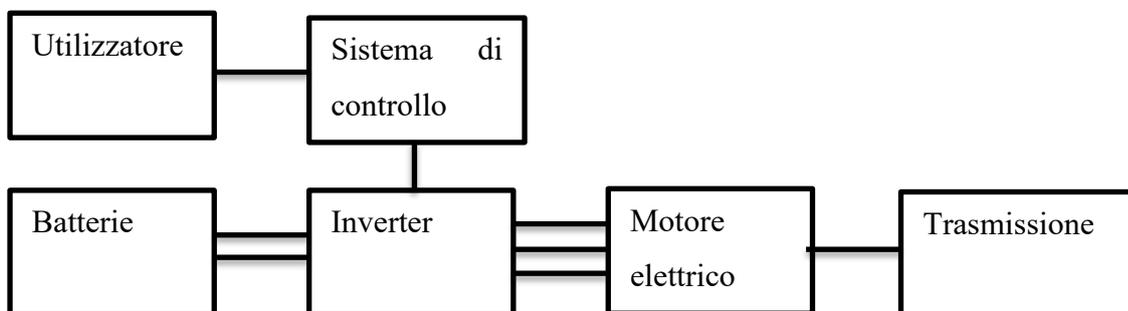


Figure 2.7: Schema semplificato di un powertrain elettrico

La potenza che il motore deve erogare dipende principalmente dalla massima quantità di massa miscelabile per volta, che a sua volta dipende dal volume della vasca.

L'albero del motore elettrico è collegato ad un accoppiatore ad assi paralleli a tre uscite al quale sono a sua volta collegate due pompe idrauliche per il funzionamento rispettivamente della fresa dessilatrice e dell'avanzamento, mentre la restante uscita è utilizzata per la trasmissione meccanica alle coclee di miscelazione.

Tra i vantaggi di utilizzare una propulsione completamente elettrica troviamo:

- completa assenza di emissioni dirette di gas inquinanti;
- manutenzione ridotta;
- silenziosità;
- la possibilità di utilizzare fonti rinnovabili per ricaricare le batterie (a impatto e costo zero), cosa molto frequente in ambito agricolo in quanto gran parte delle aziende agricole hanno già impianti fotovoltaici di dimensioni discrete (almeno 50kwp).

Il sistema di accumulo del carro trincia miscelatore sul quale i motori elettrici vengono installati è composto da 16 pacchi batterie da 150 Ah e 42 V ciascuno, per una batteria totale da 672 V e 100.8 kWh.



Figure 2.8. Pacco batterie di Electra2

3 I motori elettrici

Nel seguente capitolo verranno descritte brevemente le diverse tipologie di motori elettrici presenti sul mercato.

Esistono diverse tecnologie di funzionamento nei motori elettrici e tutte quante sfruttano le leggi fisiche sull'elettromagnetismo scoperte durante il diciannovesimo secolo. Oggi, con l'avvento dell'elettronica di potenza, queste tecnologie si riescono a sfruttare maggiormente soprattutto per quanto riguarda la gestione di coppia e velocità dei motori.

Le parti principali che compongono un motore elettrico sono:

- **Statore:** è la parte in cui troviamo le espansioni polari sulle quali si avvolgono fili conduttori che creano il campo magnetico.
- **Rotore:** parte che ruota grazie all'interazione dei suoi componenti con il campo magnetico creato dallo statore. In esso possiamo trovare il collettore, componente meccanico che serve per connettere eventuali avvolgimenti nel rotore a un circuito esterno ad esso ed a commutarli elettro-meccanicamente.
- **Elettronica di potenza (raddrizzatore o inverter):** non sempre necessaria, serve per la modulazione e gestione della corrente, tensione e frequenza.

Vediamo di descrivere le tipologie in maniera riassuntiva.

3.1 Motori d.c.

I motori a corrente continua sono stati i primi ad essere utilizzati nel settore della mobilità (trazione ferroviaria). Sono composti da avvolgimenti elettrici sia su statore che sul rotore (infatti troviamo il collettore) i quali possono essere connessi in serie o separatamente.

La coppia viene generata dall'interazione tra la corrente di rotore e il campo magnetico di statore.

Sul rotore si possono anche utilizzare magneti permanenti per generare il campo magnetico.

PRO:

- facili da alimentare e regolare.

CONTRO:

- Hanno limiti di velocità e sovraccaricabilità dovuti al fenomeno di scintillio del collettore ad alte velocità.
- Difficili da raffreddare.
- Maggior ingombro.
- Il motore ad eccitazione in serie non può essere usato come generatore e se inverte la corrente di alimentazione la coppia agisce sempre nella stessa direzione quindi non posso eseguire frenatura elettrica.

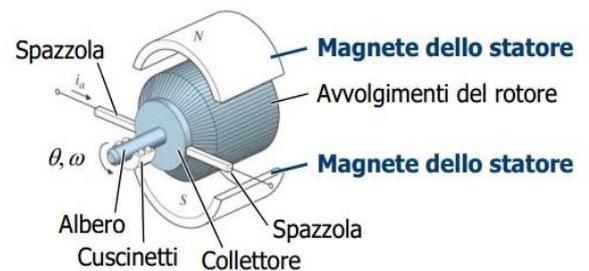


Figure 3.1, parti di motore a corrente continua.

3.2 Motori a.c.

I motori a corrente alternata in uso su veicoli ibridi o full-electric hanno bisogno di un inverter che trasformi la corrente continua generata dalle batterie in corrente alternata a frequenza diversa a seconda della regolazione necessaria della coppia.

3.2.1 Asincroni

I motori asincroni funzionano grazie alle correnti che il campo magnetico dello statore (rotante se trifase) induce sul rotore (a gabbia di scoiattolo, Fig.3). Si dicono asincroni perché il campo magnetico dello statore ruota a velocità diversa da quello di rotore. In questo tipo, il parametro di coppia viene gestito da inverter che modifica la frequenza di alimentazione.

PRO:

- Non c'è il collettore.
- Minor ingombro.
- Silenziosità

CONTRO:

- Regolazione complessa.



Figure 3.2, motore asincrono Fimea

3.2.2 A riluttanza variabile e commutata

I motori a riluttanza variabile e commutata hanno la peculiarità di avere il rotore di forme geometriche tali da creare delle direzioni di minor resistenza al passaggio del campo magnetico. Se il campo magnetico ruota, il rotore tenderà a ruotare per facilitare flusso magnetico in esso, generando quindi coppia. Nei motori a riluttanza variabile il campo magnetico è generato da un circuito di eccitazione tri o multi fase, mentre in quelli a riluttanza commutata ci sono i cosiddetti poli di eccitazione che vengono commutati in base alla posizione dello statore.

PRO:

- Buona densità di coppia.
- Più leggera.
- Buon rendimento.
- Non ho magneti permanenti (più economica).



Figure 3.3, rotore di un motore a riluttanza variabile

CONTRO:

- Meccanica dello statore ad alte velocità.
- Controllo molto sofisticato.
- Elevato ripple di coppia.

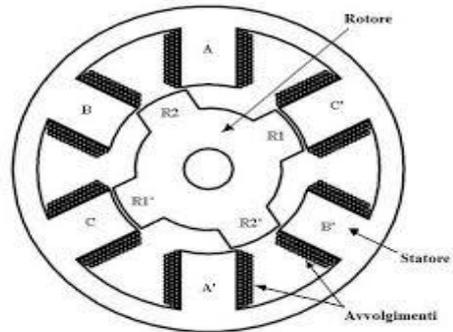


Figure 3.4, motore a riluttanza commutata

3.2.3 A magneti permanenti

I magneti vengono applicati al rotore in modo tale che, il campo magnetico che essi creano, ruoti sincrono a quello generato dal circuito di eccitazione tri o multi fase. Il rotore può essere interno o esterno (maggior coppia generata, può essere direttamente applicato alla ruota) allo statore e i magneti possono essere superficiali o interni.

PRO:

- Maggior densità di coppia.
- Maggior efficienza.
- Utilizzo da generatore possibile.
- Si possono raggiungere velocità elevate.

CONTRO:

- Possibile smagnetizzazione dei magneti se temperatura è troppo elevata.
- Occorre fissare molto bene i magneti che potrebbero staccarsi a causa della forza centrifuga.
- Più costosi.
- Controllo e regolazione della coppia sofisticati.



Figure 3.5, struttura motore a magneti permanenti su rotore esterno.

Tutti i motori visti finora erano a flusso magnetico radiale, ma grazie all'utilizzo dei magneti permanenti si è iniziato a sviluppare anche soluzioni a flusso assiale, che permettono di avere

maggior coppia e minor ingombro assiale.

PRO:

- Possibilità di applicarli direttamente alle ruote (MOTORUOTE).
- Minor ingombro assiale

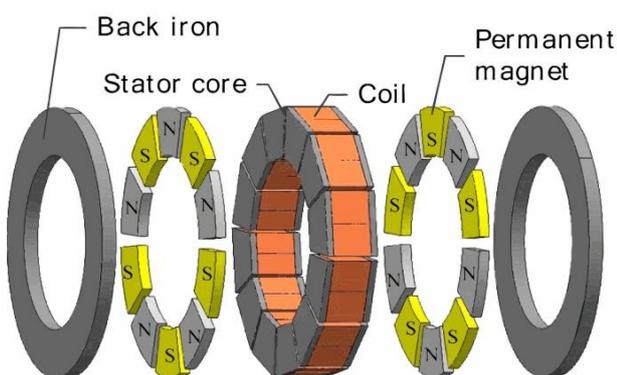


Figure 3.6, Struttura motore a flusso assiale con doppio rotore e uno statore

4 Motori brushless a magneti permanenti (PMSM)

I motori brushless (senza spazzole) a magneti permanenti, chiamati anche PMSM (permanent magnet synchronous motor) sono motori molto usati nella trazione elettrica nel settore automotive e nel settore aerospaziale in quanto essi permettono di ottenere elevate densità di coppia, elevate velocità di rotazione e soprattutto hanno una maggior efficienza. Offrono inoltre la possibilità di funzionare come generatori e recuperare dunque energia durante le frenate.

4.1 Struttura dei PMSM

Per funzionare, i motori PMSM hanno quindi bisogno di uno statore con avvolgimenti, dell'elettronica di potenza per la creazione (e modulazione) del campo magnetico rotante e di un rotore (sul quale vengono applicati i magneti permanenti) che non sarà a gabbia di scoiattolo (come accade invece negli asincroni) bensì sarà formato da lamierini magnetici che servono invece per evitare le correnti parassite che ne ridurrebbero l'efficienza.

Essi vengono definiti motori "sincroni" in quanto il campo magnetico di rotore tenderà a seguire quello di statore (modulato dall'elettronica di potenza), per questo motivo l'elettronica di potenza ha bisogno di sapere istante per istante la posizione angolare del rotore e per adempiere a ciò si utilizzano sensori appositi.

1. pacco statorico di lamierini;
2. magneti permanenti rotorici;
3. pacco rotorico di lamierini;
4. avvolgimenti statorici;
5. freno di stazionamento;
6. cuscinetto a sfere e relativo anello di bloccaggio;
7. flangia per montaggio orizzontale;
8. carcassa;
9. albero;
10. cuscinetto a sfere precaricato;
11. scudo posteriore;
12. trasduttore primario (nell'esempio, dinamo tachimetrica e datore di posizione ad effetto Hall);
13. trasduttore secondario (encoder opzionale);
14. connettore per trasduttore secondario;
15. connettore per trasduttore primario;
16. connettore scatola morsettiera di potenza.

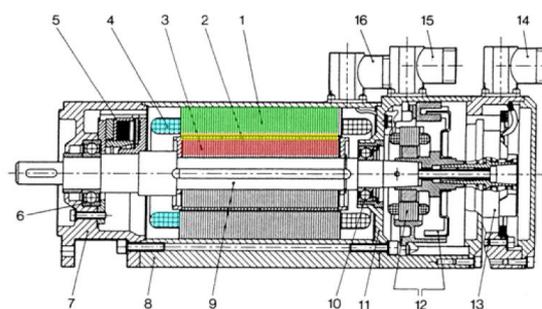


Figure 4.1. Organi elettrici e meccanici di un motore brushless a magneti permanenti

Sono quindi presenti due sorgenti differenti ed indipendenti di forza magnetomotrice:

- di rotore, sempre presente;
- di statore, presente solo quando alimentato.

Come detto in precedenza, per evitare correnti parassite indotte che ridurrebbero l'efficienza complessiva della macchina, sia rotore che statore sono formati da un pacco di lamierini isolati tra loro con appositi materiali.

Pacco di lamierini rotorico

Ha il compito di consentire la richiusura del flusso magnetico e, nelle macchine a magneti interni, di alloggiare i magneti permanenti.

Nel rotore possono essere praticati dei canali, per ridurre il momento di inerzia.

I poli magnetici possono essere fissati al pacco rotorico tramite delle resine.

Pacco di lamierini statorico

Formato da lamierini Fe-Si, di basso spessore, isolati tra loro con vernice. La cifra di perdita del pacco statorico di lamierini è circa 1,3-2 W/kg (a 50 Hz), ridotta del 50% rispetto ai motori asincroni standard

4.2 Magnet permanenti

I magneti permanenti dei motori brushless sono realizzati con materiali magnetici duri, caratterizzati quindi da elevata induzione residua B_r e del parametro $(B \cdot H)_{max}$. Per la determinazione del punto di lavoro dei magneti rotorici è necessario conoscere il ciclo di isteresi $B = f(H)$ del materiale in esame ed in particolare del secondo quadrante del piano B-H (caratteristica di smagnetizzazione).

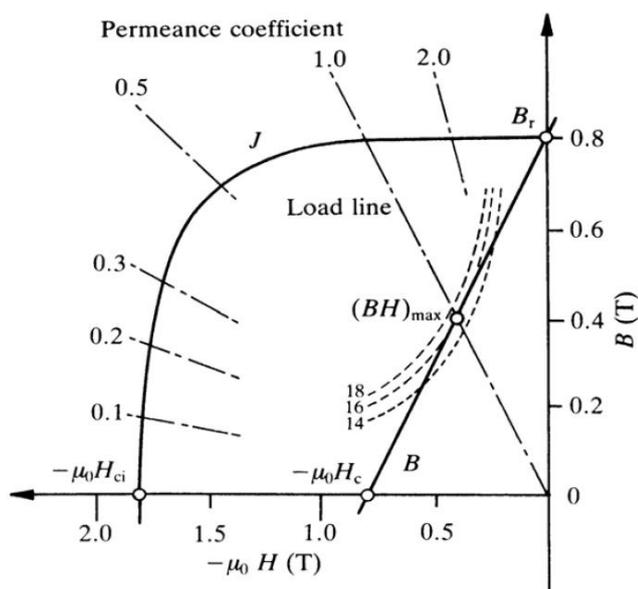


Figure 4.2. Caratteristica di smagnetizzazione

I materiali magnetici più comunemente usati sono quelli a base di terre rare e metalli di transizione, in particolare si utilizzano principalmente Neodimio-ferro-boro (NdFeB) o Samario-Cobalto. Osservare la tabella 4.1 per paragonarne le caratteristiche.

Property	NdFeB	Sm-Co
Remanence (T)	1–1.3	0.82–1.16
Coercivity (MA/m)	0.875–1.99	0.493–1.59
Permeability	1.05	1.05
Temperature coefficient of remanence (%/K)	-0.12	-0.03
Temperature coefficient of coercivity (%/K)	-0.55..-0.65	-0.15..-0.30
Curie temperature (°C)	320	800
Density (kg/m ³)	7.3×10 ³ –7.5×10 ³	8.2×10 ³ –8.4×10 ³
Flexural strength (N/mm ²)	250	150
Compressive strength(N/mm ²)	1100	800
Tensile strength (N/mm ²)	75	35
Electrical resistivity (Ω·m)	(110–170)×10 ⁻⁶	86×10 ⁻⁶
Energy product (Bhmax)	32-53	18-33

Tabella 4-1. Differenze tra le proprietà elettromagnetiche dei magneti in NdFeB e Sm-Co

Quando gli avvolgimenti del motore sono percorsi da corrente, il campo magnetico statorico generato si rafforza e si indebolisce a seconda della posizione del rotore; la reazione d'armatura originata è quindi funzione della posizione dei magneti.

Con la macchina alimentata, il punto di lavoro si sposta dinamicamente su cicli di isteresi minori Q'-Q'' centrati sul punto di lavoro statico.

Il rischio di smagnetizzazione, dovuta alla reazione d'armatura, è evitato facendo in modo che il punto di lavoro Q'' non cada nel ginocchio di smagnetizzazione.

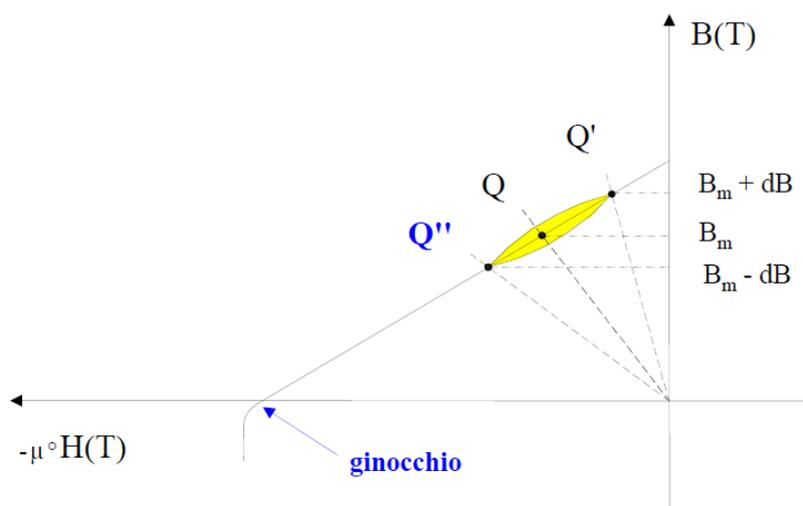


Figure 4.3. Punto ottimale di lavoro per i magneti permanenti.

I materiali per magneti permanenti devono avere un elevato campo coercitivo H_c per conservare l'induzione residua nel tempo e rendere la macchina meno sensibile ai fenomeni di reazione di indotto.

I magneti permanenti vengono classificati principalmente in base ad alcune loro caratteristiche, tra cui:

- la temperatura massima di esercizio del magnete;
- la quantità di "energia magnetica" per volume contenuta nel materiale magnetico.

4.3 Alloggiamento dei magneti

I magneti permanenti possono essere alloggiati sulla superficie del pacco lamierini di rotore (magnet inseriti), o internamente ad essi (magnet annidati).

Con i magneti superficiali, almeno una superficie del magnete si affaccia direttamente al traferro, mentre se i magneti sono annidati essi non hanno alcuna superficie direttamente esposta al traferro.

La presenza delle cave di statore confina il flusso nei denti, causando l'aumento dell'induzione alla base del dente rispetto all'induzione al traferro.

Se i magneti sono annidati, si avrà un aumento dell'induzione nei punti più stretti dei lamierini di rotore, cioè in prossimità dei bordi dei vuoti per l'alloggiamento dei magneti. Ciò può provocare saturazione magnetica in tali punti (osservare fig. 4.4).

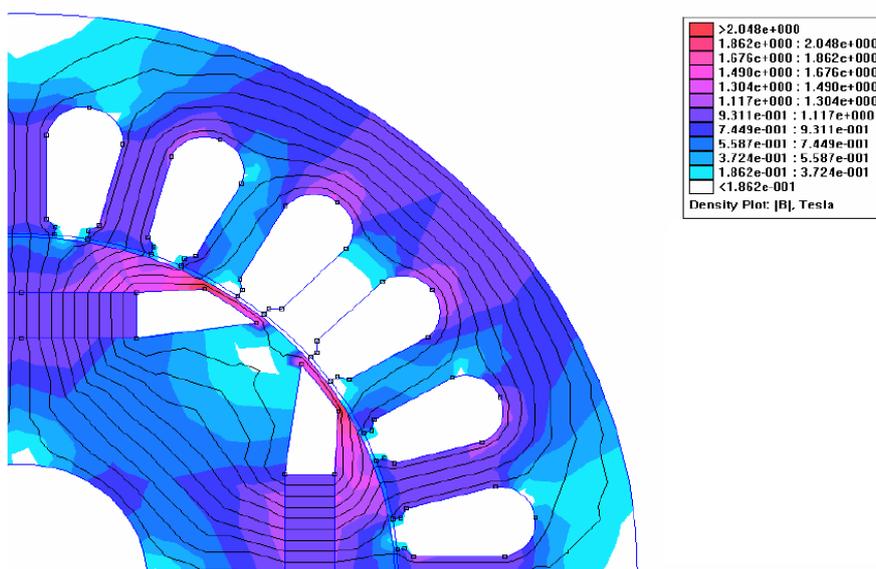


Figure 4.4. Andamento dell'induzione magnetica in un motore con magneti annidati (max. induzione su rotore)

4 - Motori brushless a magneti permanenti (PMSM)

Con l'alloggiamento superficiale dei magneti, invece, questo problema non si ha ed i punti con maggior induzione sono quelli in concomitanza dei denti di statore (come per i motori asincroni tradizionali).

