Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

Relazione per la prova finale

«Progetto mediante metodo agli elementi finiti di un motore elettrico IPM per trazione automobilistica»

Tutor universitario: Prof. M. Andriollo

Laureando: *Matteo Franceschi*

Padova, 21/03/2025

Formula SAE e Progetto Motore

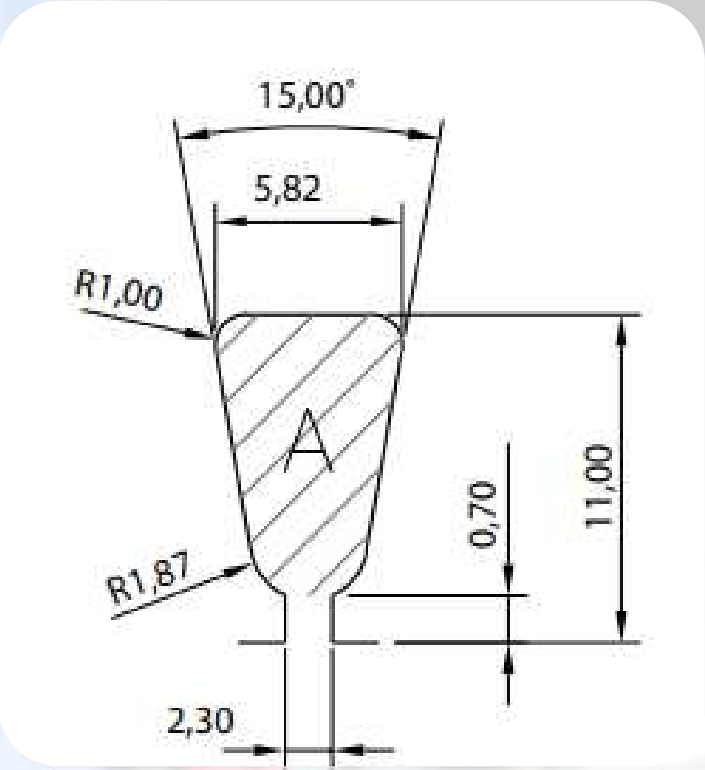
- Perchè progettare un nuovo Motore?
- Varie versioni per maggiori prestazioni.

- Motori "AMK" utilizzati nella vettura precedente.

DIMENSIONAMENTO GENERALE

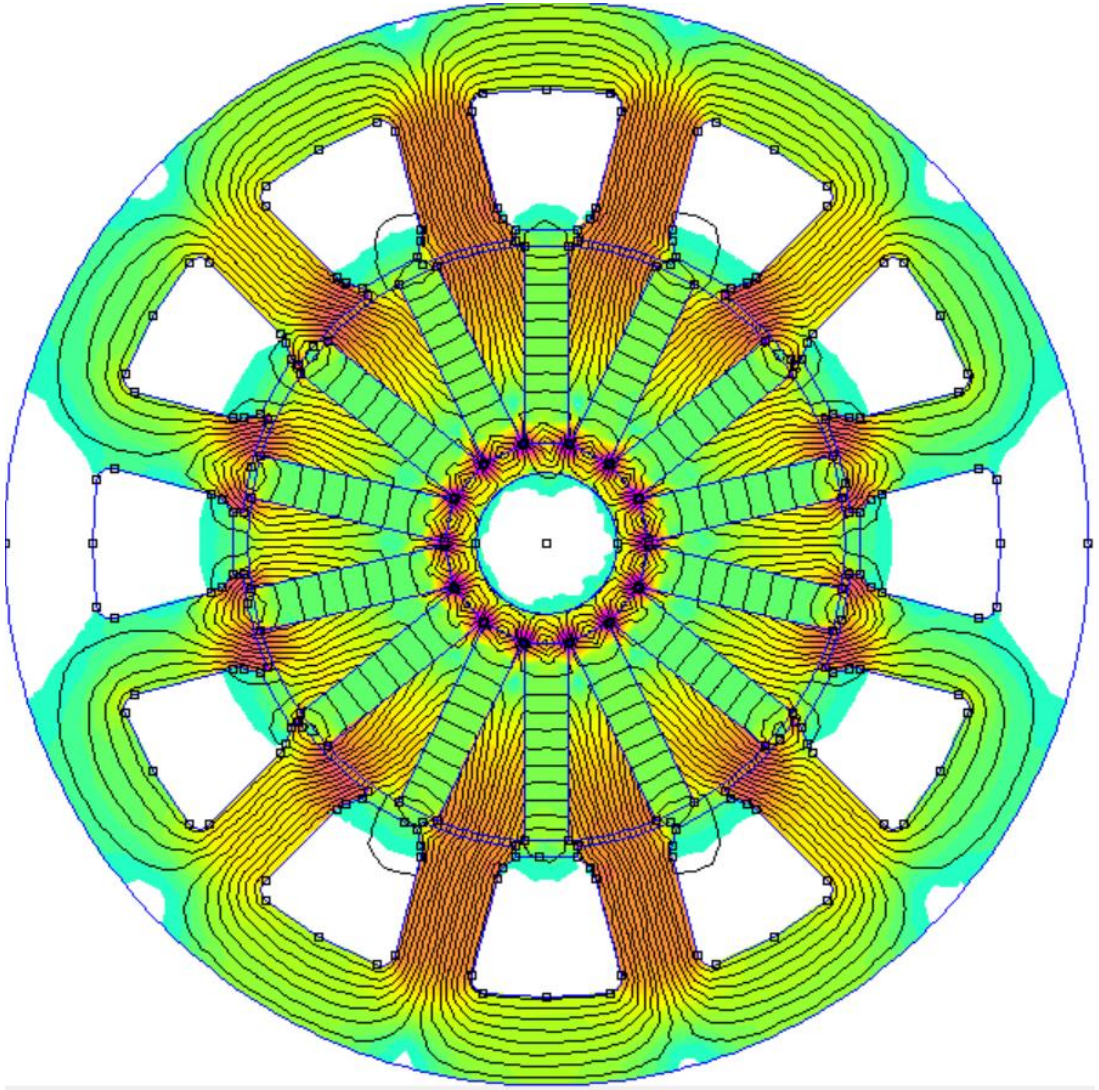
- Scelta tipologia Motore
- Nuova configurazione a 12 Cave
- Dimensioni Generali:
  - Traferro
  - Albero
  - Lunghezza e ingombro: stesse del motore AMK precedente, in modo da poter essere una sostituzione valida per la nuova vettura.

Misure di Riferimento da «EuroGroup» raddoppiate.



Nome	Sigla	Dimensione
Diametro Esterno Statore	De	80mm
Diametro interno Statore	Di	45mm
Diametro Esterno Rotore	DeR	44mm
Traferro	g	1mm
Superfice Cava	Sslot	96mm^2
Cave totali	Q	12
Numero Coppie polari	2p	14
Diametro Albero	Da	12mm
Profondità	Depth	85mm

SOFTWARE UTILIZZATI

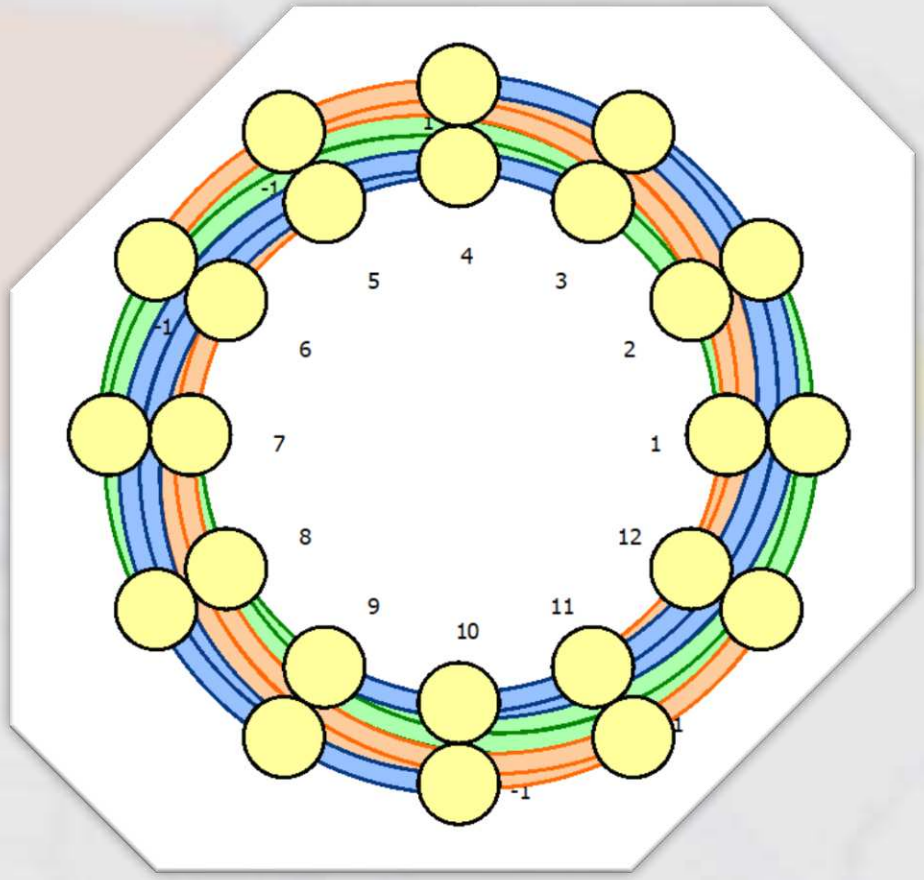


- **FEMM**, realizzazione modello 2D per studio attraverso elementi finiti di Campo magnetico, Corrente, Flusso, Coppia e diversi materiali
- **MATLAB**, implementazione codice per l'utilizzo di FEMM. Attraverso Matlab è stato possibile utilizzare FEMM in modo più efficiente, con algoritmi che potevano creare diverse geometrie e studiarle. Inoltre, Matlab è stato fondamentale per lo studio della coppia totale, della suddivisione di corrente nelle cave e nel graficare la Cogging Torque.

```
corrente_A(delta)=I*cos(p*rad);
corrente_B(delta)=I*cos(p*rad + 2*pi/3);
corrente_C(delta)=I*cos(p*rad + 4*pi/3);

for iq=1:Qs
    Islot=ncs*(corrente_A(delta)*ka(iq)+corrente_B(delta)*kb(iq)+corrente_C(delta)*kc(iq)
    mi_modifycircprop(['A',num2str(iq)],1,Islot)
end
%ruoto
mi_selectgroup(10);
mi_moverotate(0,0,1)
mi_clearselected();

mi_analyze(1);
mi_loadsolution();
mi_saveas('Motore_M3_massa.FEM');

for iq = 1:Qs
     mo_groupselectblock(1000+iq);
```