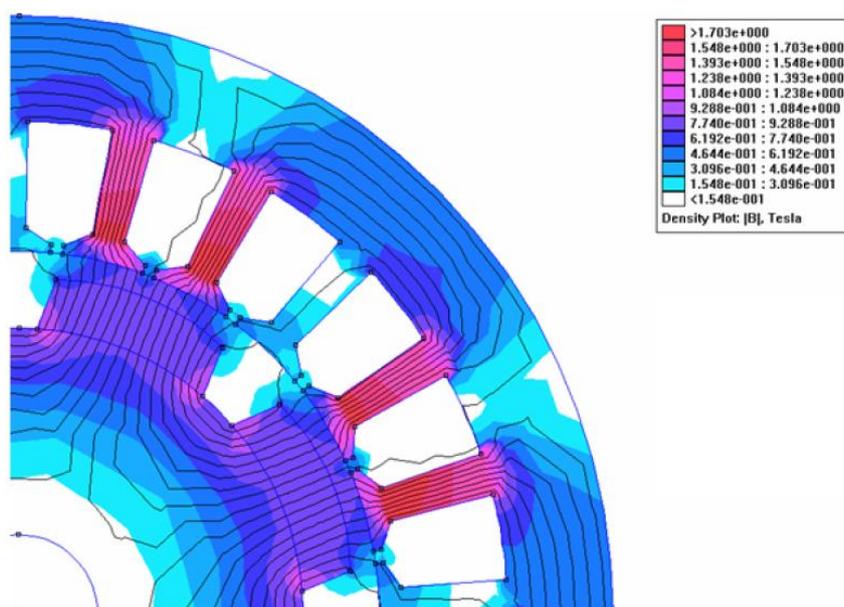


Figure 4.5. Andamento dell'induzione magnetica in un motore con magneti superficiali (max. induzione su denti di statore)

Con l'alloggiamento interno dei magneti e vuoti nei lamierini si possono ottenere dei particolari motori detti IPMSynRM (Internal permanent magnet synchronous reluctance motor) cioè misti a riluttanza variabile e a magneti permanenti. Questi, come si può immaginare dal nome, sfruttano entrambi i contributi delle due diverse tecnologie, migliorando le prestazioni in termine di coppia erogata, minor peso e massima coppia erogabile.

Di seguito viene mostrato un motore di questo tipo:

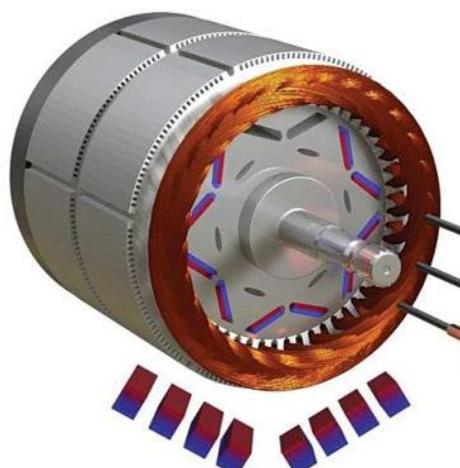


Figure 4.6. IPMSynRM

4.4 Sistemi di raffreddamento nei PMSM

I motori elettrici, avendo a che fare con correnti che circolano, si scaldano molto facilmente e ciò può provocare problemi quali la smagnetizzazione dei magneti permanenti o il deterioramento di alcune parti del motore. Risulta quindi essere di fondamentale importanza un adeguato sistema di raffreddamento. Di seguito vengono riportati i diversi metodi di raffreddamento possibili:

- per convezione naturale;
- per ventilazione:
 - autoventilazione;
 - servoverilazione;
- a liquido tramite camicia esterna;
- sul rotore;
- nelle cave di statore;
- spray cooling.

Il raffreddamento a liquido è quello che meglio si adatta ai motori di grosse taglie e soprattutto a quelli ad alta densità di potenza, dove il calore generato è concentrato in piccoli spazi.

Inoltre, i liquidi hanno calori specifici più alti dell'aria, quindi, riescono ad assorbire maggior quantità di calore a parità di massa utilizzata.

Il raffreddamento del rotore è un buon metodo di raffreddamento, perché è nei PMSM a rotore interno è proprio il rotore che tenderà a scaldarsi maggiormente. Questo metodo ha però dei costi e delle difficoltà tecniche non trascurabili, in quanto del liquido dovrebbe passare direttamente nell'albero del rotore.

Il raffreddamento diretto delle cave sarebbe un'ottima soluzione in quanto in esse si ha la fonte di calore, ma il problema sta nel fatto che in esse devono coesistere anche gli avvolgimenti generando così criticità tecniche di spazio e costruttive.

4.5 Principi di funzionamento

Come descritto in precedenza, i PMSM funzionano grazie al sincronismo del flusso magnetico di rotore con quello generato dallo statore.

In particolare, la coppia generata dal motore è direttamente proporzionale alla lunghezza di motore L e al quadrato del diametro D . In particolare, segue la seguente formula:

$$T = k \cdot L \cdot D^2$$

In realtà, la coppia generata dal motore è dovuta principalmente a tre contributi:

- Allineamento del flusso magnetico di rotore con quello generato dagli avvolgimenti di statore -> genera la cosiddetta mutual torque che è sostanzialmente una coppia stabile nell'intera rivoluzione del motore.
- Allineamento naturale del rotore in modo da creare il percorso di flusso con minima resistenza -> genera la cosiddetta coppia di riluttanza (reluctance torque).
- Interazione tra i magneti permanenti e i "denti" di materiale ferromagnetico nella struttura contenente gli avvolgimenti -> genera la cosiddetta coppia "di cogging".

In particolare, essa è dovuta al fatto che ogni dente di statore ha delle posizioni preferenziali (in concomitanza coi magneti) in cui il flusso magnetico è meno ostacolato; via via che il rotore ruota, i magneti si sposteranno in una posizione in cui subiranno "un'attrazione" verso il magnete più vicino. Raggiunta la posizione intermedia tra due denti, essi saranno in una posizione di equilibrio instabile in cui le attrazioni verso i corrispettivi denti si compenseranno e quindi la risultante sarà nulla. Quindi, la coppia di cogging sarà una coppia di disturbo periodica che, aggiunta a quella di riluttanza, compromette la fluidità di movimento del rotore.

Uno schema visivo è riportato nella figura seguente.

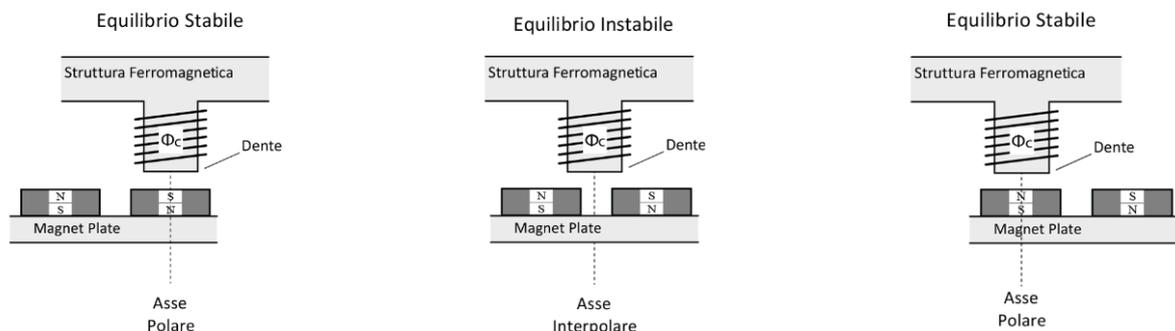


Figure 4.7 Passaggio da equilibrio stabile a instabile

Un metodo per la riduzione del cogging è quello di inclinare leggermente i magneti permanenti lungo la direzione del moto, così il passaggio tra i denti di statore avverrà in maniera più graduale.

Durante tutta la trattazione, verranno analizzate e spiegate formule per le quali c'è bisogno di capire la differenza tra angolo elettrico e angolo meccanico.

L'angolo meccanico θ_m è l'angolo dato dalla rivoluzione del motore; mentre l'angolo elettrico θ_e è l'angolo per il quale il motore torna nella stessa configurazione elettromagnetica di partenza.

$$\theta_e = \frac{N_m}{2} \cdot \theta_m \quad (4.1)$$

La coppia è proporzionale al numero di magneti utilizzati.

La frequenza invece dovrà seguire la rotazione del motore: man mano che il rotore ruoterà più veloce, anche la frequenza dovrà aumentare e per far ciò ci vorrà un'elettronica di potenza sempre più performante ma soprattutto costosa.

Derivando l'ultima rispetto al tempo si ottiene:

$$\omega_e = \frac{N_m}{2} \cdot \omega_m \xrightarrow{\text{dividendo per } 2\pi} f_e = \frac{N_m}{4\pi} \cdot \omega_m \quad (4.2)$$

Sapendo che

$$\omega_m = n \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (4.3)$$

Si ottiene

$$f_e = \frac{N_m}{120} n \quad (4.4)$$

Come si vede, più magneti vengono utilizzati, più la frequenza sarà alta.

4.6 Principi di elettromagnetismo

Dato che il lavoro di tesi ha riguardato principalmente analisi di elettromagnetismo, è giusto menzionare alcune leggi che di fatto sono la base dell'elettromagnetismo stesso.

Le leggi che verranno elencate di seguito vennero formulate da Maxwell nel XIX secolo e sono tutt'ora valide.

$$\oint_{\partial V} \vec{E} d\vec{S} = \int_V \frac{\rho}{\epsilon_0} dV \rightarrow \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (4.5)$$

$$\oint_{\partial V} \vec{B} d\vec{S} = 0 \rightarrow \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4.6)$$

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\vec{\Phi}_B}{dt} \rightarrow \nabla \times \vec{E} = -\frac{\delta \vec{B}}{\delta t} \quad (4.7)$$

$$\oint_{\Gamma} \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \left(i_c + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right) \rightarrow \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\delta \vec{E}}{\delta t} \quad (4.8)$$

Sempre dall'elettromagnetismo, viene chiamata induzione \vec{B} la quantità:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4.9)$$

Dove $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ viene detta permeabilità elettrica del materiale (μ_0 del vuoto e μ_r relativa).

La forza generata grazie all'elettromagnetismo viene chiamata forza di Lorentz (dal nome di colui che l'ha indagata e studiata) e segue la seguente formula:

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} \quad (4.10)$$

in cui q è la carica elettrica [C] e \vec{v} è la velocità.

Dato che $v = \frac{dl}{dt}$ e $i = \frac{dq}{dt}$,

$$d\vec{F} = i \vec{B} dl \quad (4.11)$$

dove dl è la lunghezza infinitesimale del conduttore e i la corrente elettrica [A].

che scritta sotto forma di integrale diventa:

$$F = \int_0^L i B dl = iBL \quad (4.12)$$

4.7 Circuito magnetico equivalente

Come per i circuiti elettrici, nell'analisi delle macchine elettriche vengono utilizzati i cosiddetti circuiti magnetici. Esiste quindi una similitudine tra circuiti elettrici e magnetici (riportata nella tabella seguente).

Circuiti elettrici (lineari)	Circuiti magnetici (non lineari)
Tensione V [V]	Forza magnetomotrice NI [A]
Corrente I [A]	Flusso magnetico Φ [Wb]
Resistenza R [Ω]	Riluttanza magnetica R [H^{-1}]
Densità di corrente J [A/m^2]	Densità di flusso B [T oppure Wb/m^2]

4 - Motori brushless a magneti permanenti (PMSM)

Conducibilità elettrica σ [S]= $1/\rho$ [Ω m] $R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{S}$	Permeabilità magnetica μ [H/m] $R = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S}$
Conducibilità σ non dipende da densità di corrente J [A/m^2] Dispersioni di corrente trascurabili	Permeabilità μ dipende da B Dispersione di flusso non sempre trascurabili

Tabella 4-2, Analogie tra circuiti elettrici e magnetici

La riluttanza magnetica, nei motori PMSM è data da diversi contributi:

- R_r -> riluttanza relativa all'acciaio di rotore;
- R_s -> riluttanza relativa ai lamierini di statore;
- R_m -> riluttanza relativa ai magneti.

Nella immagine seguente è riportato lo schema del circuito magnetico equivalente.

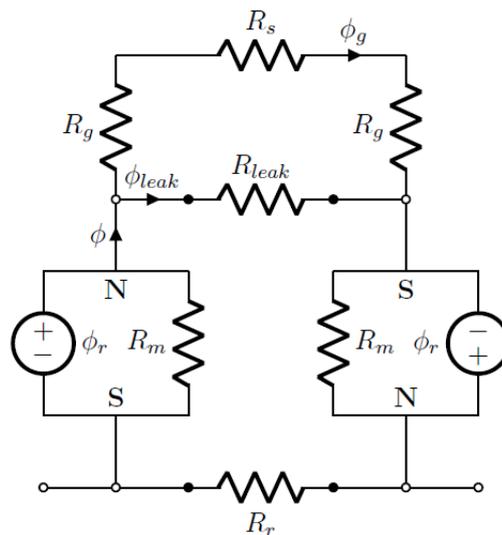


Figure 4.8 Circuito magnetico equivalente

Come si può osservare ci sono le riluttanze elencate prima, assieme ad altri valori:

- Φ_r → flusso generato dai magneti permanenti;
- Φ_g → flusso al traferro (air-gap);
- Φ_{leak} → flusso perso da un magnete all'altro;
- Φ → flusso totale disponibile.

Risolvendo il circuito magnetico è possibile valutare lo spazio necessario affinché si eviti una saturazione magnetica dei materiali.

$$\Phi = B_g A_g$$

(4.13)

In cui $A_g = 2 \cdot \pi \cdot R_{rot} L_{lam}$

Se volessi calcolare il flusso che passa per ogni dente di statore, avendo N denti di statore (uguali al numero di cave) N_s ottengo:

$$\phi_t = \frac{\Phi}{N_s} \quad (4.14)$$

Da cui si può poi ricavare la larghezza del dente di statore (sapendo che il flusso è dato da $B \cdot$ Superficie perpendicolare). In questo caso la superficie perpendicolare a B sul dente è $\omega_t L_{lam}$.

Importante è anche la larghezza di materiale che chiude le cave sullo statore, $\omega_{r,st.}$, senza la quale il flusso generato dai magneti non potrebbe chiudersi al polo sud dei relativi magneti accanto. Per calcolare questo valore si può usare la seguente formula, che tiene in considerazione anche la saturazione magnetica del materiale:

$$\omega_{r,st.} = \frac{\phi_m}{L_{lam}} B_s \quad (4.15)$$

Dove B_s è il valore di flusso di saturazione che dipende da materiale a materiale.

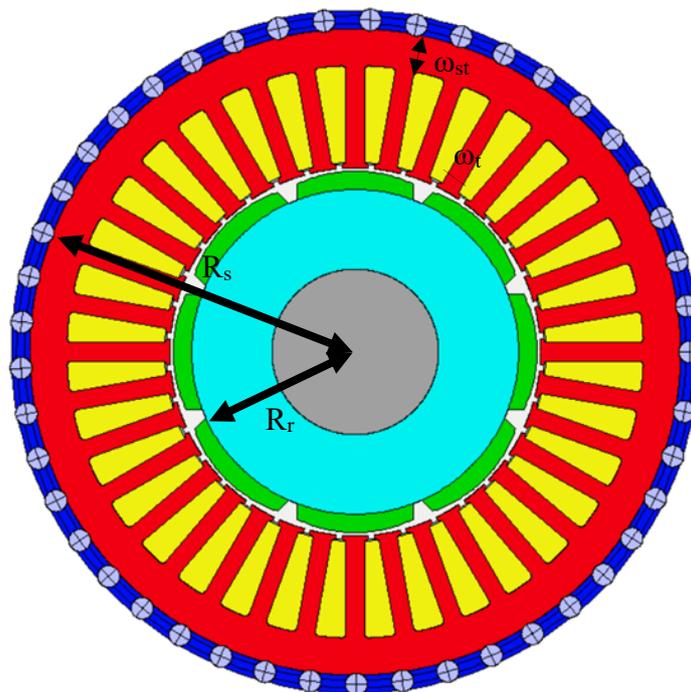


Figure 4.9 Dimensioni radiali motore

4.8 Asse diretto e asse in quadratura

Siccome quando si ha a che fare con corrente alternata la potenza è composta da una parte attiva ($P = Vi \cos \vartheta$) e da una reattiva ($P = Vi \sin \vartheta$), sarà solamente la parte attiva quella che genererà coppia.

Dunque, durante la modulazione della frequenza fatta dall'elettronica di potenza, sarà necessario variare il parametro $\cos \vartheta$ (solitamente sopra il 90%) per ottimizzare la potenza attiva e quindi l'efficienza del motore.

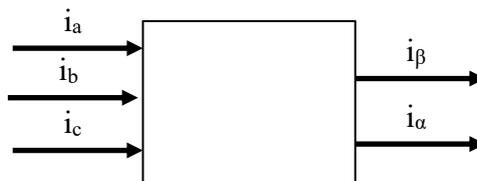
Per effettuare questo controllo è utile modellare il sistema trifase attraverso la trasformata di Clarke. In particolare, essa permette di modellizzare un sistema trifase in uno bifase nel modo descritto tra poco.

Le correnti trifase valgono:

$$\begin{cases} i_a = I \sin(\omega t) \\ i_b = I \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ i_c = I \sin(\omega t - 2\pi/3) \end{cases}$$

(4.16)

La trasformata di Clarke converte le componenti nel dominio del tempo di un sistema trifase (sistema di riferimento abc) in due componenti in un sistema di riferimento stazionario ortogonale ($\alpha\beta$).



Per far ciò bisogna aggiungere un asse per il quale il prodotto tra le tre correnti valga 0. Si ottiene dunque la seguente matrice di trasformazione:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \sin(\omega t) \\ I \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ I \sin(\omega t - 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

(4.17)

Ponendo $i_a = i_\alpha$ e $i_b = i_\beta$, si ottiene ciò che si voleva.

$$\begin{cases} i_\alpha = i_a = I \sin(\omega t) \\ i_\beta = I \sin(\omega t + \pi/2) \end{cases}$$

(4.18)

Una volta fatto ciò, bisogna pensare che l'elettronica di potenza deve sapere istante per istante in che posizione si trova il rotore: per far ciò si utilizza un sensore chiamato resolver che definisce un angolo θ . In ogni istante il S.R. sarà solidale al rotore (quindi con una velocità di rotazione ω). La trasformata di Park definisce due correnti i_d e i_q che rappresentano le proiezioni sugli assi d e q delle correnti di armatura. L'asse DIRETTO è quello in direzione della minima riluttanza, mentre quello in QUADRATURA è ortogonale al primo.

$$\begin{cases} i_d = i_\alpha \cos(\theta) + i_\beta \sin(\theta) \\ i_q = -i_\alpha \sin(\theta) + i_\beta \cos(\theta) \end{cases}$$

(4.19)

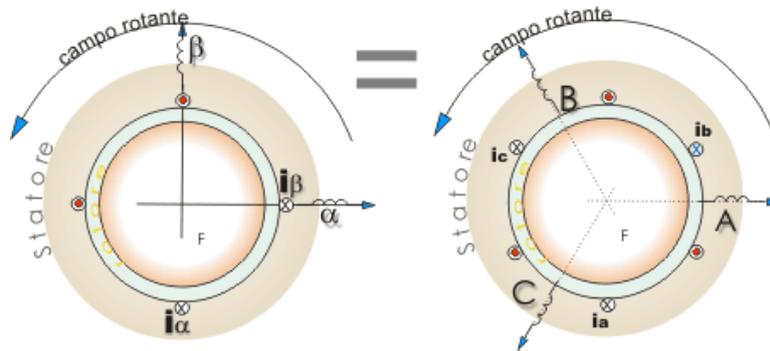


Figure 4.10, illustrazione grafica della Trasformata di Park

Attraverso questi due assi di riferimento, si può rifare il circuito equivalente del motore rispetto a ciascun asse:

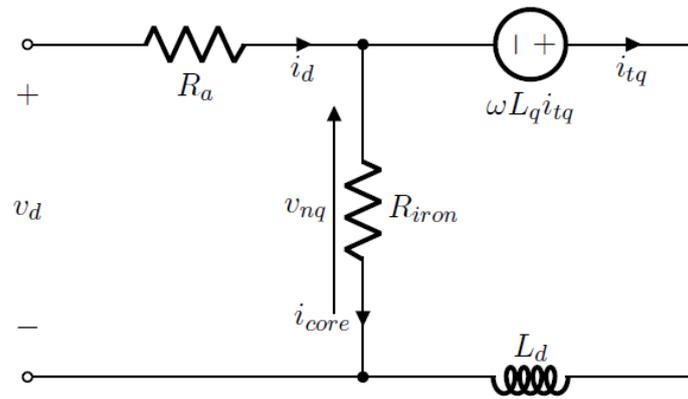


Figure 4.11 Circuito equivalente rispetto all'asse Q

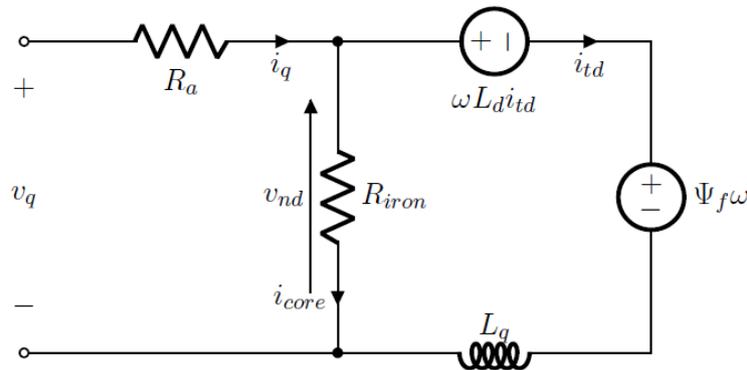


Figure 4.12 Circuito equivalente rispetto all'asse D

In questo modo, risolvendo i due circuiti magnetici si ottiene che la coppia sarà data dai due contributi:

$$T = p(\Psi_d i_{tq} - \Psi_q i_{td}) = p(\Psi_f i_{tq} + (L_d - L_q) i_{td} i_{tq}) \quad (4.20)$$

In cui:

- p = numero di poli magnetici;
- L_d e L_q sono le induttanze rispettive agli assi diretto e in quadratura;
- Ψ_f è il flusso magnetico generato da ciascun magnete.