AVVOLGIMENTI E DATI

- Tensione: **350V**.
- Corrente Nominale : 41 A.
- Potenza Nominale: **12.3 kW**.
- Coppia Nominale: 9Nm a $12\frac{A}{mm^2}$. *Raffreddamento a Liquido*
- Numero di conduttori per cava: 20.
- Fattore Riempimento Cava: 40%.
- Induzione al Traferro: **1.9 T.**



$S_{slot\,MAT} =$

Ka	0.5	-1	0.5	0	0	0	-0.5	1	-0.5	0	0	0
Kb	-0.5	0	0	0	0.5	-1	0.5	0	0	0	-0.5	1
Kc	0	0	-0.5	1	-0.5	0	0	0	0.5	-1	0.5	0

MATERIALI SCELTI

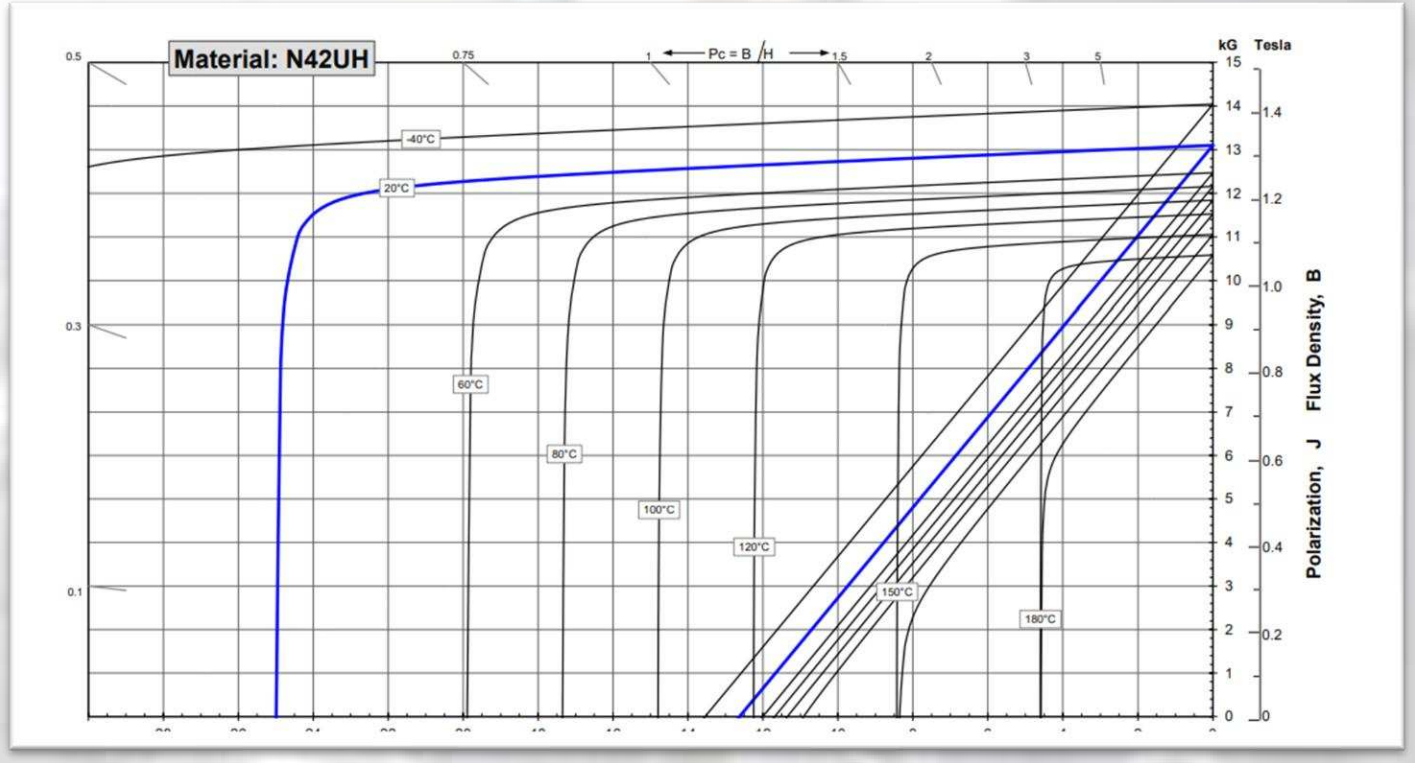
- Il materiale FerroMagnetico inizialmente utilizzato è il lamierino M235-35A, con seguenti caratteristiche:

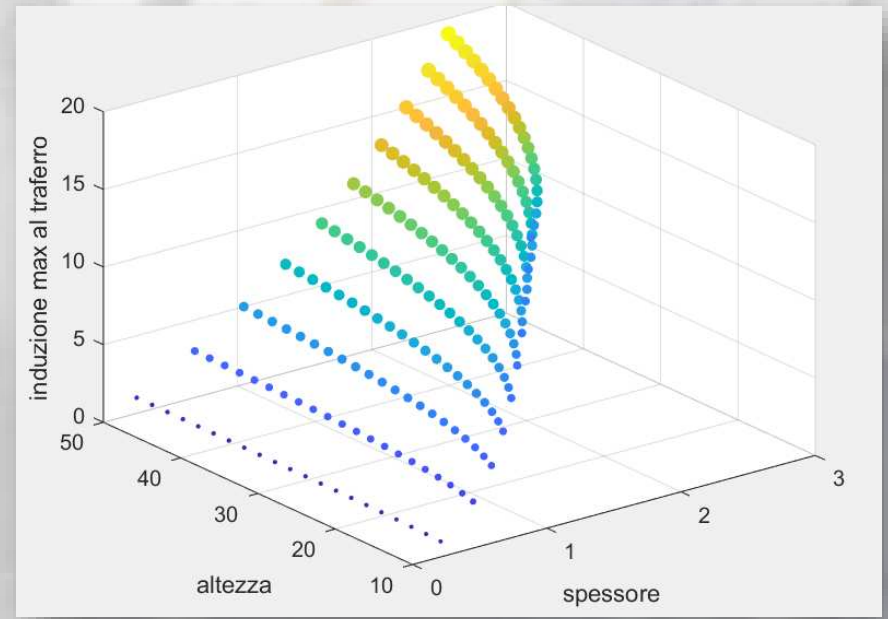
Grade EN 10106	Thickness	Maximum specific total loss at 50 Hz		Minimum magnetic polarization at 50 Hz		
		$\hat{J}$ = 1,5 T	1,0 T**	$\hat{H}$= 2500	5000	10000 A/m
	mm	W/kg	W/kg	T	T	T
M235-35A	0,35	2,35	0,95	1,49	1,60	1,70

- Per gli avvolgimenti si è utilizzato Rame con resisitività $\rho_{Cu} = 0.017\ \frac{\Omega mm^2}{m}$
- Come materiale amagnetico è invece stato utilizzato dell'acciaio 316.
- Infine, i magneti permanenti sono stati pensati in N42UH (NdFeB), forniti da "*Cibas*".

DIMENSIONAMENTO MAGNETI

- Nello Specifico, il dimensionamento dei magneti permanenti ha richiesto un attento calcolo.
- Dopo aver scelto la tipologia di magneti, è stato necessario verificare la temperatura di operazione del motore, in sede di Ferro e Rame, per stimare una temperatura attendibile a cui i magneti potessero operare.





Dimensione iniziale magneti considerando una temperatura di funzionamento massima di 160°C:

- Altezza: 12mm
- Larghezza 2mm

PERDITE NEL FERRO E NEGLI AVVOLGIMENTI

- **Perdite nel Rame:** $\frac{3}{2} \cdot \rho \cdot J^2 \cdot Vol = 125{,}04$ W

(le perdite variano da 100W a 780W a seconda della densità di corrente)