Nei PMSM con magneti superficiali le induttanze L_d e L_q possono essere considerate uguali, si ottiene così:

$$T = p \Psi_f i_{tq} \quad (4.21)$$

Come si può osservare, solo la corrente lungo l'asse in quadratura genera coppia.

4.9 Costanti di motore

Per determinare le prestazioni e le grandezze in gioco di un motore elettrico, sono state introdotte tre costanti.

4.9.1 Costante di back EMF K_e

La costante di back EMF è stata introdotta per poter valutare appunto la BEMF in base alla velocità di rotazione del rotore.

Come cita la legge di Faraday, se un campo magnetico subisce una variazione nel tempo, un campo magnetico di segno opposto al primo viene autoindotto e si crea una forza elettromagnetica nei conduttori in prossimità.

Ricordando che il flusso al traferro è espresso come:

$$\phi_g = B_g A_g = B_g R_{rot} \theta_p L_{stat}. \quad (4.22)$$

Sostituendo l'espressione nella legge di Faraday:

$$B_{EMF} = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{d\theta_e}{dt} \cdot \frac{d\lambda}{d\theta_e} = \frac{N_m}{2} \omega_m \frac{2N\phi_g}{2} \quad (4.23)$$

Con N = numero di conduttori.

Si ottiene:

$$B_{EMF} = 2NB_g L_{stat} R_{rot} \omega_m = K_e \omega_m \quad (4.24)$$

Da cui si vede come la BEMF sia influenzata dal numero di conduttori, dalle caratteristiche geometriche del motore, dall'induzione al traferro e, come si presupponeva, dalla velocità di rotazione.

4.9.2 Costante di coppia K_t

La costante di coppia è un parametro che è utile per determinare la coppia che eroga un motore in base alla corrente di motore in uso.

Essa proviene da un bilancio di potenza:

$$\omega_m \cdot T = B_{EMF} \cdot i \xrightarrow[\substack{\text{dividendo per} \\ \text{la velocità angolare} \\ \text{e sostituendo la BEMF}}]{=} T = 2NB_g L_{stat} R_{rot} \cdot i = K_T \cdot i \quad (4.25)$$

Siccome le correnti sono alternate, si usa il valore efficace i_{rms} ; dunque, K_T avrà come unità di misura $[Nm/A_{rms}]$.

4.9.3 Costante di motore K_m

Dato che le costanti descritte finora dipendono a fattori quali perdite, ecc, non sono in grado di comparare motori diversi. Per questo motivo è stata introdotta la costante di motore K_m , che rappresenta la capacità di un motore di convertire potenza elettromagnetica in potenza meccanica.

$$K_m = \frac{T}{\sqrt{P_{\text{persa,current}}}} \quad (4.26)$$

Dove

$$P = iR^2 \quad (4.27)$$

Sostituendo diventa:

$$K_m = \frac{K_T \cdot i}{\sqrt{Ri^2}} = \frac{K_T}{\sqrt{R}} \quad (4.28)$$

5 Design dei due motori

Nel seguente capitolo verranno presentati i due motori che lo studente ha modellizzato ed analizzato tramite l'utilizzo dello strumento software Ansys MotorCad[®], un software multi fisico, che integra analisi elettromagnetiche, termiche, lab e meccaniche.

Questi due motori vengono montati su carri trincia miscelatori delle stesse dimensioni e quindi subiranno entrambi sforzi simili.

5.1 Tipologia di motori

I due motori elettrici sono prodotti da due aziende differenti, per questo motivo da qui in poi ci si riferirà al motore costruito dalla prima casa con il nome di “motore 1”, mentre per quello costruito dalla seconda casa ci si riferirà con “motore 2”.

Entrambi i motori sono del tipo PMSM, con magneti permanenti superficiali e raffreddati ad acqua-glicole.

5.2 Perché l'utilizzo di due motori?

Il lavoro di tesi viene effettuato su due motori differenti in quanto nell'azienda in cui lo studente ha lavorato si hanno avuti alcuni problemi sul motore 1 a lavoro, in particolare si pensa che il motore riuscisse poco a disperdere il calore, con conseguente smagnetizzazione dei magneti.

Dopo alcuni casi di questo tipo, si è deciso di provare a installare un altro motore di taglia simile o un po' più alta e si è potuto notare un notevole miglioramento in termini di efficienza e raffreddamento.

Questo lavoro di tesi serve proprio per dimostrare quanto accaduto e per capire dove un motore difetta e dove l'altro invece eccelle.

5.3 Dati di targa

Nella tabella di seguito vengono riportati i dati di targa dei due motori sul quale è stata effettuata l'analisi.

Dati di targa	Motore 1	Motore 2
N° poli	8	8
I_0 (A _{rms})	360	310.4
T_0 (Nm)	540	540
I_n (A _{rms})	240	293.47
T_n (Nm)	360	514.3
n_n (rpm)	4000	4000
P_n (kW)	150	215.4
V_n (V _{rms})	370	542
K_t (Nm/A)	1.5	1.95
Protection	IP65	IP65

Table 5-1 Dati di targa dei due motori, forniti dalle rispettive case produttrici

Come si può osservare, entrambi hanno la stessa velocità nominale (così non si è dovuto cambiare l'accoppiatore) e stesso numero di poli.

In prima battuta si nota però come il secondo motore sia più potente rispetto al primo, in quanto ha un k_t maggiore del 30% e una potenza nominale più alta, sebbene esso pesino circa uguale.

5.4 Caratteristiche geometriche

Di seguito verranno illustrati i dati geometrici relativi ai due motori, quali \emptyset di statore e rotore, \emptyset dell'albero, numeri di cave, ecc.

5.4.1 Caratteristiche geometriche motore 1

Per quanto riguarda il motore 1, alcuni dati geometrici sono stati ricavati da un report fornito dalla casa costruttrice e altri da un processo di reverse engineering.

5.4.1.1 Design dello statore

Per ricavare alcuni parametri dello statore, sono state utilizzati alcuni metodi di dimensionamento per i motori elettrici.

Ad esempio, dalla bibliografia si sa che il rapporto $\emptyset_{rot}/\emptyset_{stat}$ che massimizza le costanti di motore è 0.56.

Un altro parametro importante è il giogo di statore, in quanto esso deriva da un buon compromesso con coppia e cogging prodotta dal motore. In particolare, se amento la lunghezza del traferro, il ripple di coppia si abbassa ma si abbasserà anche la coppia generata.

Questo può essere dimostrato tramite un bilancio di flusso magnetico al traferro:

$$B_{rot} \cdot A_{rot} = B_g \cdot A_g \rightarrow B_g = \frac{B_{rot} \cdot A_{rot}}{A_g} \quad (5.1)$$

Un buon compromesso può essere ottenuto dimensionando il giogo di statore come metà del numero di cave per polo magnetico.

$$g = \frac{Ns}{2 \cdot Nm} \quad (5.2)$$

Per quanto riguarda le dimensioni dei denti di statore, sono state utilizzate le formule riportate al capitolo 4.7, ponendo come B di saturazione il B_s dell'acciaio elettrico M-350-50-A che equivale a 2,3T.

Infine, per completare il modello, mancano le dimensioni dei magneti permanenti, per i quali la prima casa costruttrice ha fornito un disegno costruttivo riportato nella seguente immagine.

Da questi si può capire il diametro del rotore.

5 - Design dei due motori

Le iterazioni che si sono svolte sono servite per capire quanto valesse la lunghezza del traferro (airgap), in particolare lo si è cambiato mantenendo costanti i diametri esterni di statore e di rotore, cambiando così il diametro interno di statore.

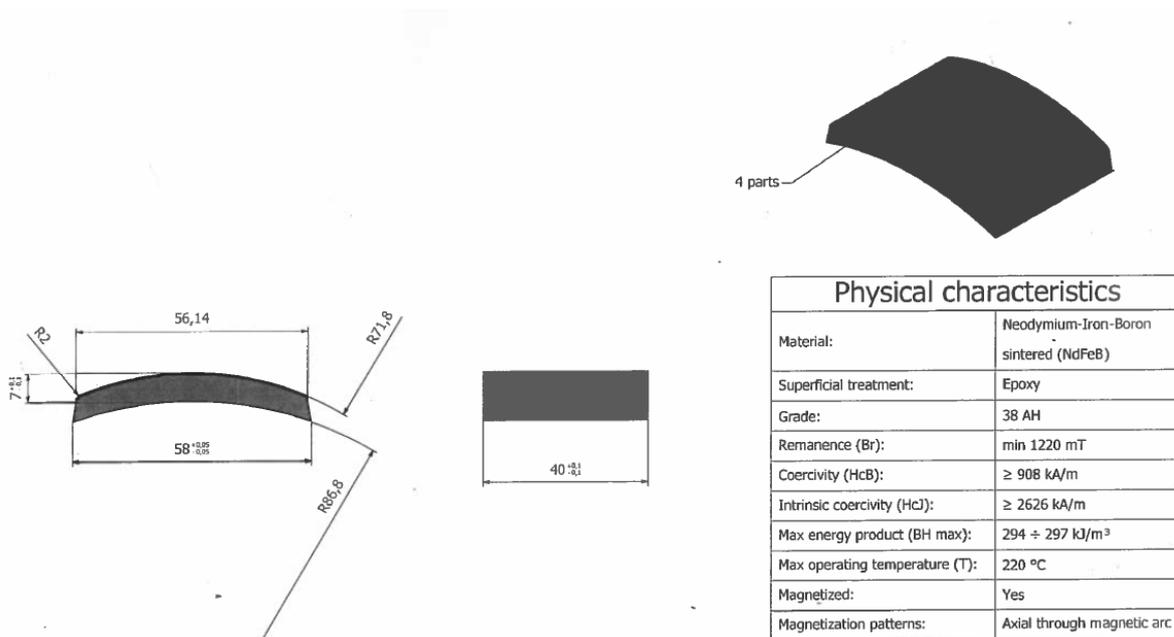


Figure 5.1 Caratteristiche dei magneti permanenti del motore 1

Nella tabella seguente vengono riportati i dati geometrici più importanti del motore 1.

Dato	Valore	Unità
$\varnothing_{est.}$	361	mm
$\varnothing_{est.}$ Lamierino di statore	310	mm
\varnothing_{foro} Lamierino di statore	190	mm
\varnothing_{albero}	55	mm
Airgap (traferro)	2	mm
L_{mot}	533	mm
$L_{statore}$	240	mm
N° di cave	30	
Profondità cava	34	mm
Larghezza dente statore	12	mm
Arco magnetico dei magneti	145	ED
Spessore dei magneti	7	mm
Altezza canale raffreddamento	4	mm
Larghezza canale raffreddamento	4	mm

Distanza tra fine e inizio di 2 canali di raffreddamento	7	mm
--	---	----

Tabella 5-1, dati geometrici motore 1

Nelle immagini seguente viene mostrato come risulta il modello sul software.

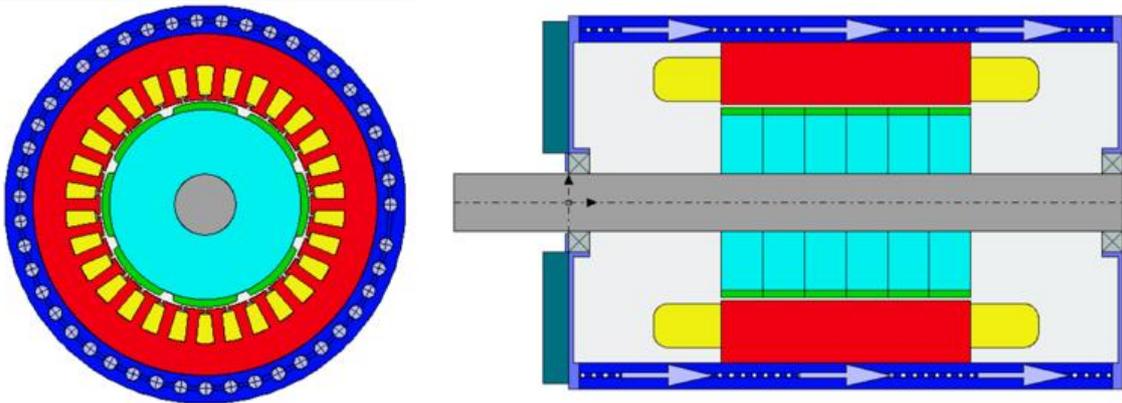


Figure 5.2 Risultato modellazione motore 1

Come si osserva in figura 5.2, il motore ha 6 file da 8 magneti permanenti superficiali, per un totale di 48 magneti. Ogni fila di magneti è sfasata dalla precedente di un angolo α in modo tale da ridurre il ripple di coppia. Questo angolo è determinato dalle seguenti formule:

$$\alpha_{skewE} = \frac{Nm}{Ns} \cdot 180 = \frac{8}{30} \cdot 180 = 48 \text{ [E deg]} \quad (5.3)$$

$$\alpha_{skewM} = \alpha_{skewE} \cdot \frac{2}{Nm} = 12 \text{ [M deg]} \quad (5.4)$$

Quindi ogni fila è sfasata di:

$$\alpha = \frac{\alpha_{skewM}}{Nfile} = 2^\circ \quad (5.5)$$

5.4.2 Caratteristiche geometriche motore 2

Per quanto riguarda il motore 2, invece, la maggior parte dei dati geometrici sono stati presi da un modello 3d del motore fornito dalla casa costruttrice. Gli unici dati geometrici che non si hanno sono quelli relativi ai magneti permanenti (spessore, materiale).

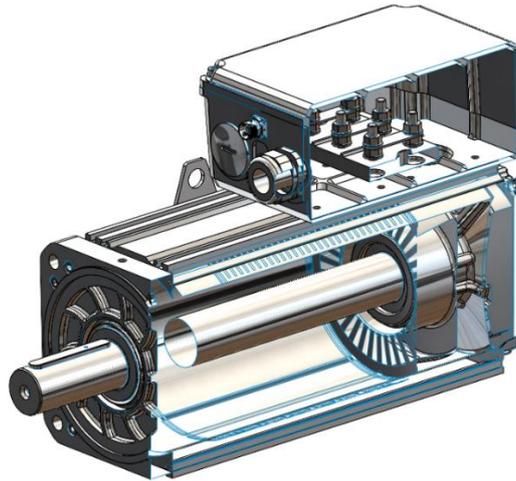


Figure 5.3 Modello 3d del motore 2 sezionato

Dato	Valore	Unità
$\varnothing_{est.}$	260	mm
$\varnothing_{est.}$ Lamierino di statore	246	mm
\varnothing_{foro} Lamierino di statore	140	mm
\varnothing_{albero}	63	mm
Airgap (traferro)	1.2	mm
L_{mot}	533	mm
$L_{statore}$	312	mm
N° di cave	32	-
Profondità cava	39	mm
Larghezza dente cava	7	mm
Arco magnetico dei magneti	145	ED
Spessore dei magneti	?	mm
Altezza canale raffreddamento	3	mm
Larghezza canale raffreddamento	6.5	mm
Distanza tra fine e inizio di 2 canali di raffreddamento	3.5	mm

Tabella 5-2 Dati geometrici motore 2

Per trovare i parametri geometrici dei magneti, sono state eseguite diverse simulazioni cambiando ogni volta lo spessore e il tipo di materiale fino a quando i valori di potenza erogata, di kt e di coppia non erano simili a quelli dei dati di targa. Questo lavoro di simulazione e di ottenimento dei parametri è stato eseguito dopo aver trovato alcuni valori per gli avvolgimenti, descritti nel sotto capitolo successivo.

In particolare, si sono ottenuti i seguenti risultati:

Dato	Valore	Unità
Spessore dei magneti	4	mm
Materiale dei magneti	N35UH	

Dato	Valore di targa	Valore di simulazione
Potenza nominale erogata (kW)	215	219
Coppia nominale erogata (Nm)	514.3	526
K_t	1.95	1.95

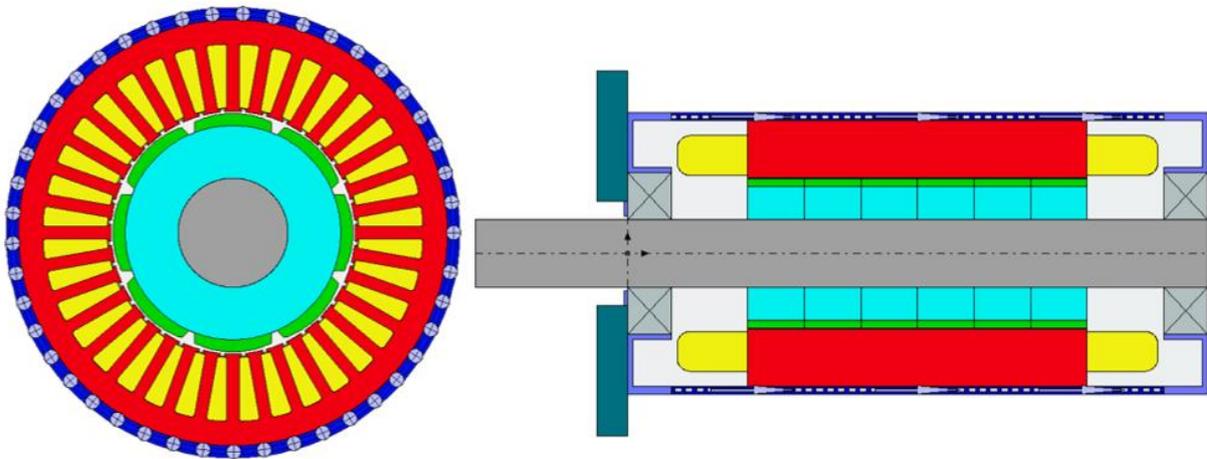


Figure 5.4 Immagine radiale e assiale di statore e rotore del motore 2

Il motore 2 possiede, come nel motore 1, 6 file da 8 magneti ciascuno, per un totale di 48 magneti permanenti superficiali.

5.5 Avvolgimenti di statore

Durante la progettazione degli avvolgimenti in un motore elettrico, è importante rispettare il fatto che il parametro \vec{j} (densità di corrente) stia al di sotto di $7 \frac{Arms}{mm^2}$, in quanto quest'ultimo influisce direttamente sulla resistenza di fase. Per far ciò esistono diversi metodi:

- uno è quello di dividere la corrente in più “vie” per ciascuna fase (parallel paths), potendo così diminuire i cavi elettrici per ogni giro e quindi diminuire anche l’area delle cave. Il problema di questo metodo sta nella produzione di avvolgimenti, che diventa più onerosa.
- Il modo più semplice è quello di allargare le cave di statore ed aumentare il numero di cavi elettrici per ogni giro di avvolgimento. Così facendo si ridurrà il numero di giri fattibili, ma ciò non crea problemi particolari perché ce n’è bisogno di pochi.

5.5.1 Avvolgimenti motore 1

Per ciò che concerne gli avvolgimenti di statore, il motore 1 ha 30 cave (slots) e dal report si è visto che in ogni slot passano 132 conduttori. Sapendo che per ogni coil si hanno 2 giri, il numero di conduttori per avvolgimento è dato da $(132/2)/2=33$ conduttori per avvolgimento.

Dato	Valore	Unità di misura
N_{turns}	2	-
$N_{strands}$	33	-
Layers	2	-
Cond/slot	132	-
\varnothing_{wire}	1.217-1.120	mm

Tabella 5-3, Dati degli avvolgimenti del motore 1

Con questi dati di input degli avvolgimenti, si ottiene una densità di corrente pari a $6.65 \frac{Arms}{mm^2}$ e un rendimento del motore di 0.97.

Nell’immagine di seguito si può osservare come risulterà modellizzato l’avvolgimento nella cava di statore.

5 - Design dei due motori

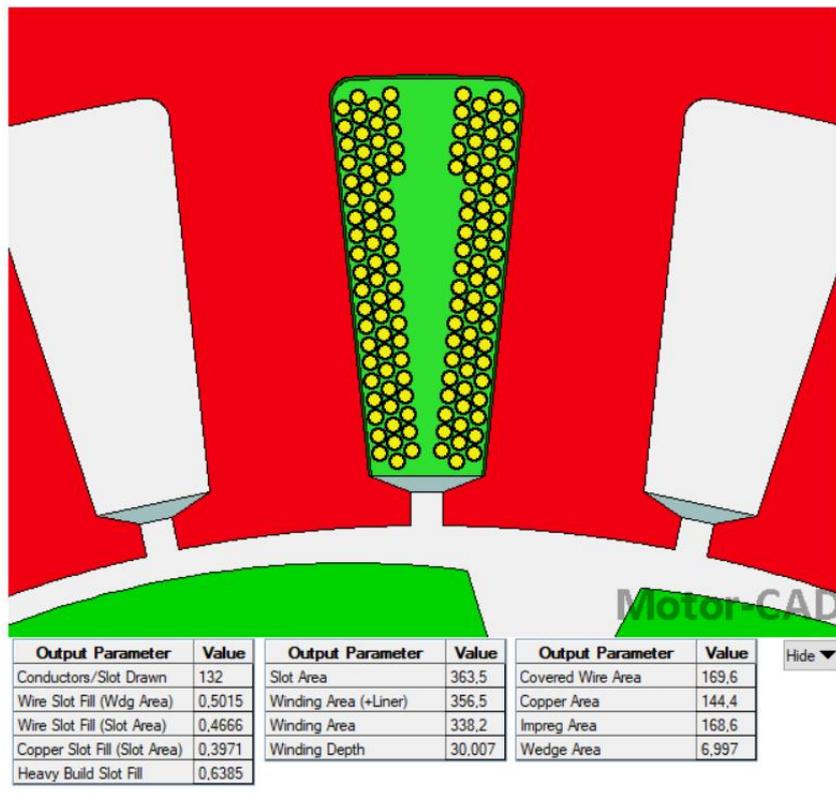


Figure 5.5 Caratteristiche conduttori nella cava di statore, motore 1

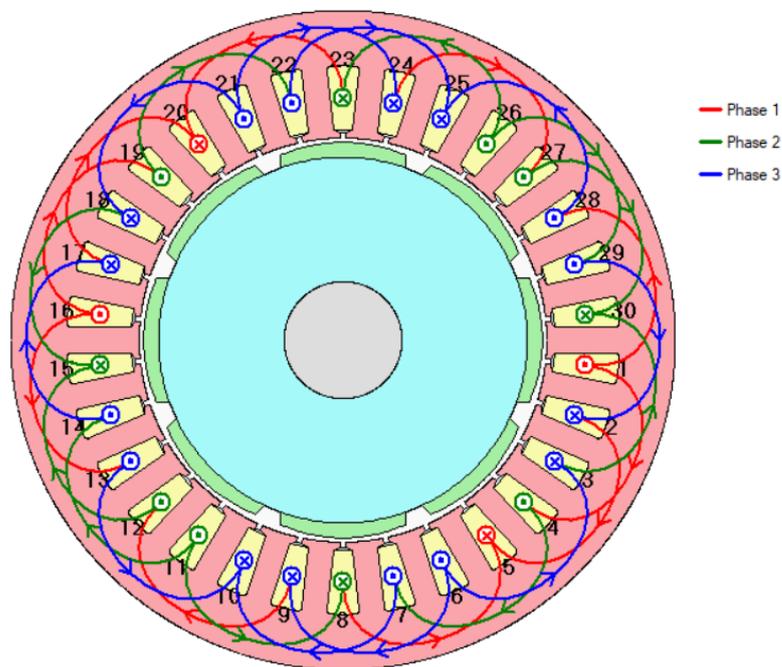


Figure 5.6 Disposizione degli avvolgimenti, motore 1

Dalle simulazioni che si sono potute effettuare, si sono ottenuti i grafici di BEMF-POSIZIONE e di COPPIA-VELOCITÀ (fig.5.7).

5 - Design dei due motori

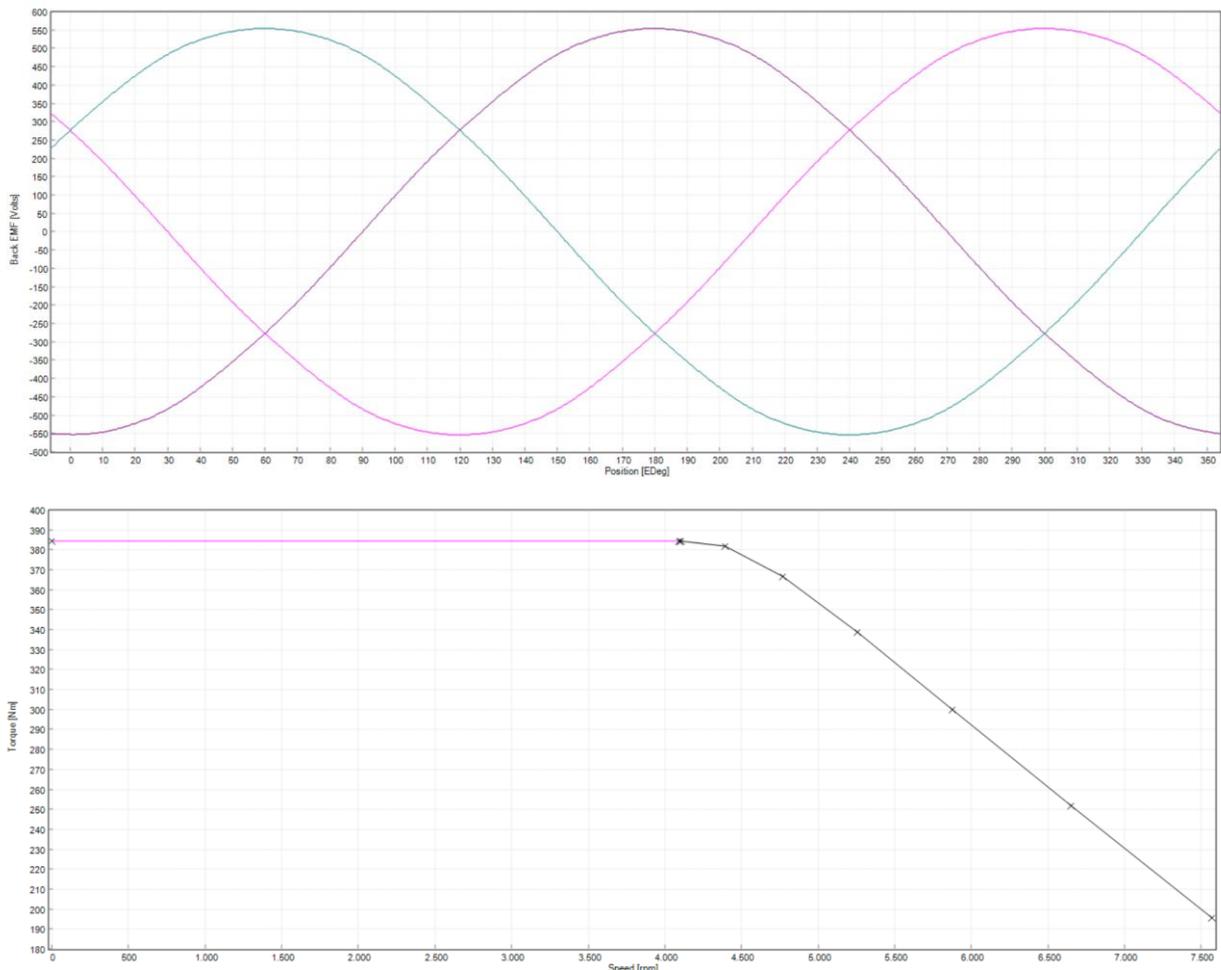


Figure 5.7 , BEMF-Position e Coppia-Velocità motore 1

5.5.2 Avvolgimenti motore 2

Per quanto riguarda la modellazione degli avvolgimenti di motore 2, invece, si è dovuto proseguire ad un processo di reverse-engineering in quanto non si avevano dati a disposizione. Sono infatti state eseguite diverse simulazioni iterative per ottenere i valori di targa del motore; nel dettaglio sono stati modificati i numeri di giri per avvolgimento, il diametro del conduttore, ecc.

La configurazione ottenuta presenta così i seguenti parametri:

Dato	Valore	Unità di misura
N_{turns}	2	-
N_{strands}	38	-
Layers	2	-
Cond/slot	152	-
$\varnothing_{\text{wire}}$	1.279-1.180	mm

Tabella 5-4 Dati degli avvolgimenti del motore 2

Con questi dati di input degli avvolgimenti, si ottiene una densità di corrente pari a $7 \frac{Arms}{mm^2}$ e un rendimento del motore di 0.97.

Nell'immagine di seguito si può osservare come risulterà modellizzato l'avvolgimento nella cava di statore.

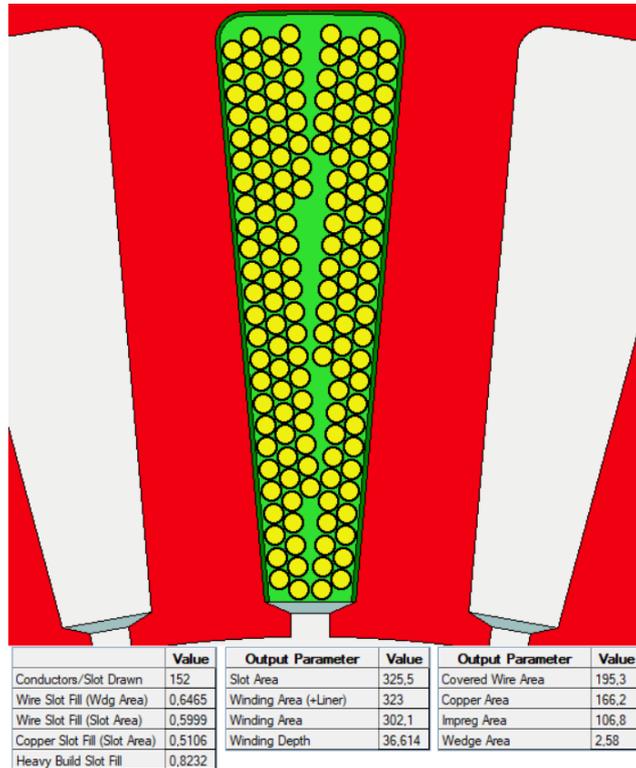


Figure 5.8 Caratteristiche conduttori nella cava di statore, motore 2

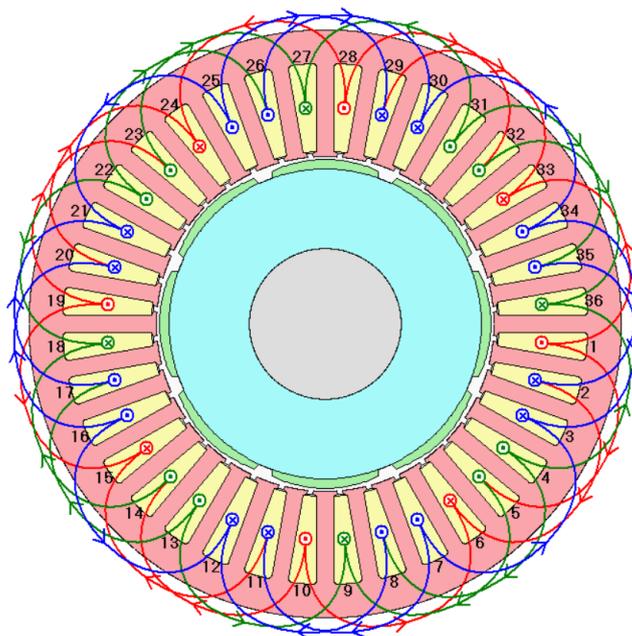


Figure 5.9 Disposizione degli avvolgimenti, motore 2

I grafici di BEMF-POSIZIONE e di COPPIA-VELOCITÀ:

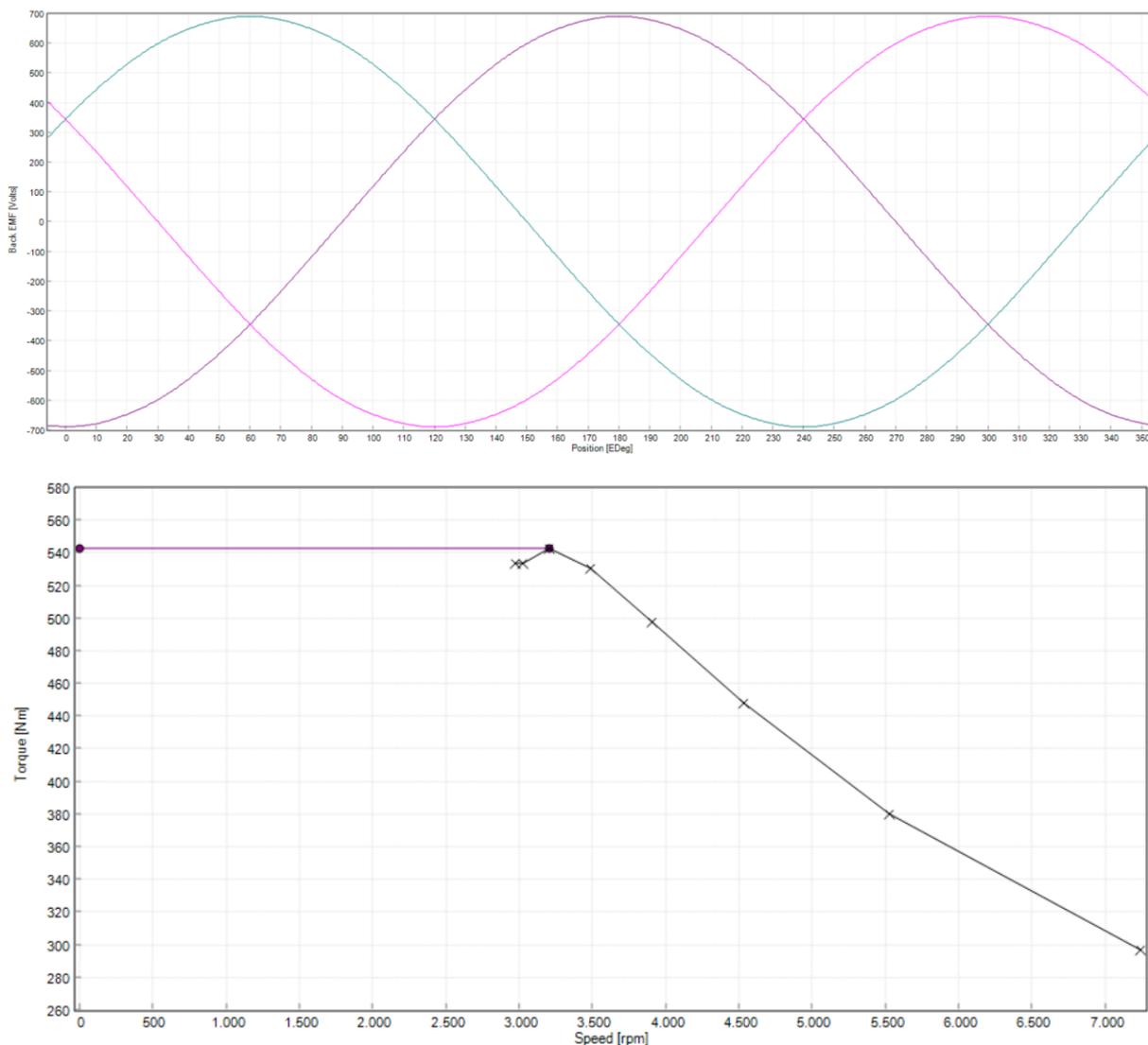


Figure 5.10 BEMF-Position e Coppia-Velocità motore 2

5.6 Analisi di convergenza

Dato che il software Ansys MotorCad[®] è un software di calcolo che utilizza il metodo degli elementi finiti, occorre trovare la “bontà” della mesh per ottenere un giusto compromesso tra accuratezza dei risultati e tempo di calcolo.

Per fare ciò, è stata effettuata un’analisi di convergenza sul motore 1 e, dato che il motore 2 ha circa le stesse grandezze e caratteristiche geometriche, si è usata la stessa tipologia di mesh per il motore 2.

In particolare, MotorCad[®] offre la possibilità di discretizzare il modello assegnando diverse lunghezze di mesh ai componenti che lo compongono come magneti, lamierini di statore e di rotore, cave di statore e traferro.

Con il termine “lunghezza” di mesh si intende la distanza tra i nodi della mesh in ciascuna sezione del motore.

C’è poi ancora un parametro chiamato “minimum length point separation” che consiste nella distanza al di sotto della quale due punti vengono considerati come un punto di mesh unico.

Sono state fatte 4 analisi di calcolo diverse, ciascuna con una mesh via via più fitta e si è plottato su un grafico il valore calcolato di potenza elettromagnetica rispetto al numero di punti utilizzati nelle mesh.

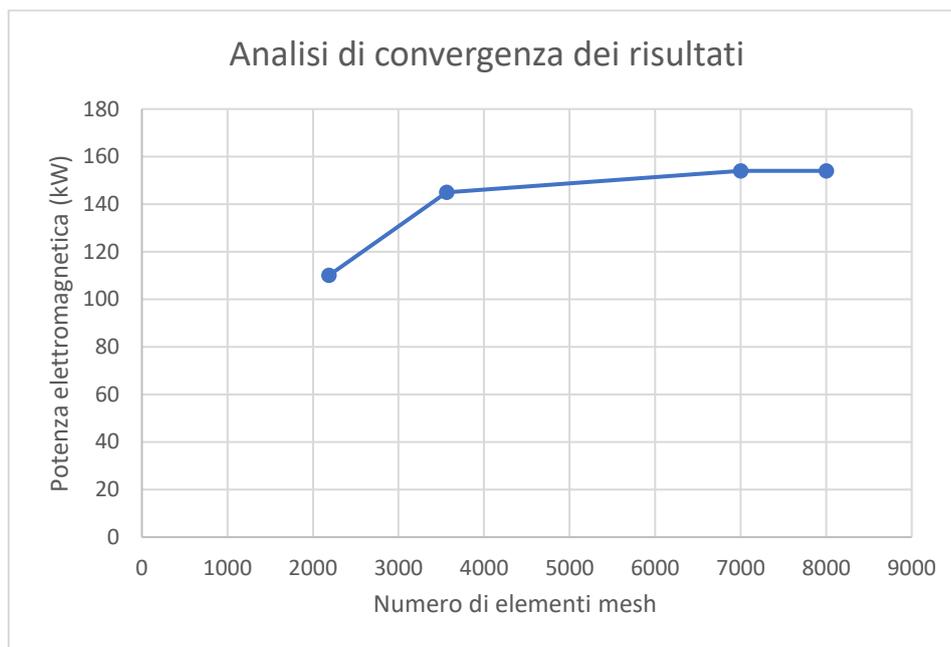


Grafico 5-1 Analisi di convergenza del motore 1

Come si può osservare, arrivati a una determinata compattezza della mesh i risultati variano di poco mentre i tempi di calcolo si allungano di parecchio.

Per ottenere un modello di calcolo più accurato, è bene discretizzare meglio quelle parti dove il campo magnetico varia maggiormente, come i magneti e il traferro. La configurazione di mesh finale che si è deciso di usare è riportata nella seguente tabella:

Dati	Valori	Unità
Stator lam	3	mm
Stator slot	3	mm
Magnet lenght	2.5	mm
Airgap lenght	2.5	mm
Nodes num	7040	-
Element num	3636	-

Tabella 5-5, Parametri mesh

Di seguito viene mostrata la mesh di calcolo di una parte di motore.