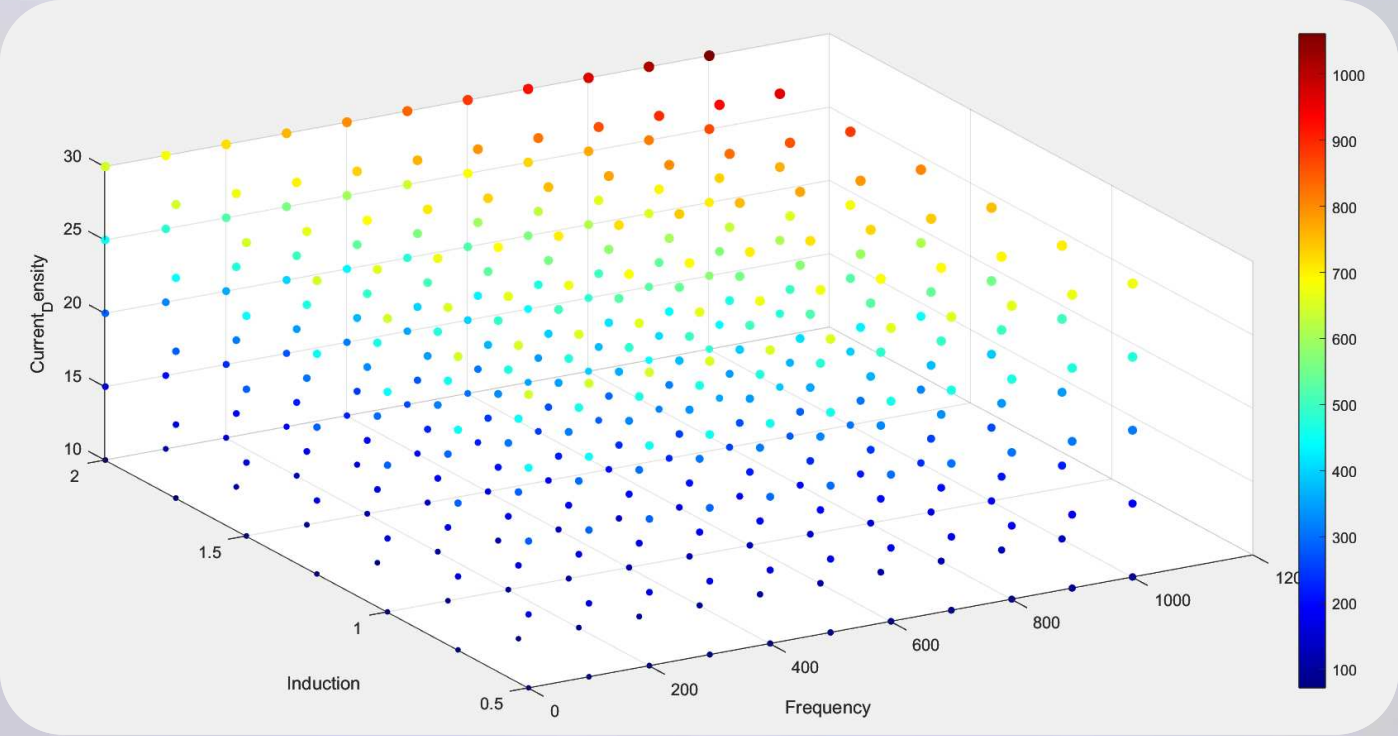
Rame Totale = Rame Cava + Rame Testata

$$Vol = 2 \cdot l \cdot Slot \cdot 0.4 + 2 \cdot \frac{D}{p} \cdot 2.5 \cdot Slot \cdot 0.4$$

- Perdite nel Ferro = Perdite per isteresi + Perdite per correnti parassite.

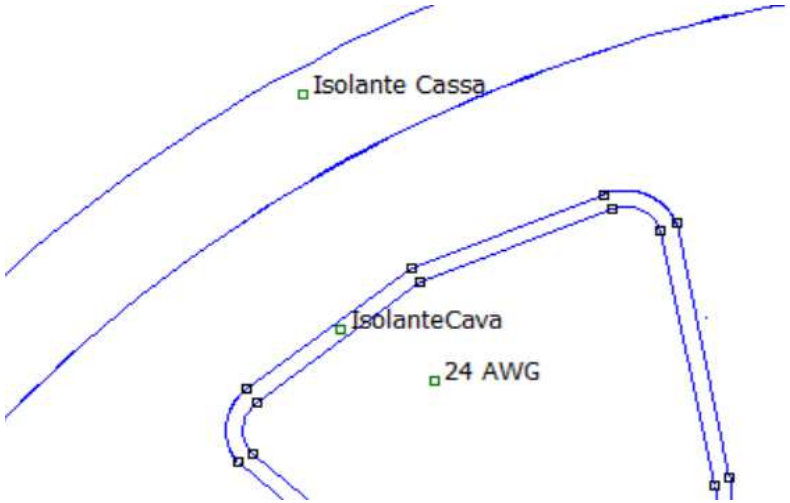
Le perdite nel ferro dipendono da frequenza e lamierino utilizzato.

$$P_{fe} = 340W$$



ANALISI TERMICA

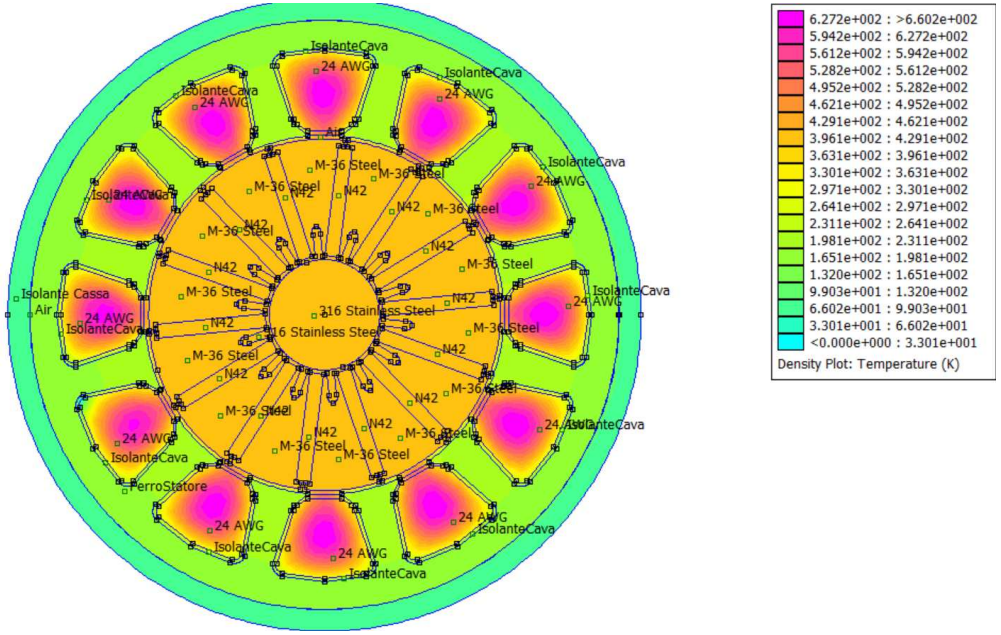
Aggiunta Isolante Cassa, aria e Isolante Cava. →



Importante per la progettazione, dimensionamento magneti (effetto smagnetizzazione), e saturazione.

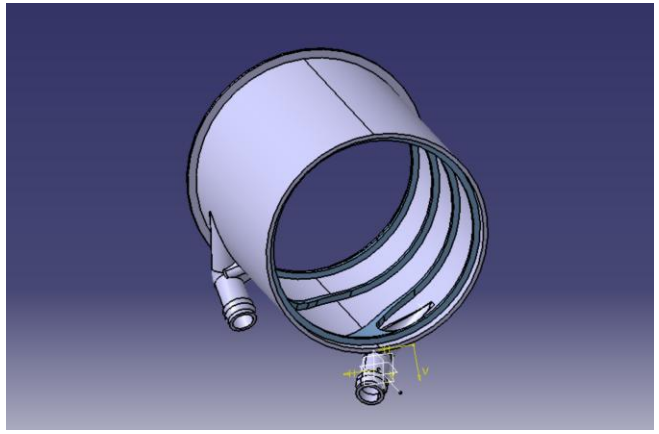
Si calcola il Volume Heat Generation, per ferro e rame, in base alle condizioni operative.

La temperatura massima non dovrà superare i 160° - 180°C per il raffreddamento e il taglio di potenza da centralina.



Raffreddamento a liquido mediante camice esterne al motore.

↓



PRIMI RISULTATI – ANALISI A VUOTO

Diagramma delle fasi con rispettiva coppia a J = 12 $\frac{A}{mm^2}$.

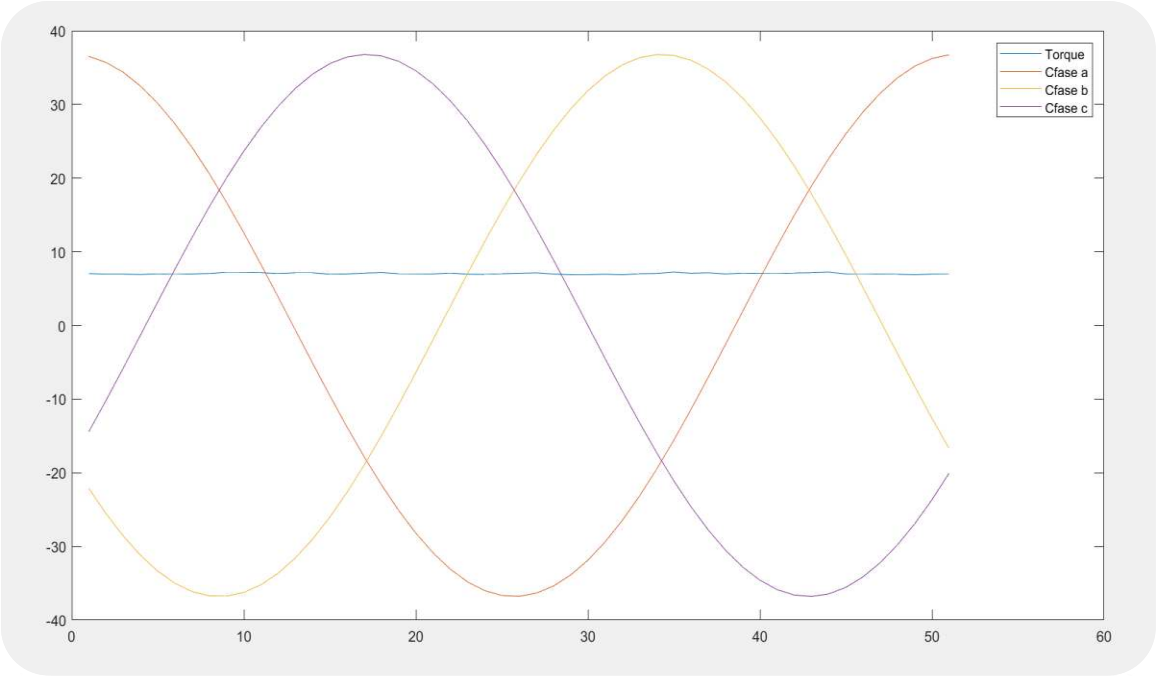
- Fino ad ora quindi, il motore produce una coppia di **circa 9 Nm.**