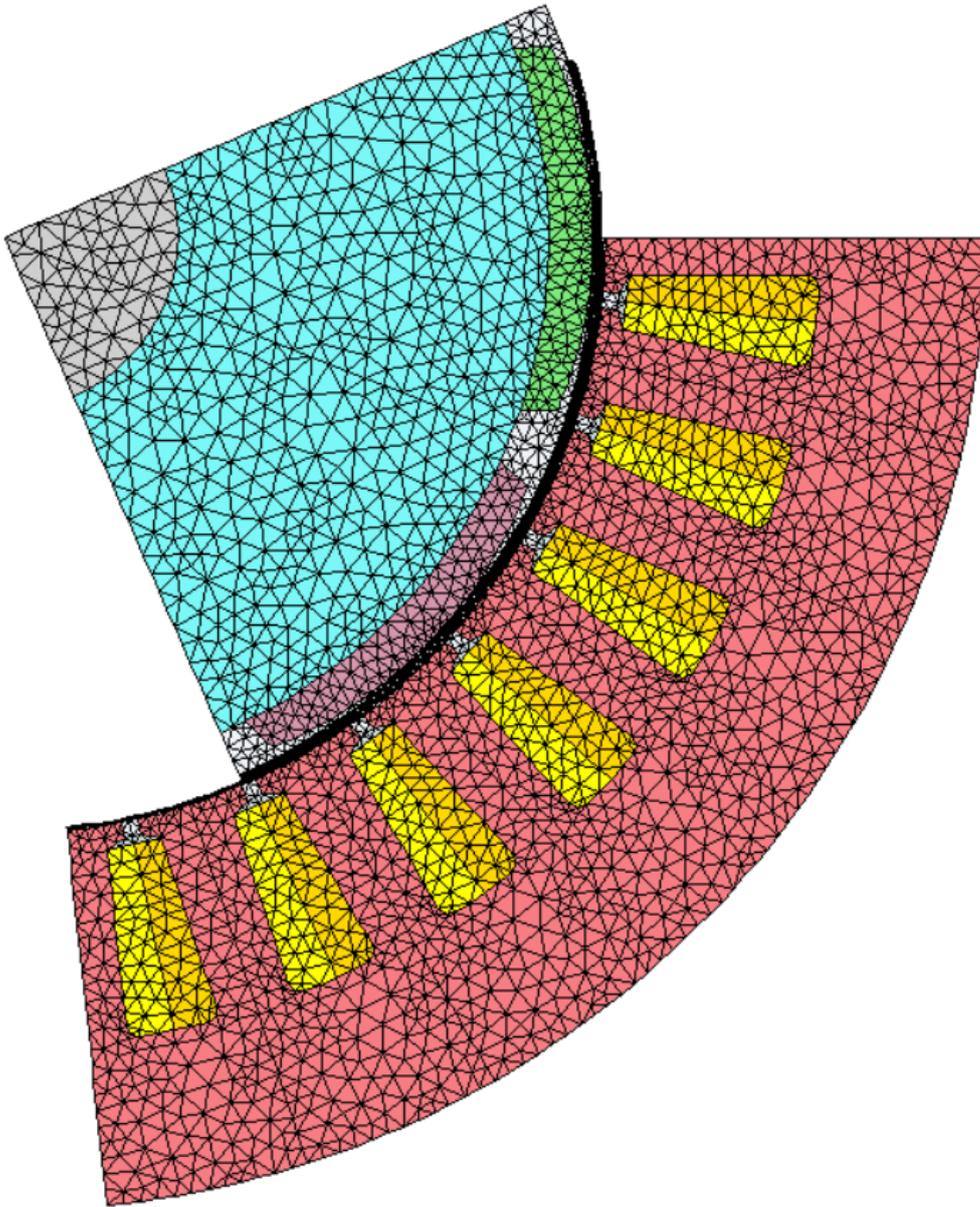


Figure 5.11 Mesh di un quarto di motore 1

6 Analisi dei materiali

L'unico materiale di cui si ha dei dati è quello dei magneti permanenti, che, come visto in precedenza sono in NdFeB.

Per quanto riguarda i materiali di statore e rotore, invece, si è deciso di provare a scegliere quello che migliora le prestazioni senza però essere troppo costoso.

Esistono diverse tipologie di materiali che permettono la circolazione di un buon flusso magnetico senza avere perdite di potenza eccessive. Le perdite di potenza sono dovute essenzialmente a causa del ciclo di isteresi dei materiali (al capitolo 4.2 si è parlato di quello dei magneti permanenti) e alle correnti parassite indotte. Queste ultime sono dovute ad una variazione nel tempo del campo magnetico, mentre le perdite per isteresi sono dovute ai cicli di magnetizzazione dei materiali: dove i grani precedentemente orientati devono spendere dell'energia per riorientarsi seguendo l'andamento del campo magnetico.

Il modello empirico di *Steinmatz* è quello che viene utilizzato per quantificare le perdite dovute proprio a questi due fattori.

$$P_{\omega} = k \cdot f^a \cdot B^b$$

Dove k, a, b sono parametri ottenuti dalla curva B-H durante i cicli di isteresi; f è la frequenza e B è l'induzione magnetica.

P_{ω} consiste in una perdita di potenza ed ha come unità di misura $\frac{W}{kg}$.

Solitamente i materiali utilizzati per motori elettrici sono i cosiddetti "acciai elettrici", cioè materiali ferromagnetici composti da ferro e silicio.

L'acciaio elettrico è una lega ferrosa con un contenuto di silicio che può oscillare da zero a 6,5%. Le leghe commerciali di questi acciai hanno solitamente un contenuto di silicio che arriva fino a 3,2% (percentuali maggiori di solito provocano fragilità durante la laminazione a freddo).

Possono contenere manganese ed alluminio fino allo 0,5%.

Il silicio aumenta significativamente la resistività elettrica dell'acciaio, che diminuisce le correnti parassite indotte e restringe il ciclo di isteresi del materiale, riducendo così la perdita nel nucleo (core). Tuttavia, la struttura del grano indurisce e rende fragile il metallo, che influenza negativamente la lavorabilità del materiale, soprattutto quando viene laminato.

Esistono 2 tipologie di acciai elettrici:

- A grani orientati;
- A grani non orientati.

Nei motori elettrici vengono utilizzati gli acciai elettici a grani non orientati in quanto quelli a grani orientati possono dare problemi a causa del fatto che il flusso magnetico varia col tempo e non sarebbe sempre concorde con la direzione dei grani. Al contrario, gli acciai elettrici a grani orientati vanno molto bene per applicazioni statiche come nei trasformatori.

6.1 Materiali per lo statore

Come si sa, lo statore è composto da un pacco di lamierini per evitare le correnti parassite indotte. I materiali con i quali vengono creati questi lamierini devono avere alti valori di saturazione magnetica e basse perdite di potenza.

Lo standard che classifica gli acciai elettrici per statore lo si è preso da *Voestalpine Isovac* che, secondo la norma EN 10027-1, assegna una designazione di questo tipo:

$$M - n n n - n n - a$$

Dove:

- M - sta per acciaio magnetico;
- N n n – indica le perdite specifiche in $\frac{W}{kg} \cdot 100$;
- n n – indica lo *spessore* $\cdot 100$;
- a – può valere i seguenti parametri:
 - A → acciaio non orientato;
 - D → acciaio non legato non sottoposto a completa ricottura;
 - E → acciaio legato non sottoposto a completa ricottura.

Per ridurre le correnti parassite e quindi le perdite sul pacco di lamierini di statore, diverse analisi sono state fatte provando a cambiare tipo di materiale su lamierini di spessore 0.05 mm, quindi con un acciaio del tipo M-nnn-50-A.

In particolare, sono stati utilizzati al fine di analisi i seguenti materiali:

- M-350-50-A;
- M-400-50-A;
- M-470-50-A;
- M-800-50-A.

Nel grafico seguente si può osservare come effettivamente cambino le perdite di potenza scegliendo via via un materiale con maggior perdita specifica.

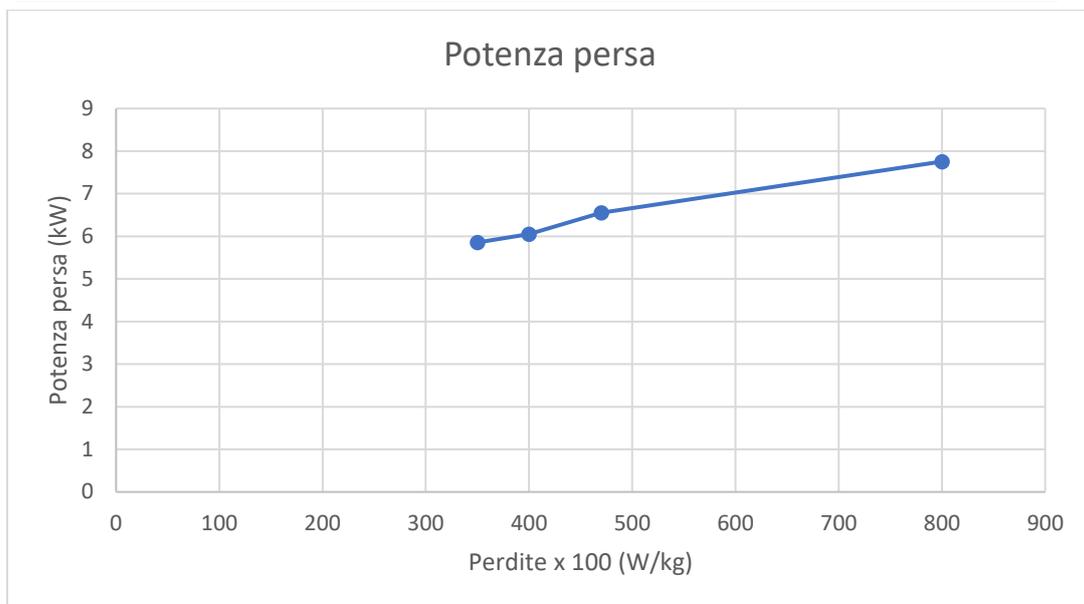


Grafico 6-1 Perdite di potenza in base al materiale di statore

Come già ci si poteva aspettare, il materiale più performante è l' M-350-50-A perché quello che riesce a contenere meglio le perdite. Sicuramente se si utilizzasse un materiale ancora più sottile come l' M-250-35-A si avrebbero ancor meno perdite di potenza.

Si è però deciso di modellizzare lo statore con l' M-400-50-A, scelta plausibile dal punto di vista economico.

Il materiale scelto sarà anche quello utilizzato per la modellizzazione del motore 2.

6.2 Materiali per il rotore

Siccome nei motori sincroni il rotore ruota sincrono con il campo magnetico rotante generato dalle bobine di statore, sul rotore non si avranno grossi sbalzi di flusso magnetico e quindi saranno molto minori le perdite di potenza dovute a eventuali correnti parassite (rispetto a quelle di statore). Per questo motivo si può optare per un rotore solido (che è anche più semplice dal punto di vista produttivo), senza doverlo frammentare in lamierini. Se invece si optasse per il design del rotore con lamierini, esso sarebbe tanto più facile quanto più piccolo è il rotore, in quanto man mano che il \varnothing aumenta sorgono problemi di inerzia e di bilanciamento. Per ovviare a questi problemi spesso si ricorre allo "spider design" dei lamierini, mostrato nella figura seguente.

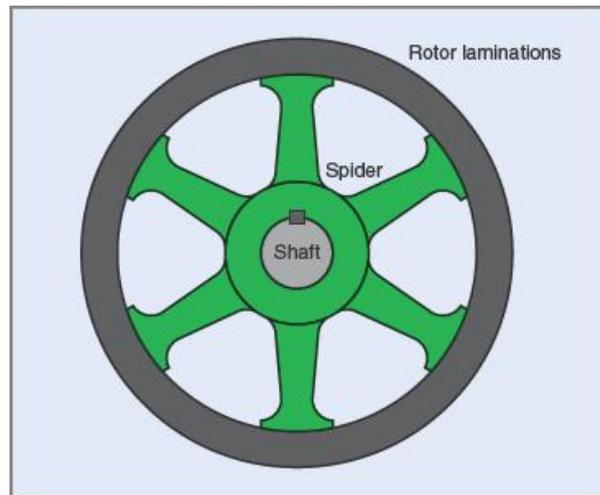


Figure 6.1 Spider design del rotore

Questo permette una notevole diminuzione di peso e quindi di relativa inerzia.

L'analisi effettuata dallo studente si è deciso di farla considerando il rotore costituito da lamierini, in quanto è molto raro, su motori di questa taglia, che il rotore sia solido.

Questo evita di fatto problemi che potrebbero essere dovuti alle correnti parassite potenziali sul rotore e sui magneti, che potrebbero causare innalzamenti di temperatura in alcune zone e quindi relativa smagnetizzazione dei magneti.

Nell'analisi agli elementi finiti si è deciso quindi di utilizzare per i lamierini di rotore lo stesso materiale usato per i lamierini di statore.

Dati	Valori		Unità di misura
	Motore 1	Motore 2	
Perdite per isteresi	6.667	5.04	W
Perdite per correnti parassite	0.73	1.42	W
Perdite totali	7.4	6.467	W
Efficienza	0.96	0.97	-

Tabella 6-1, Perdite sul rotore dei motori

Per quanto riguarda il materiale dei magneti permanenti, sappiamo essere NdFeB.

Per i magneti al NdFeB esistono diversi gradi: il grado è un codice che inizia sempre con la lettera N (abbreviazione di Neodymium) ed è seguito da due cifre (es. N27, N30, N33, N35, N38, N40, N42, N45, N48, N50). Esso sta ad indicare il prodotto d'energia. Un suffisso costituito da una o due lettere dell'alfabeto che talora segue il numero (H, M, SH, EH, UH ecc)

sta ad indicare la cosiddetta temperatura di Curie, raggiunta la quale i magneti si smagnetizzano in maniera irreversibile.

In particolare:

- Nessun valore \rightarrow 80°C
- M \rightarrow 100°C
- H \rightarrow 120°C
- SH \rightarrow 150°C
- UH \rightarrow 180°C
- EH \rightarrow 200°C
- AH \rightarrow 220°C

I gradi più bassi hanno "meno forza attrattiva", i gradi più alti hanno una forza maggiore. In commercio esistono magneti con gradi compresi tra N24 e N55; tuttavia, i gradi superiori a N52 non sono facilmente reperibili.

Come si è potuto vedere in precedenza al capitolo 4.2, il motore 1 è composto da magneti in NdFeB di grado N38AH.

Per quanto riguarda il motore 2, invece, la scelta del materiale del magnete è stata fatta in maniera iterativa, assieme al valore dell'airgap descritto nel capitolo precedente; nel dettaglio, il motore 2 è stato modellizzato con magneti in N35UH.

7 Dati di telemetria e scelta del duty cycle

Grazie alla presenza di sensori sul motore, è possibile avere i dati di funzionamento della macchina lungo il tempo di un ciclo di lavoro che essa svolge.

Il ciclo di lavoro di un carro miscelatore è solitamente composto da 3 fasi principali:

1. Caricamento dei prodotti;
2. Miscelazione;
3. Scarico dell'alimentazione.

In ciascuna di queste fasi la macchina si può spostare per raggiungere i diversi luoghi all'interno di un'azienda di allevamento. Le fasi 1 e 2 in realtà spesso e volentieri coesistono per diminuire i tempi di lavoro; queste sono le fasi in cui la macchina richiede maggior potenza in quanto si devono sminuzzare e mescolare i diversi ingredienti.

I carri miscelatori elettrici Supertino sono dotati di un sistema di telemetria dei dati, ovvero un sistema di acquisizione e di invio di dati durante il funzionamento della macchina e durante il ricaricamento del pacco batterie.

Di seguito vengono elencati alcuni valori che si possono acquisire e inviare durante il funzionamento della macchina.

Dati	Unità di misura
Velocità del motore	rpm
Corrente di motore	A_{rms}
SOC	%
Temp. di motore	°C
Temp. elettronica di potenza	°C
Temp. pacco batterie	°C
Potenza pacco batterie	kW
Corrente pacco batterie	A

Nell'immagine seguente è riportato un grafico della SOC (percentuale di batteria) durante una giornata di lavoro della macchina, più precisamente del 13 agosto, data scelta appositamente per valutare la dispersione termica dei due motori nelle peggiori condizioni (giornate estive molto calde). Il macchinario in questione è equipaggiato col motore 1.

7 - Dati di telemetria e scelta del duty cycle

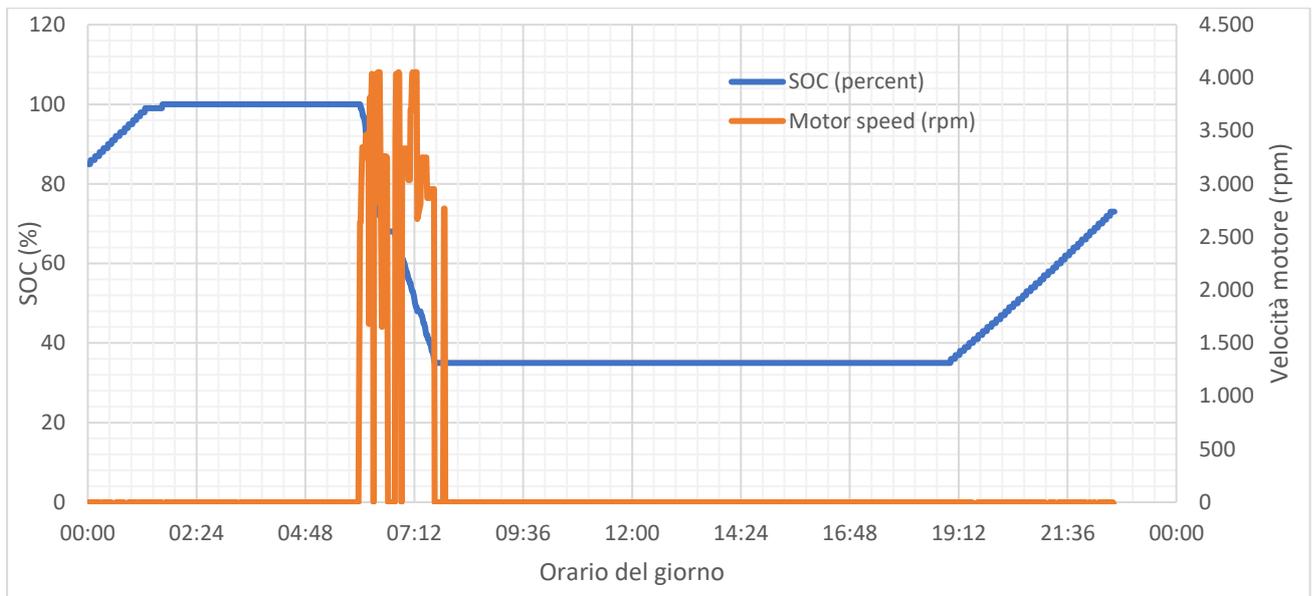


Grafico 7-1 Ciclo di lavoro

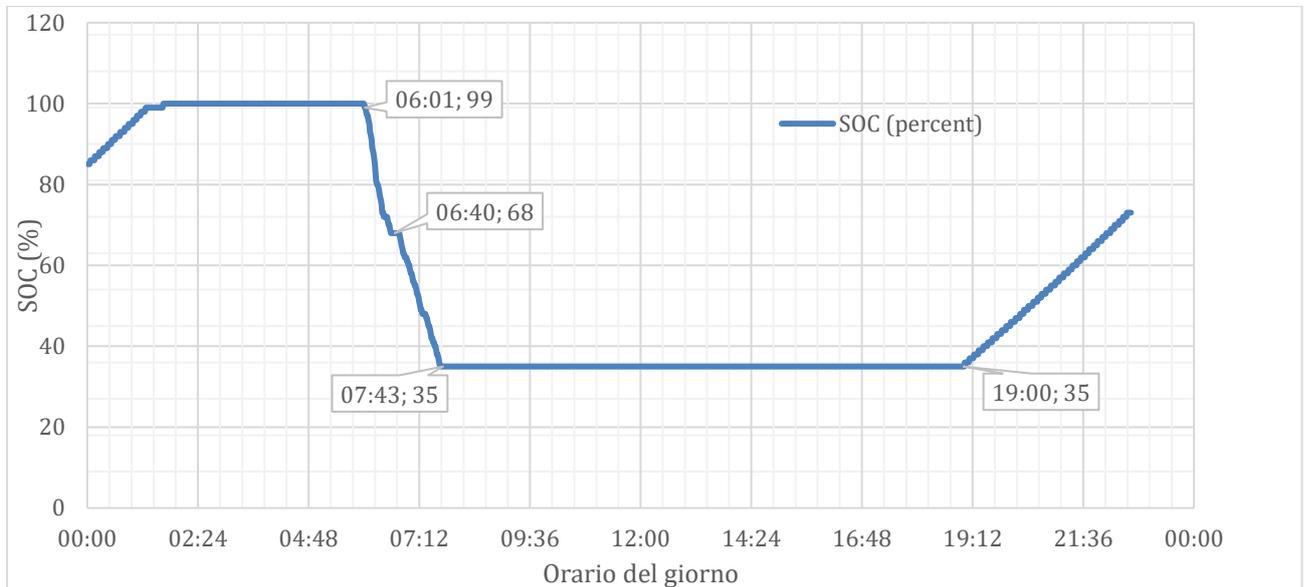


Grafico 7-2 State of Charge, ciclo di lavoro

Come si può osservare, la macchina ha subito un ciclo di lavoro da circa le 6:00 alle 8:50 del mattino ed è stata messa in carica verso le 19 circa. Il fatto che sia stata rimessa in carica la sera fa pensare che sia stato fatto perché di notte la corrente elettrica costa meno (probabilmente l'azienda agricola che possiede il macchinario non è equipaggiata di pannelli fotovoltaici).

Il ciclo di lavoro è composto in realtà da due cicli, perché come avviene nella maggior parte dei casi si effettuano 2 miscele e due scarichi ogni mattina. Si nota infatti che verso le 6:40 del mattino la macchina rimane alla stessa SOC per una decina di minuti, per poi riprendere i consumi. Ciò è spesso dovuto al fatto che tra una miscelata e l'altra ci si sposta all'interno dell'azienda a macchina vuota, consumando poca energia.

7 - Dati di telemetria e scelta del duty cycle

Si è scelto allora come ciclo di lavoro quello composto dalle due miscelate, della durata di circa 1 ora e 40 min in cui la batteria è scesa del 65%.

Nel grafico riportato sotto vengono mostrati i valori teletrasmessi delle diverse temperature nel solo ciclo di lavoro.

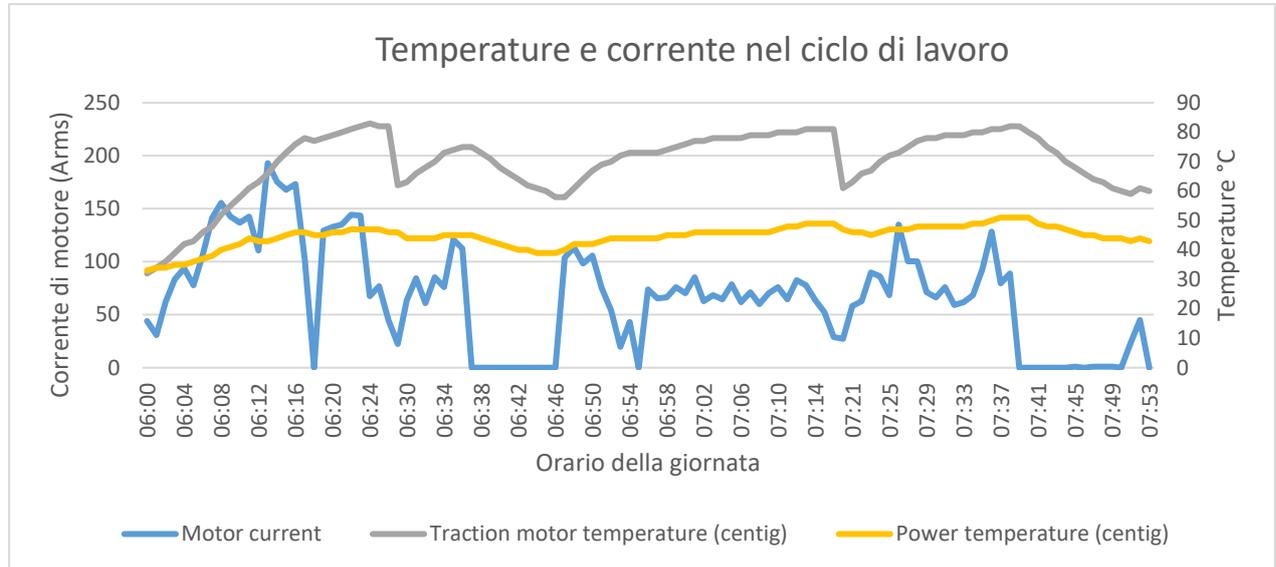


Grafico 7-3 Andamento temperature e corrente

Come si può osservare, la temperatura del motore ha dei picchi che tendono ad abbassarsi nel momento in cui la corrente di motore diminuisce.

È importante sottolineare che la temperatura di motore è in realtà una temperatura presa da un sensore NTC posto tra i lamierini di statore; quindi, questo dato non riflette realmente la temperatura nel nucleo del motore.

Proprio per questo successivamente verrà eseguita un'analisi termica dei due motori tramite il duty-cycle scelto.

8 Analisi termica

In questo capitolo verrà eseguita un'analisi di dispersione termica sui motori e ne verranno descritti i risultati.

Entrambi i motori sono raffreddati tramite una camicia esterna allo statore in cui scorre una miscela di acqua e glicole al 50% (essenziale per aumentare la temperatura di ebollizione dell'acqua).

La camicia esterna è composta da una conchiglia esterna e una interna. La conchiglia interna è quella che deve dissipare il calore, per questo motivo viene solitamente fatta in lega di alluminio; la conchiglia esterna invece, avendo soltanto funzione di supporto e non di dissipazione, è solitamente fatta in acciaio ed è proprio su questa che vengono lavorati i canali di raffreddamento.

Le dimensioni dei canali di raffreddamento e delle portate d'acqua sono riportate in tabella per entrambi i motori.

Dati	Valori		Unità di misura
	Motore 1	Motore 2	
WJ channel - lam	10	2	mm
WJ channel height	4	3	mm
WJ channel width	4	6.5	mm
WJ channel spacing	7	3.5	mm

Tabella 8-1 Caratteristiche geometriche della camicia di raffreddamento

Per effettuare l'analisi termica, essendo presente un fluido è necessario definire alcuni parametri adimensionali che servono nella fisica alla base, in particolare:

- Numero di Reynolds $\rightarrow R_e = \frac{\rho v L}{\mu} \rightarrow$ è il rapporto tra le forze inerziali e viscose all'interno di un fluido, in cui le particelle si muovono a causa della velocità.
 - v è la velocità di flusso locale in m/s;
 - L è la lunghezza caratteristica (in metri) del fenomeno considerato;
 - μ è la viscosità dinamica [$\frac{kg}{m \cdot s}$];
 - ρ è la densità in kg/m^3 .

- Numero di Prandtl $\rightarrow Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k} \rightarrow$ esprime il rapporto della diffusività cinematica rispetto alla diffusività termica per un fluido viscoso, in cui:
 - v è la diffusività cinematica;
 - α è la diffusività termica;
 - μ è la viscosità dinamica $[\frac{kg}{m \cdot s}]$;
 - c_p è il calore specifico a pressione costante $[\frac{J}{kg \cdot K}]$;
 - k è la conducibilità termica $[\frac{kg}{m \cdot s}]$.
- Numero di Nusselt $\rightarrow Nu = \frac{hd}{k} \rightarrow$ esprime il rapporto tra il flusso di calore scambiato per convezione e il flusso di calore scambiato per conduzione. In cui:
 - h è il coefficiente di scambio termico, anche detto coefficiente convettivo in $\frac{W}{m^2 K}$;
 - d è la lunghezza caratteristica (in metri), che dipende dal caso preso in esame (in particolare nel caso di flusso intubato è pari al diametro equivalente del condotto);
 - k è la conducibilità termica c.

Per avere maggior convezione occorre un Nu maggiore, con quindi un moto turbolento ($Re > 5000$).

Nella seguente tabella vengono riportati i valori delle caratteristiche del fluido sopra descritte, nei due differenti motori:

Dati	Valori		Unità di misura
	Motore 1	Motore 2	
Portata d'acqua	24	17	l/min
Cross section area	16	19.5	mm ²
Larghezza canale	4	6.5	mm
Re	152000	90700	-
Pr	4.383	4.383	-

Tabella 8-2 Caratteristiche del fluido di raffreddamento

Siccome è stato scelto un duty cycle del motore durante una giornata calda, nelle simulazioni successive è stata impostata come temperatura ambiente 23°C e come temperatura del fluido in

ingresso di 29°C, in modo da osservare la dispersione del motore nelle condizioni più svantaggiose.

Nei successivi due capitoli vengono riportati i risultati delle due diverse simulazioni.

8.1 Analisi termica motore 1

In una prima analisi termica in condizioni nominali di lavoro del motore 1, si ottengono i risultati termici (dopo un periodo di transiente termico) riportati nelle seguenti immagini.

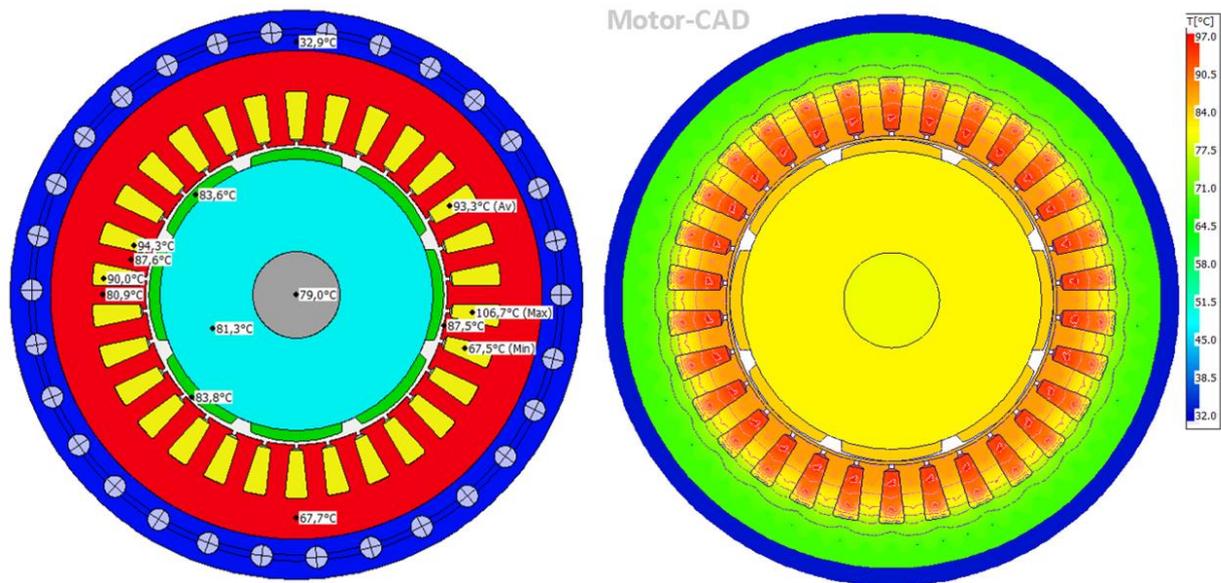


Figure 8.1 Valori termici su una sezione radiale del motore 1

Come si può osservare, la zona che vede maggiore temperatura è quella nelle cave di statore dove si trovano gli avvolgimenti, in cui troviamo picchi di temperatura di 106°C.

Minore è invece la temperatura raggiunta dai magneti permanenti, che tocca gli 84°C.

Per avere un'idea più chiara sulla distribuzione di calore e di temperatura all'interno del motore elettrico, di seguito vengono riportate altre due immagini derivate dall'analisi FEM sulla distribuzione di temperatura assiale.

8 - Analisi termica

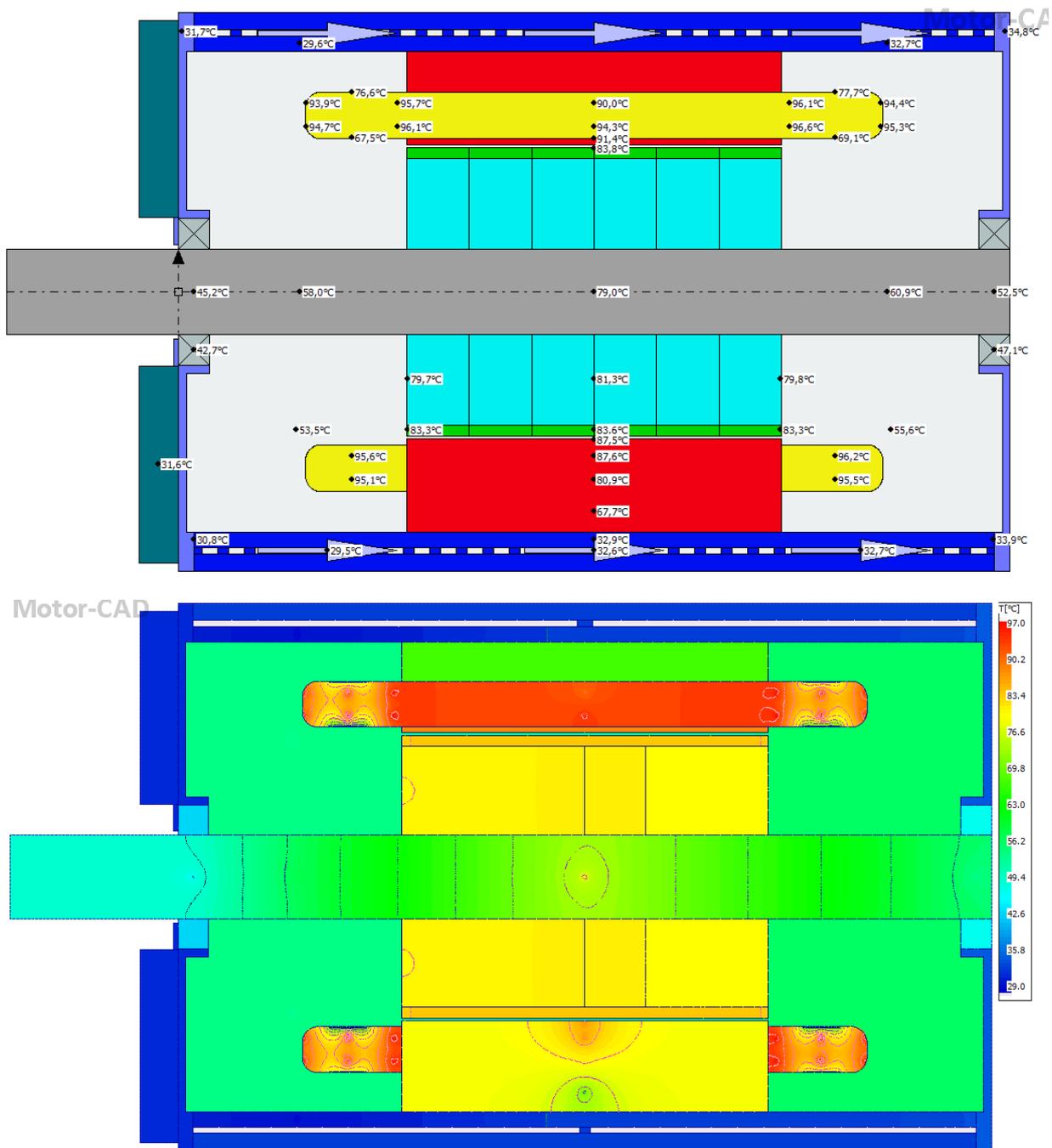


Figure 8.2 Valori termici su una sezione assiale del motore 1

Come si può osservare, le zone del motore più calde sono quelle centrali, in cui si ha meno superficie a contatto con l'aria e quindi minor scambio di calore tramite convezione termica.

8.2 Analisi termica motore 2

Lo stesso tipo di analisi è stata effettuata per il motore 2, ottenendo i risultati riportati nelle immagini successive.

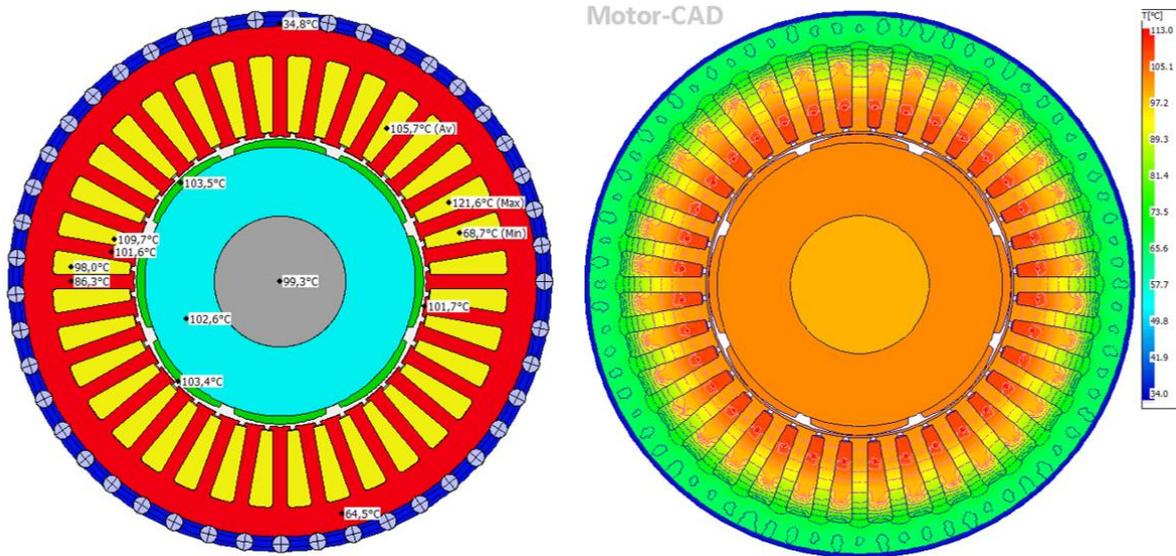
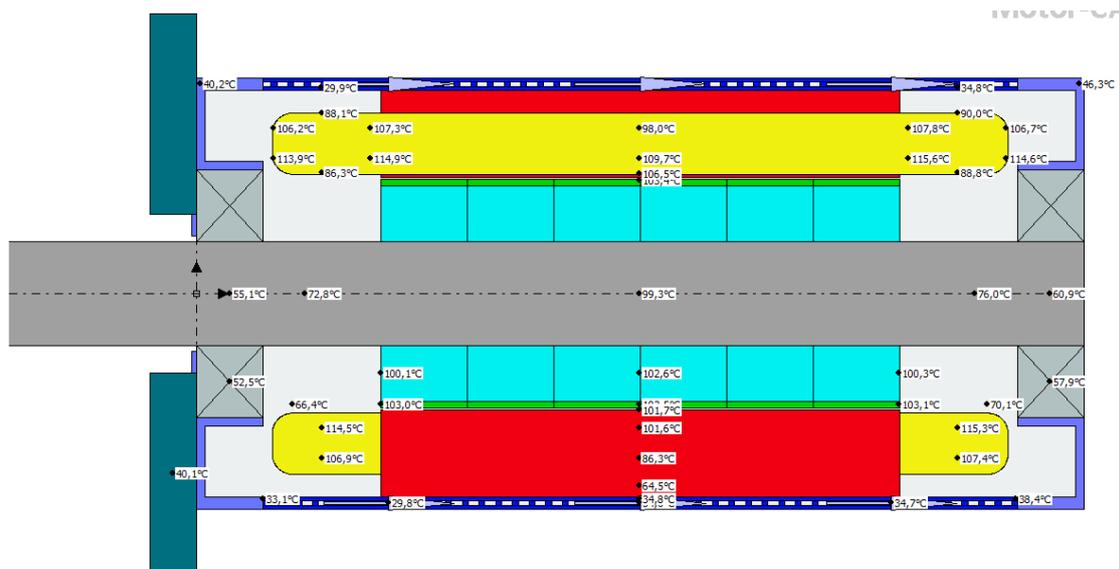


Figure 8.3 Valori termici su una sezione radiale del motore 2

I risultati sono analoghi a ciò che si è detto per il motore 1, con la differenza che nel motore 2 si raggiungono temperature un po' più alte, cosa aspettata per il semplice fatto che si hanno potenze maggiori e soprattutto per il fatto che il motore 2 richiede minor portata d'acqua per il raffreddamento (17l/min contro i 24 l/min del motore 1).



8 - Analisi termica

Motor-CAD

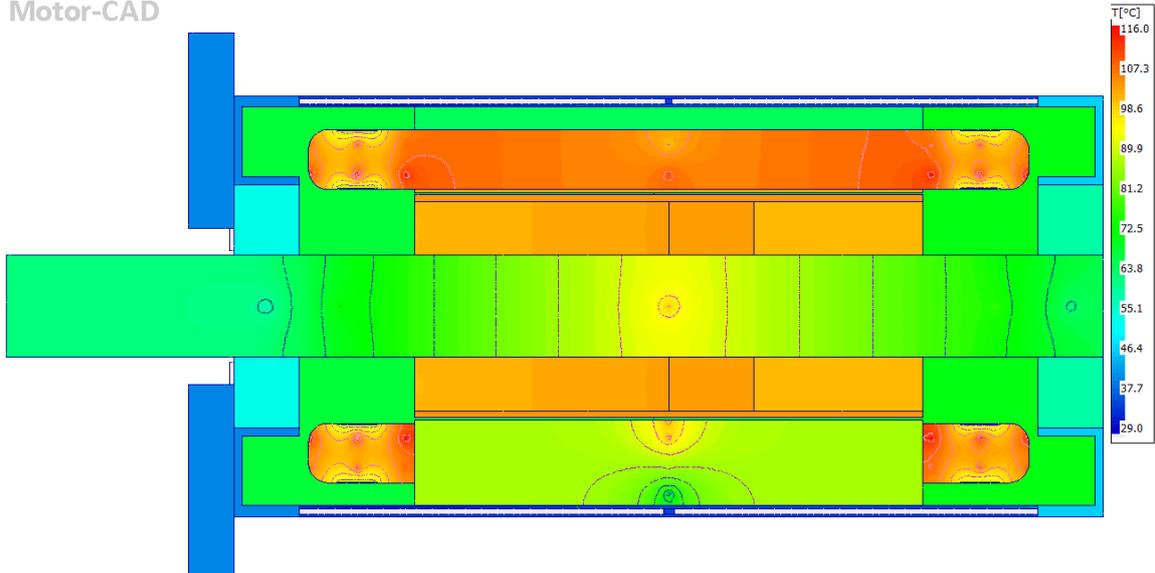


Figure 8.4 Valori termici su una sezione assiale del motore 2

8.3 Analisi con il duty-cycle

Attraverso il duty-cycle scelto al capitolo 7, è possibile calcolare diversi parametri durante il ciclo di lavoro, quali l'andamento della temperatura nei diversi punti dei motori dopo un certo carico, l'efficienza e le perdite di motore.