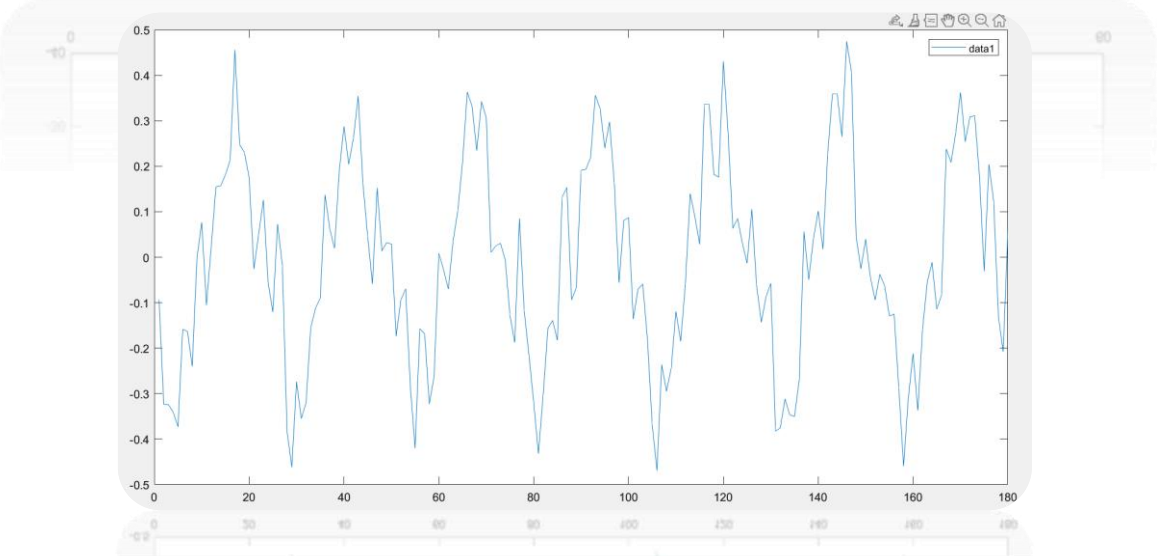
Il peso attuale del motore è calcolato (senza cassa esterna) come la densità del singolo materiale per il suo volume.

- Peso: **c.a 3.15 kg.**

- Induzione al Traferro: **c.a 1.9 T.**

Coppia di cogging: parametro fondamentale per stabilità coppia erogata.



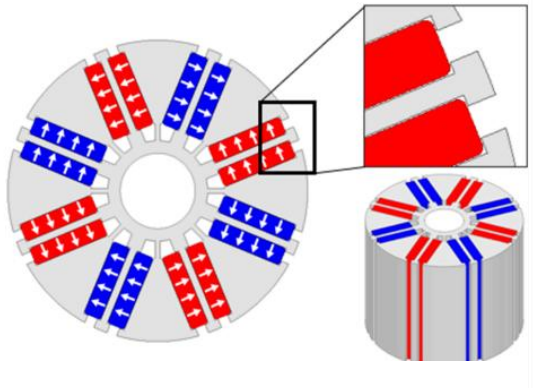


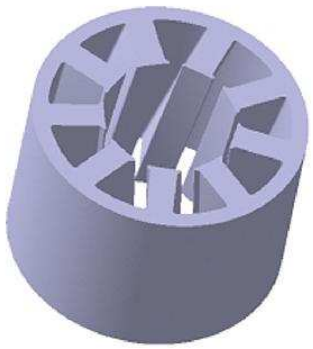
MIGLIORAMENTI

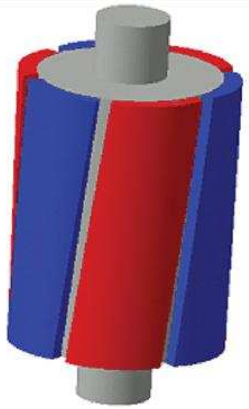
Al fine di aumentare la coppia erogata, si è pensato di applicare i seguenti miglioramenti:

- Aumento densità di corrente → Sistema di raffreddamento migliorato e aumento superfice cava
- Aumento Induzione al Traferro → Ponticelli in acciaio e magneti doppio layer
- Riduzione Coppia di Cogging → Skewing del rotore
- Ridurre le Perdite → Ferro non orientato ottimizzato per alte frequenze
- Migliorare prestazioni «Meccaniche» → Arrotondamento magneti e blocchi di acciaio