Occorre tenere in considerazione che le potenze P_{loss} perse comportano una creazione di calore interno al motore. Quindi, più sarà alta l'efficienza del motore, meno energia verrà consumata e quindi si avrà maggior autonomia del veicolo, ma soprattutto meno calore verrà generato e quindi ci saranno meno problemi a livello di smagnetizzazione.

Per effettuare l'analisi termica si è dovuto fornire al software almeno 1 dato/sec e, dato che la telemetria ci fornisce soltanto 1 dato/min si è dovuta effettuare un'interpolazione lineare dei dati tramite software Matlab[®].

In particolare, per effettuare l'analisi termica del motore 1 è bastato dare l'interpolazione dei valori di corrente di motore e di velocità, dato che la telemetria è stata fatta proprio su una macchina con quel motore.

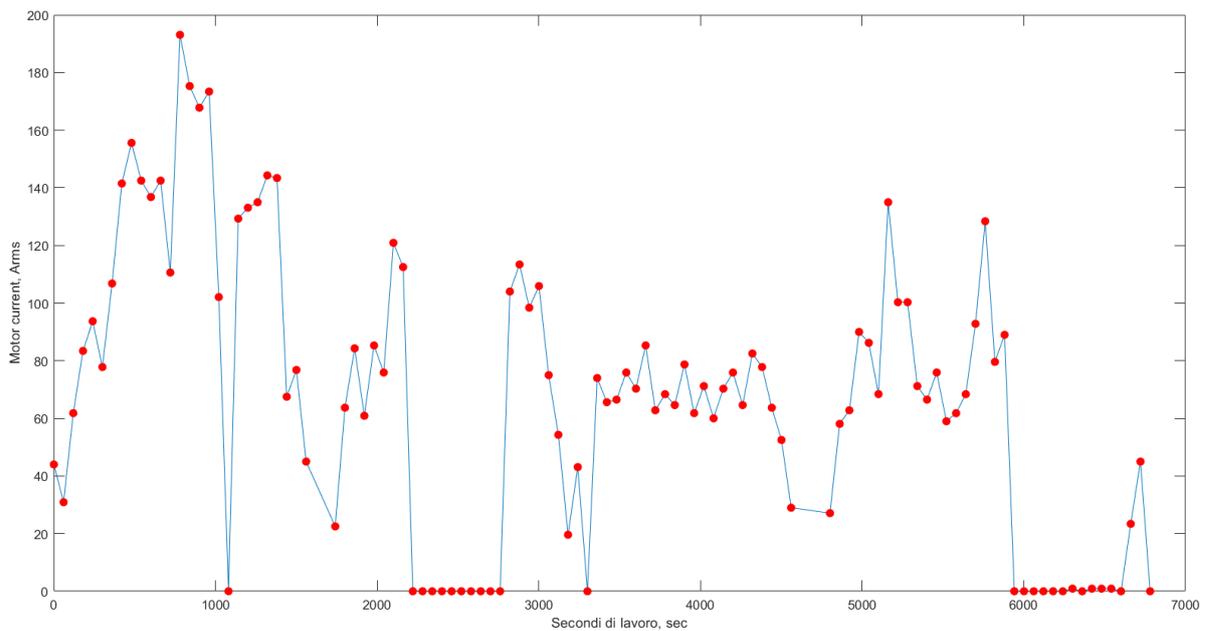


Grafico 8-1 Correnti di motore 1

8 - Analisi termica

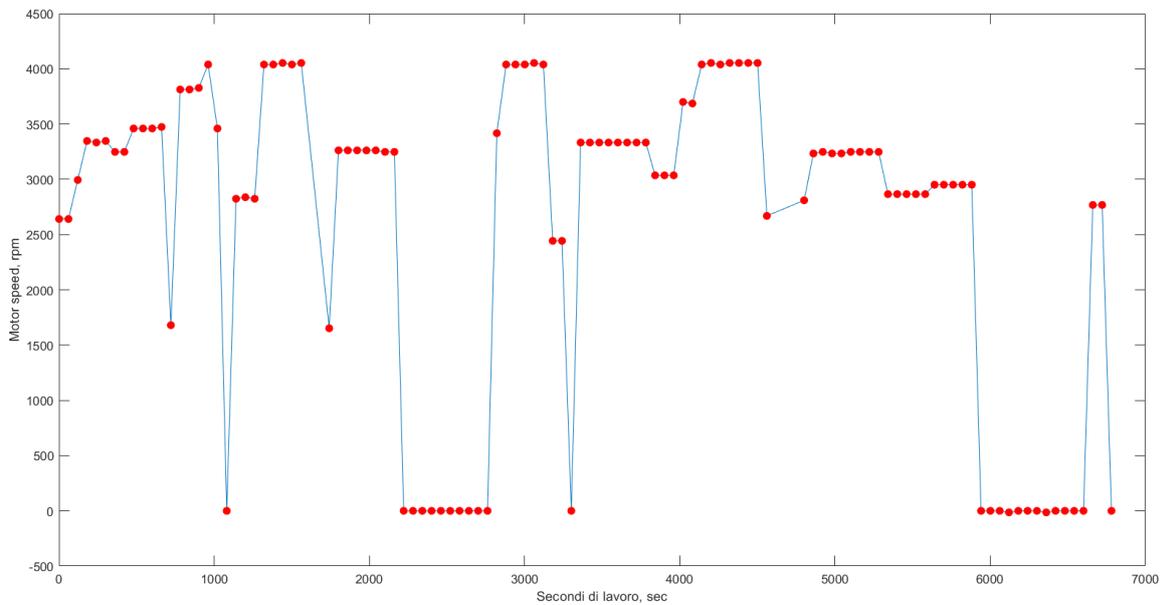


Grafico 8-2 Velocità di motore

In rosso sono i dati acquisiti dalla telemetria (1 ogni 60 secondi circa), in blu sono i dati secondo per secondo calcolati dall'interpolazione.

Per quanto riguarda il motore 2, invece, non sarebbe corretto fornire al software come dati di input gli stessi valori di corrente di motore, in quanto, avendo caratteristiche diverse (k_t , k_{BEMF} , ...) esso avrà bisogno di correnti di motore diverse.

Per questo motivo le correnti di motore 1 sono state ridimensionate tramite un coefficiente dato dai due k_t dei due motori. In particolare, sapendo che i due motori dovranno fornire istantaneamente la stessa coppia durante l'intero ciclo di lavoro preso in considerazione, sappiamo che:

$$T = k_{t_{MOT1}} \cdot i_{MOT1} = k_{t_{MOT2}} \cdot i_{MOT2} \rightarrow i_{MOT2} = i_{MOT1} \cdot \frac{k_{t_{MOT1}}}{k_{t_{MOT2}}} = i_{MOT1} \cdot 0.77 \quad (8.1)$$

Quindi nel motore 2 ci saranno correnti più ridotte di circa 1/3 rispetto al motore 1.

Di seguito viene riportato un grafico in cui questo è ben visibile:

8 - Analisi termica

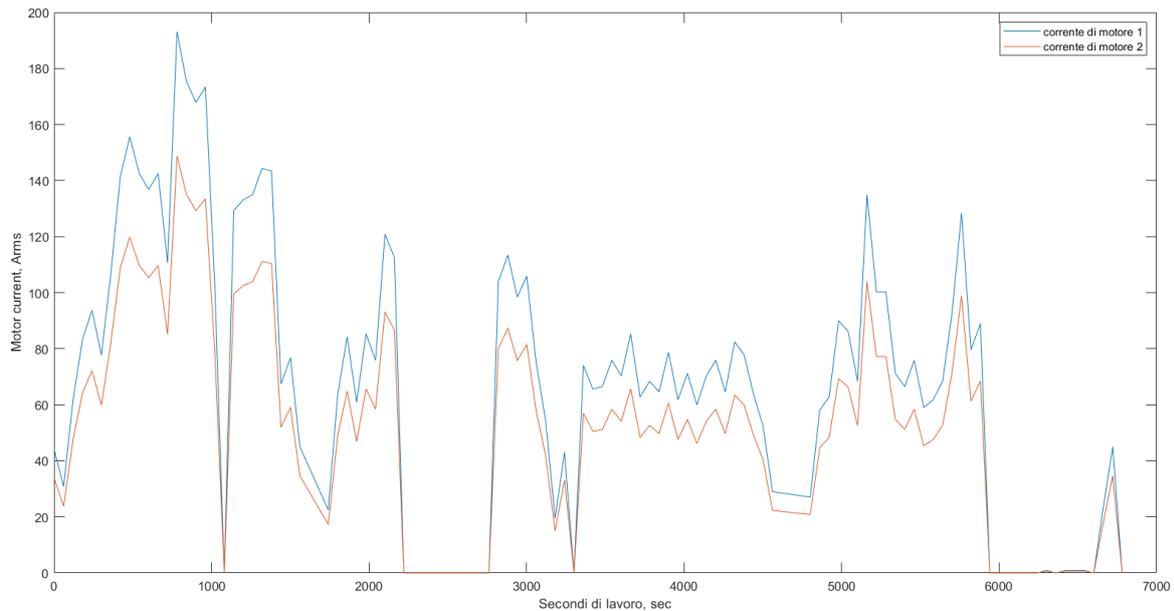


Grafico 8-3 Correnti di motore a confronto

Bisogna osservare che il motore 2, avendo un k_t maggiore e quindi richiedendo meno corrente rispetto al motore 1, subirà meno perdite di potenza dovuta alla resistenza elettrica degli avvolgimenti (che abbiamo visto essere circa uguale per entrambi i motori in condizioni nominali).

Per quanto riguarda i dati di velocità del motore, essi saranno gli stessi per entrambi i motori in quanto entrambi dovranno sempre fornire la stessa potenza per far lavorare la macchina.

Dai dati utilizzati come input, si è ottenuto un grafico che riporta la potenza necessaria al buon funzionamento della macchina nel ciclo di lavoro.

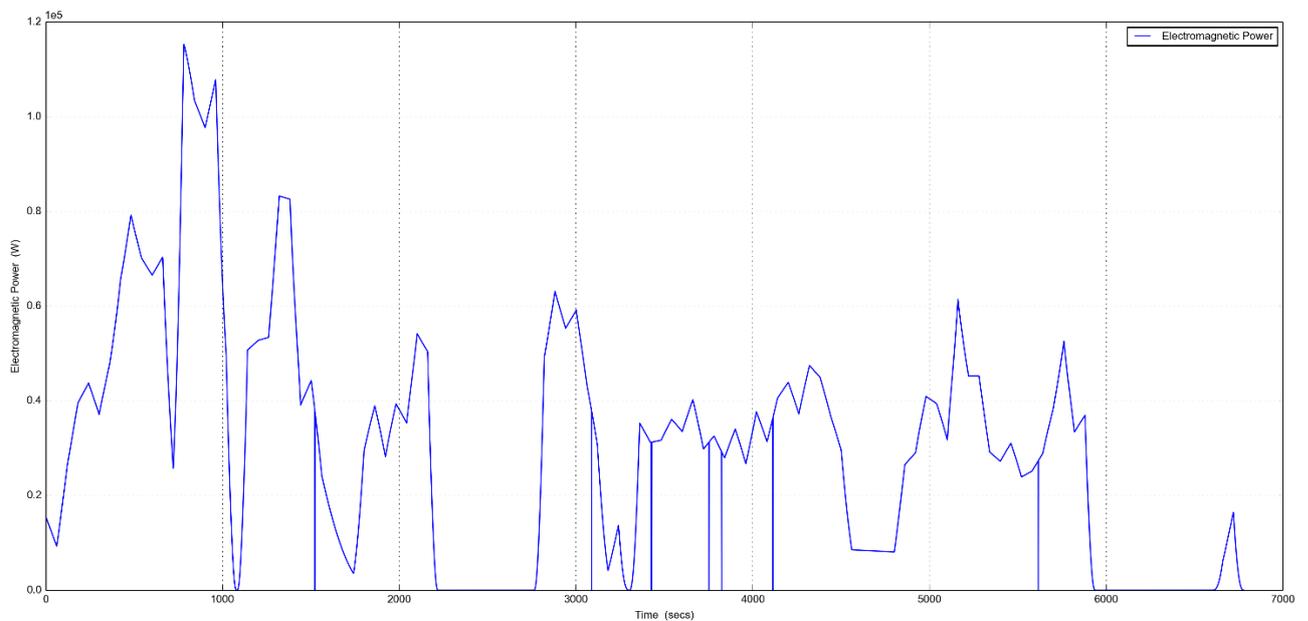


Grafico 8-4 Andamento della potenza elettromagnetica durante il ciclo di lavoro

8 - Analisi termica

Come si osserva, durante il ciclo di lavoro si arriva a un picco di quasi 120 kW, per una durata di circa 250 secondi. Questo è il momento in cui il macchinario richiede maggior sforzo al motore e molto probabilmente, essendo all'inizio del duty-cycle, esso coincide col momento in cui il carro miscelatore va a fresare. Capita quasi sempre che la fresatura sia il momento più delicato e oneroso dal punto di vista energetico, perché il carro trincia miscelatore utilizza contemporaneamente tutti i suoi "organi": le coclee per miscelare, il braccio desilatore per fresare, il tappeto per portare i prodotti fresati in vasca e i motoriduttori per potersi spostare avanti e indietro.

In una prima analisi si sono valutate le perdite durante il ciclo di lavoro, ottenendo i seguenti risultati.

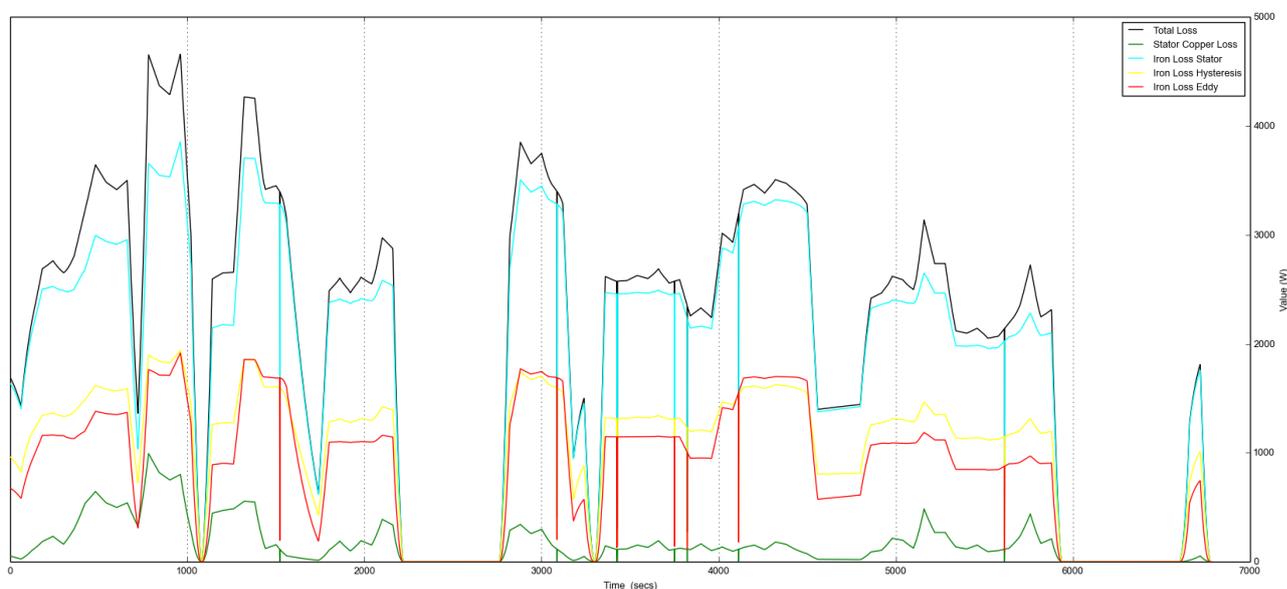


Grafico 8-5 Diversi tipi di perdite nel duty-cycle del motore 1

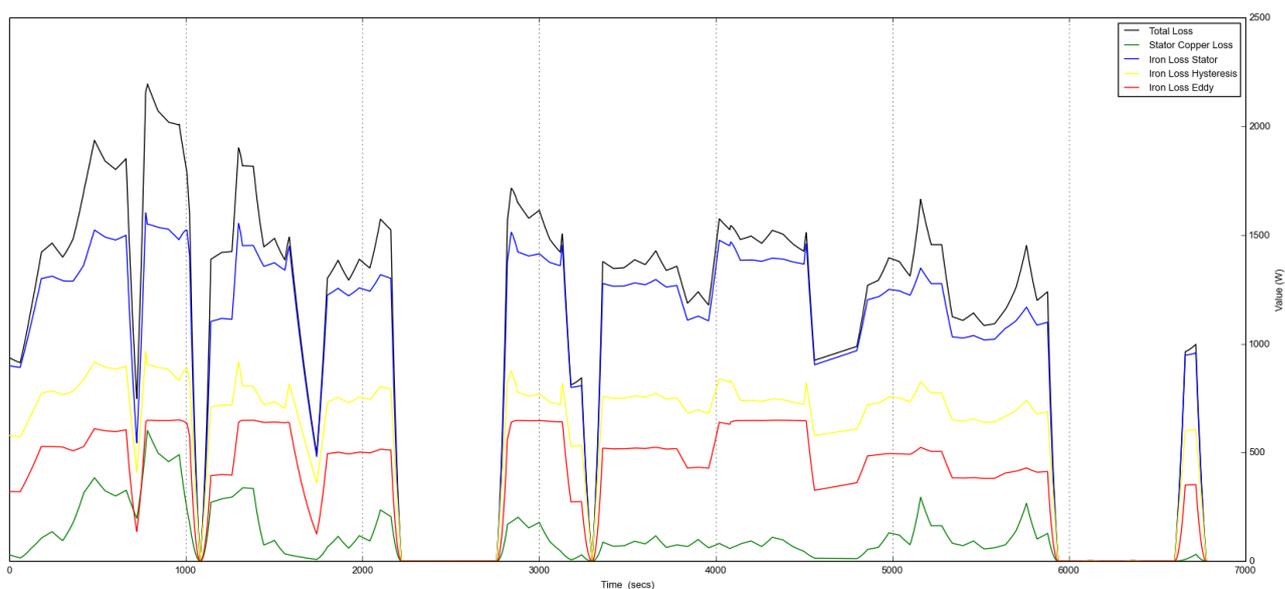


Grafico 8-6 Diversi tipi di perdite nel duty-cycle del motore 2

Nel grafico seguente vengono riportate le perdite totali confrontate per i due motori.

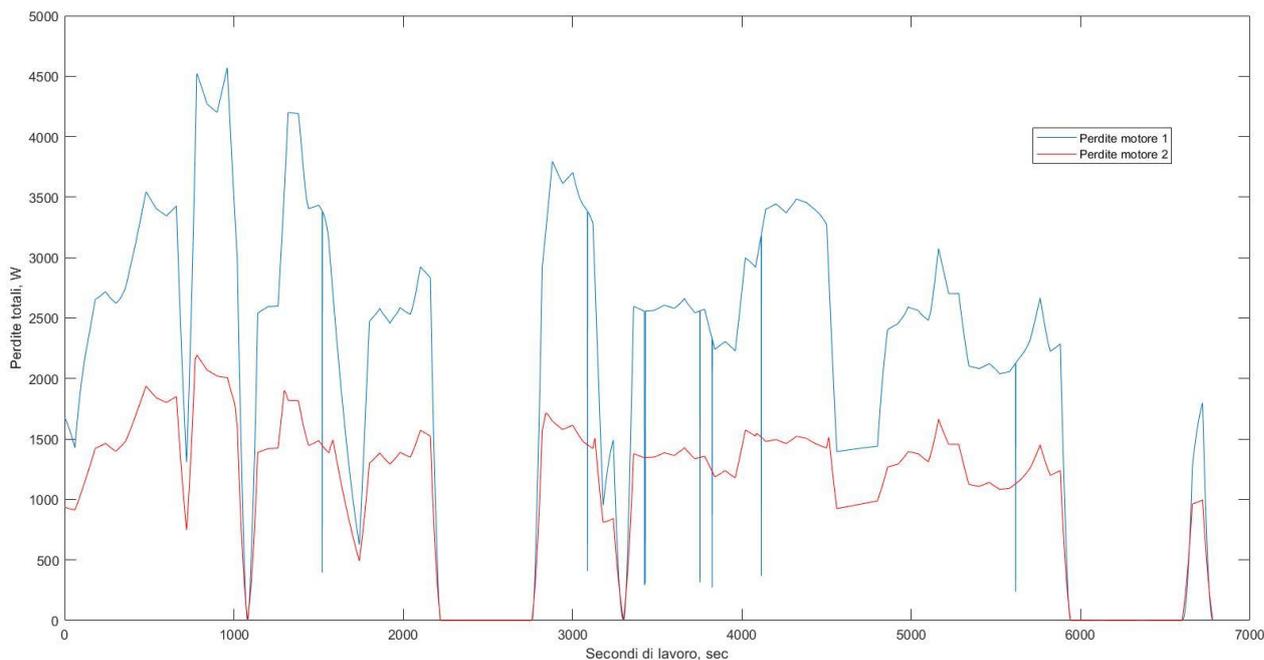


Grafico 8-7, Confronto delle perdite totali dei due motori

Come si può osservare, la differenza tra le perdite totali è notevole, tenendo conto che entrambi i motori non arrivano nemmeno a lavorare alla loro potenza nominale.

La grossa differenza nelle inefficienze è quella tra le perdite nel ferro e tra quella dovuta alle correnti parassite. La differenza tra le due perdite per correnti parassite era aspettata in quanto il secondo motore elettrico, avendo kt più alto, richiede correnti minori e quindi ci si aspetta minori correnti indotte nel ferro. Stesso discorso riguarda le perdite per resistenza negli avvolgimenti (minor corrente implica minori perdite).

Avendo perdite diverse per i due motori, si avranno efficienze diverse e nel grafico seguente si può osservare come le efficienze varino durante il ciclo di lavoro.

Naturalmente, dopo ciò che si è detto in precedenza, ci aspetteremo un'efficienza maggiore nel motore 2.

8 - Analisi termica

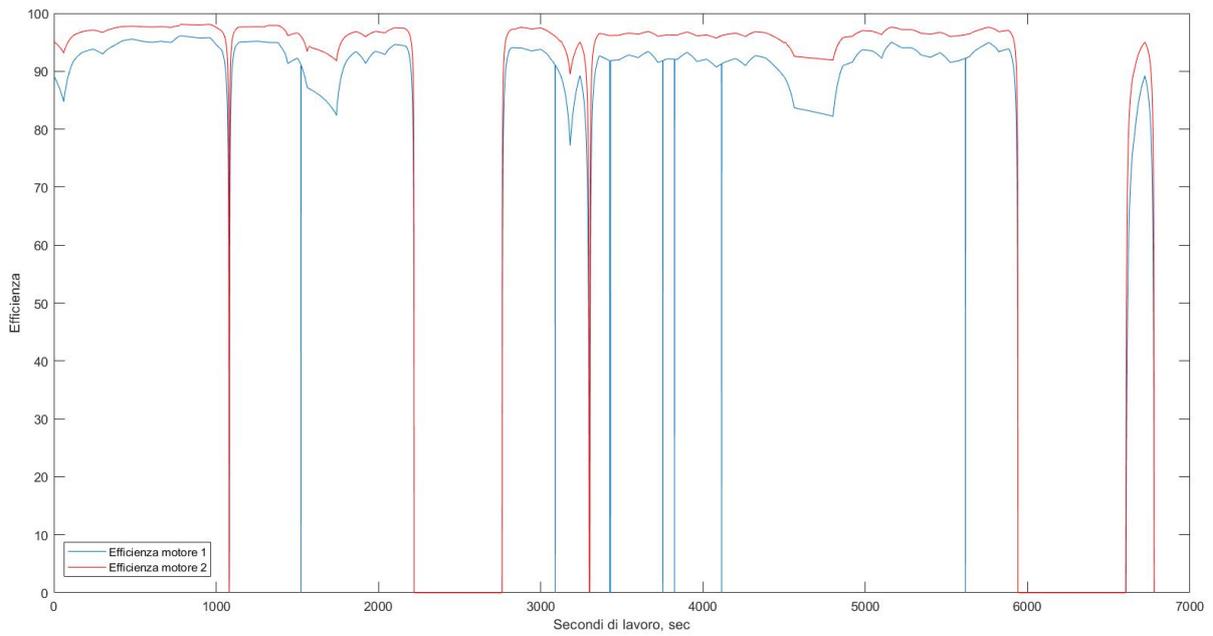


Grafico 8-8 Efficienze dei due motori nei diversi tempi di lavoro, a confronto

Avendo le perdite e i valori di corrente e velocità del ciclo di lavoro, è possibile calcolare i valori del transiente termico dei due motori durante la fase di funzionamento.

Nei seguenti grafici sono riportati i valori di temperatura delle diverse parti di motore durante l'intero ciclo di carico.

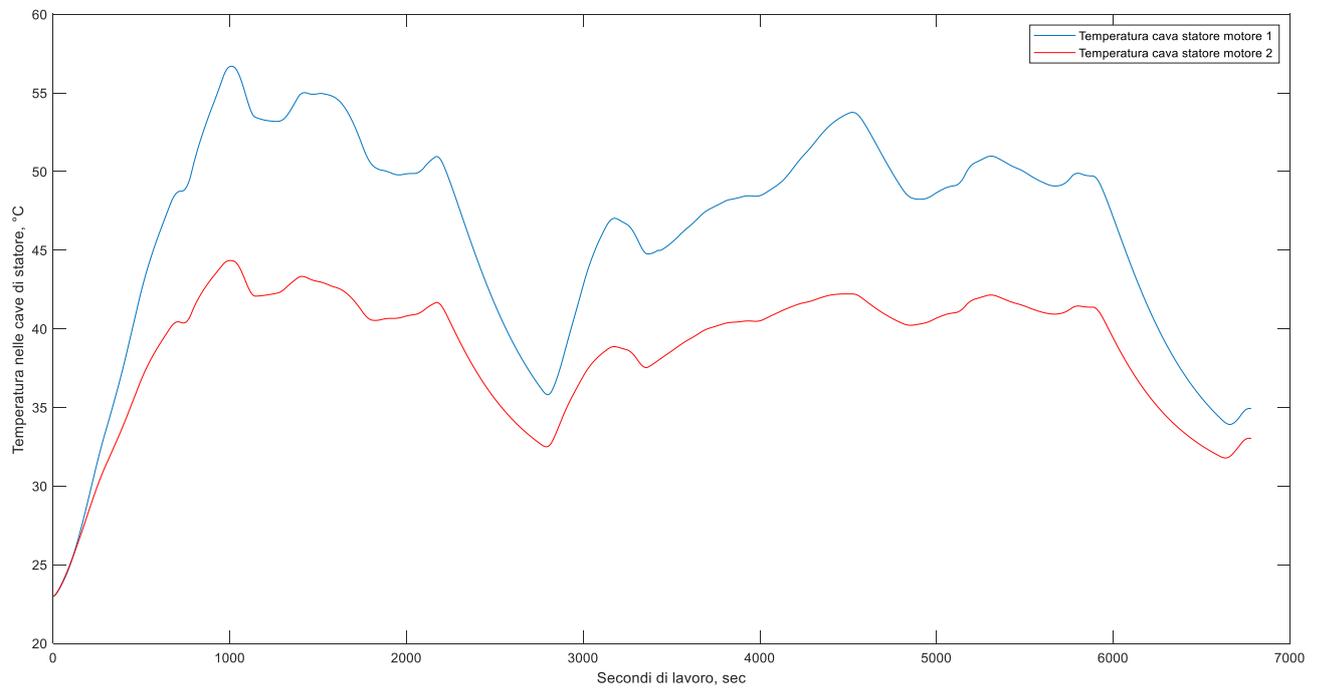


Grafico 8-9 Confronto delle temperature nelle cave di statore

8 - Analisi termica

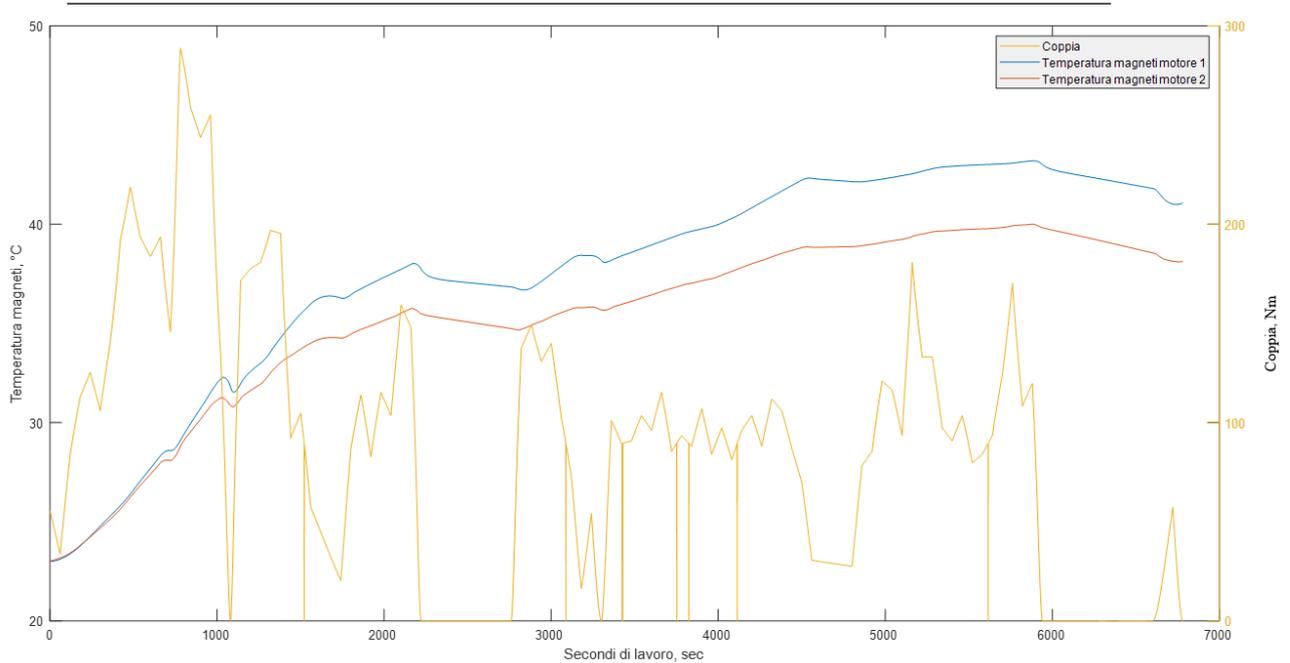


Grafico 8-10 Confronto delle temperature dei magneti permanenti

Come si può osservare, la temperatura dei magneti cresce man mano che il motore genera più coppia, senza però mai arrivare in nessun momento alla temperatura delle condizioni nominali. Il motore 1 tende a scaldare i magneti più in fretta del motore 2, cosa che potrebbe portare a una smagnetizzazione dei magneti permanenti più rapida nel caso in cui si superasse la condizione nominale di funzionamento per troppo tempo.

Come detto in precedenza, lo sforzo richiesto al motore dipende molto da macchina a macchina, in quanto lo stesso motore viene montato su carri di dimensioni diverse che a loro volta possono finire a lavorare in allevamenti con alimentazioni e sistemi di carico prodotti differenti.

Nel ciclo di lavoro che è stato considerato nessun motore raggiunge le condizioni nominali di funzionamento ma soprattutto nessuno di essi lavora in condizioni “di picco”, quindi entrambi i motori sarebbero adeguati a compiere il lavoro richiesto da questo preciso duty-cycle.

9 Conclusioni

Il lavoro di tesi è stato quello di eseguire una comparazione prestazionale tra due motori elettrici utilizzati per far funzionare una macchina da lavoro in ambito agricolo, in particolare di un carro trincia miscelatore elettrico.

Per un buon studio delle prestazioni dei motori sono stati utilizzati dei dati di funzionamento presi da un sistema di telemetria del macchinario, più precisamente i valori di corrente e di velocità del motore.

Ciò che si è fatto è stato dare valore ai dati acquisiti in modo da poter giudicare quale potesse essere la soluzione migliore per un determinato lavoro (in questo caso il dimensionamento di un motore elettrico e la comparazione tra due opzioni disponibili).

Lo studio sui due motori è nato dal fatto che in alcuni casi di particolare sollecitazione il motore 1 subiva un innalzamento di temperatura interna inaspettato, portando a problemi di smagnetizzazione e di raffreddamento.

Dalle analisi effettuate, si può constatare che il fatto che alcuni motori del primo tipo si siano smagnetizzati da quando il prodotto è stato messo in commercio potrebbe essere dovuto al fatto che gli operatori abbiano sollecitato troppo il motore in diverse occasioni nello stesso ciclo di lavoro, andando a potenze di picco per più tempo di quanto il motore potesse sopportare.

Di seguito vengono presentate alcuni potenziali miglioramenti del motore e sviluppi futuri del macchinario su cui questo monta.

- La soluzione più semplice è stata quella di passare a un motore di taglia superiore (motore 2) anche se quasi sempre fare una scelta del genere significa aumentare il costo e quindi l'utilizzatore finale ne risente dal punto di vista economico al momento dell'acquisto.

Non è però raro trovare su questi tipi di macchinari dimensionamenti più ristretti dal punto di vista termico, proprio per il fatto che queste tipologie di macchine lavorano poco tempo durante la giornata per poi restare ferme il tempo necessario affinché i gradienti termici si ristabilizzino. La scelta migliore è quella di trovare un giusto "trade-off" tra costo, prestazioni e metodi di utilizzo del macchinario.

- Un'altra soluzione possibile potrebbe essere quella di eseguire alcune modifiche al motore 1, in particolare utilizzare dei materiali migliori in termini di perdita di potenza e soprattutto utilizzare dei lamierini più sottili per comporre lo statore. I magneti permanenti sono già magneti che resistono ad alte temperature quindi su di essi non c'è molto margine di miglioramento. Invece, si potrebbe migliorare lo scambio termico

nelle cave di statore tramite l'aggiunta di una resina che unisca gli avvolgimenti ai lamierini di statore, in modo da poter condurre meglio il calore generato durante gli avvolgimenti.

- Per quanto riguarda l'autonomia e l'efficienza totale del sistema, si potrebbe pensare ad elettrificare alcuni organi della macchina (come la fresa e/o l'avanzamento) eliminando la trasmissione idraulica della potenza, conferendo così rendimenti maggiori e quindi minor perdita d'energia. Ciò comporterebbe un sovradimensionamento del motore analizzato in questa tesi in quanto la potenza richiesta diminuirebbe.

Quanto appena detto aumenterebbe l'autonomia del macchinario, potendo diminuire il pacco batterie (ed il relativo costo) anche se il tutto comporterebbe probabilmente un maggior costo globale (motori elettrici e drivers costano generalmente più cari rispetto ai componenti idraulici).

10 Indice delle figure

Figure 2.1, Carro miscelatore “Star-mix” Supertino.....	2
Figure 2.2, Coclee di miscelazione all’interno della vasca	3
Figure 2.3. Carro trincia miscelatore orizzontale trainato, Supertino	4
Figure 2.4. Carro trincia miscelatore verticale trainato, Supertino	4
Figure 2.6. Carro miscelatore trainato, Supertino	4
Figure 2.5. Carro miscelatore semovente, Supertino	4
Figure 2.7: Schema semplificato di un powertrain elettrico	5
Figure 2.8. Pacco batterie di Electra2	6
Figure 3.1, parti di motore a corrente continua.	8
Figure 3.2, motore asincrono Fimea.....	9
Figure 3.3, rotore di un motore a riluttanza variabile.....	10
Figure 3.4, motore a riluttanza commutata	10
Figure 3.5, struttura motore a magneti permanenti su rotore esterno.	11
Figure 3.6, Struttura motore a flusso assiale con doppio rotore e uno statore	11
Figure 4.1. Organi elettrici e meccanici di un motore brushless a magneti permanenti	12
Figure 4.2. Caratteristica di smagnetizzazione.....	13
Figure 4.3. Punto ottimale di lavoro per i magneti permanenti.....	14
Figure 4.4. Andamento dell’indizione magnetica in un motore con magneti annidati (max. induzione su rotore).....	15
Figure 4.5. Andamento dell’indizione magnetica in un motore con magneti superficiali (max. induzione su denti di statore)	16
Figure 4.6. IPMSynRM.....	16
Figure 4.7 Passaggio da equilibrio stabile a instabile	18
Figure 4.8 Circuito magnetico equivalente	21
Figure 4.9 Dimensioni radiali motore	22
Figure 4.10, illustrazione grafica della Trasformata di Park.....	24
Figure 4.11 Circuito equivalente rispetto all’asse Q	25
Figure 4.12 Circuito equivalente rispetto all’asse D	25
Figure 5.1 Caratteristiche dei magneti permanenti del motore 1	31
Figure 5.2 Risultato modellazione motore 1	32
Figure 5.3 Modello 3d del motore 2 sezionato.....	33
Figure 5.4 Immagine radiale e assiale di statore e rotore del motore 2.....	34

Figure 5.5 Caratteristiche conduttori nella cava di statore, motore 1	36
Figure 5.6 Disposizione degli avvolgimenti, motore 1	36
Figure 5.7 , BEMF-Position e Coppia-Velocità motore 1.....	37
Figure 5.8 Caratteristiche conduttori nella cava di statore, motore 2	38
Figure 5.9 Disposizione degli avvolgimenti, motore 2	38
Figure 5.10 BEMF-Position e Coppia-Velocità motore 2.....	39
Figure 5.11 Mesh di un quarto di motore 1	41
Figure 6.1 Spider design del rotore	45
Figure 8.1 Valori termici su una sezione radiale del motore 1	52
Figure 8.2 Valori termici su una sezione assiale del motore 1.....	53
Figure 8.3 Valori termici su una sezione radiale del motore 2	54
Figure 8.4 Valori termici su una sezione assiale del motore 2.....	55

11 Indice delle tabelle

Tabella 4-1. Differenze tra le proprietà elettromagnetiche dei magneti in NdFeB e Sm-Co... 14	
Tabella 4-2, Analogie tra circuiti elettrici e magnetici.....	21
Tabella 5-1, dati geometrici motore 1	32
Tabella 5-2 Dati geometrici motore 2	33
Tabella 5-3, Dati degli avvolgimenti del motore 1	35
Tabella 5-4 Dati degli avvolgimenti del motore 2	37
Tabella 5-5, Parametri mesh.....	40
Tabella 6-1, Perdite sul rotore dei motori	45
Tabella 8-1 Caratteristiche geometriche della camicia di raffreddamento	50
Tabella 8-2 Caratteristiche del fluido di raffreddamento	51

12 Indice dei grafici

Grafico 5-1 Analsi di convergenza del motore 1	40
Grafico 6-1 Perdite di potenza in base al materiale di statore.....	44
Grafico 7-1 Ciclo di lavoro	48
Grafico 7-2 State of Charge, ciclo di lavoro	48
Grafico 7-3 Andamento temperature e corrente.....	49
Grafico 8-1 Correnti di motore 1.....	56
Grafico 8-2 Velocità di motore	57
Grafico 8-3 Correnti di motore a confronto	58
Grafico 8-4 Andamento della potenza elettromagnetica durante il ciclo di lavoro	58
Grafico 8-5 Diversi tipi di perdite nel duty-cycle del motore 1	59
Grafico 8-6 Diversi tipi di perdite nel duty-cycle del motore 2	59
Grafico 8-7, Confronto delle perdite totali dei due motori	60
Grafico 8-8 Efficienze dei due motori nei diversi tempi di lavoro, a confronto	61
Grafico 8-9 Confronto delle temperature nelle cave di statore	61
Grafico 8-10 Confronto delle temperature dei magneti permanenti	62

13 Bibliografia

“Il motore brushless”, Lucia Frosini, Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Università di Pavia.

“Richiami macchine elettriche”, Tenconi Alberto, Politecnico di Torino, slides 2018.

“*Design of Permanent Magnet Synchronous Motor,*” International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 6, Issue 1, January-2015.

“Equivalent Circuit Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Magnetic saturation”, Jae-Woo Jung, Jeong-Jong Lee, Soon-O Kwon, Jung-Pyo Hong, Senior Member, IEEE Ki-Nam Kim.

“*A Hybrid Electric Vehicle Motor Cooling System- Design, Model*”, and Control, Article in IEEE Transactions on Vehicular Technology · February 2019

“*High-Speed Solid Rotor Permanent Magnet Machines: Concept and Design*”, Puvan Arumugam, Member, IEEE, Zeyuan Xu, Antonino La Rocca, Gaurang Vakil, Matthew Dickinson, Emmanuel Amankwah, Tahar Hamiti, Serhiy Bozhko, Member, IEEE, Chris Gerada, Member, IEEE, and Stephen J. Pickering

“Thermal Analysis of IPMSM with Water Cooling Jacket for Railway Vehicles”, Article in Journal of Electrical Engineering and Technology · May 2014

“Thermal design and optimization of a water-cooling permanent magnet synchronous in-wheel motor”, Peixin Liang, Feng Chai, Ke Shen.