MIGLIORAMENTI







Typical specific total loss

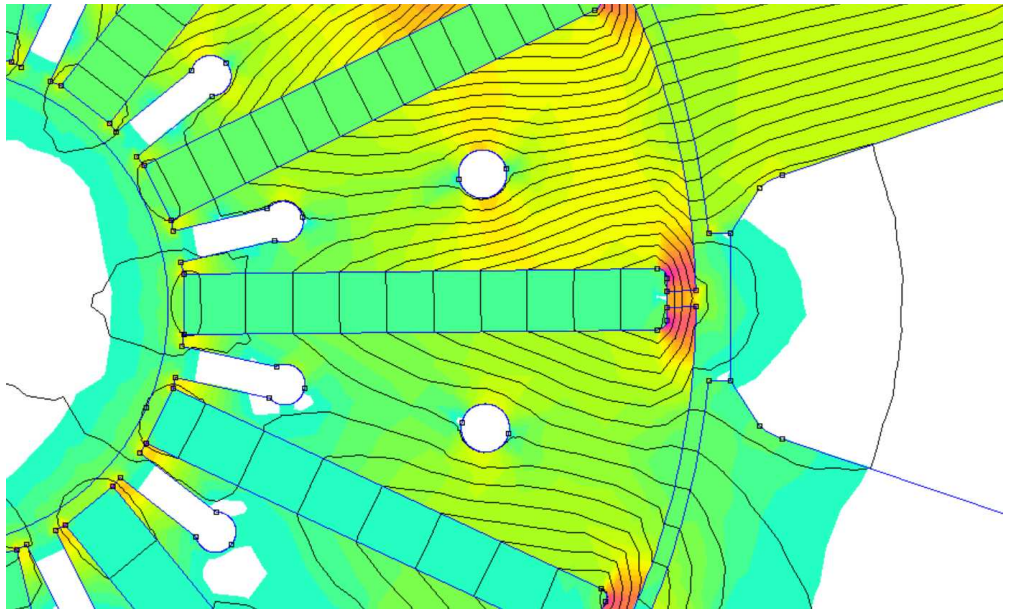
J_{peak} (T)	Typical specific total loss (W/kg)								
	50 Hz	100 Hz	200 Hz	400 Hz	700 Hz	1000 Hz	2500 Hz	5000 Hz	10000 Hz
0.1	0.02	0.03	0.07	0.16	0.37	0.64	2.57	8.17	24.3
0.2	0.06	0.12	0.27	0.66	1.45	2.42	9.61	28.4	83.8
0.3	0.11	0.25	0.57	1.39	3.03	5.06	20.0	58.3	172
0.4	0.18	0.40	0.93	2.31	5.04	8.38	33.1	96.9	287
0.5	0.25	0.57	1.36	3.41	7.41	12.4	49.1	145	432
0.6	0.34	0.76	1.85	4.64	10.2	17.1	67.7	201	
0.7	0.44	0.98	2.38	6.05	13.3	22.4	89.3	268	
0.8	0.54	1.23	2.97	7.60	16.8	28.3	114	347	
0.9	0.66	1.50	3.63	9.32	20.6	35.0	142	441	
1.0	0.80	1.81	4.37	11.2	24.9	42.4	175		
1.1	0.96	2.16	5.22	13.4	29.7	50.7	212		
1.2	1.15	2.59	6.24	16.1	35.3	60.2	256		
1.3	1.40	3.13	7.47	19.6	42.0	71.5	307		
1.4	1.69	3.83	9.09	23.5	50.4	85.7	368		
1.5	2.02	4.53	10.8	28.0	59.9	102			
1.6	2.33	5.19	12.2	31.9	68.9	117			
1.7	2.60	5.75							
1.8	2.91	6.37							
1.9	3.32	7.21							

Riduzione coppia di 3Nm, meno ferro disponibile.

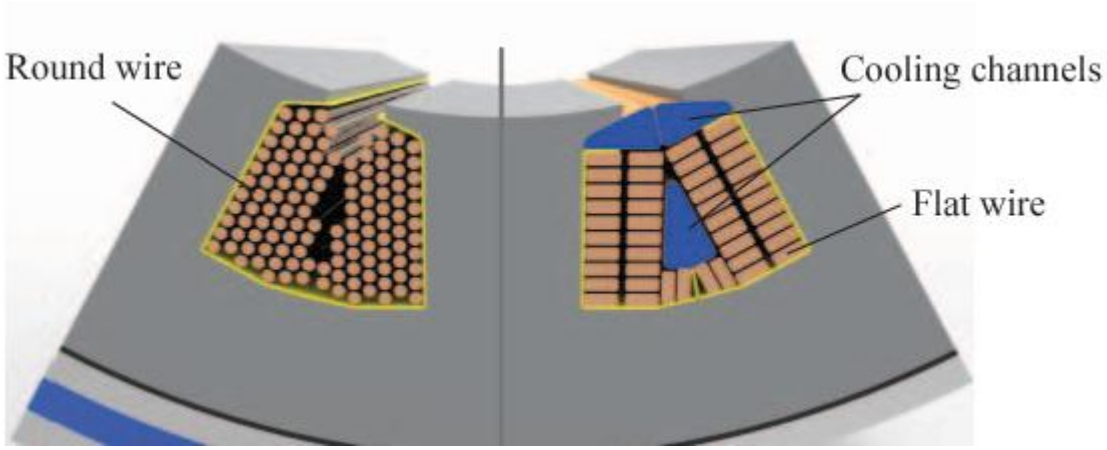
Riduzione Coppia di Cogging. **Skewing** di un angolo pari al periodo della coppia di Coggin.

Cambiamento Lamierino Magnetico: NO20-1200H, ottimizzato per le alte frequenze.

MIGLIORAMENTI



Ponticelli in metallo per dirigere il flusso verso il traferro. Ridurre le perdite ed aumentare la coppia, oltre ad ovviare al problema della struttura meccanica.



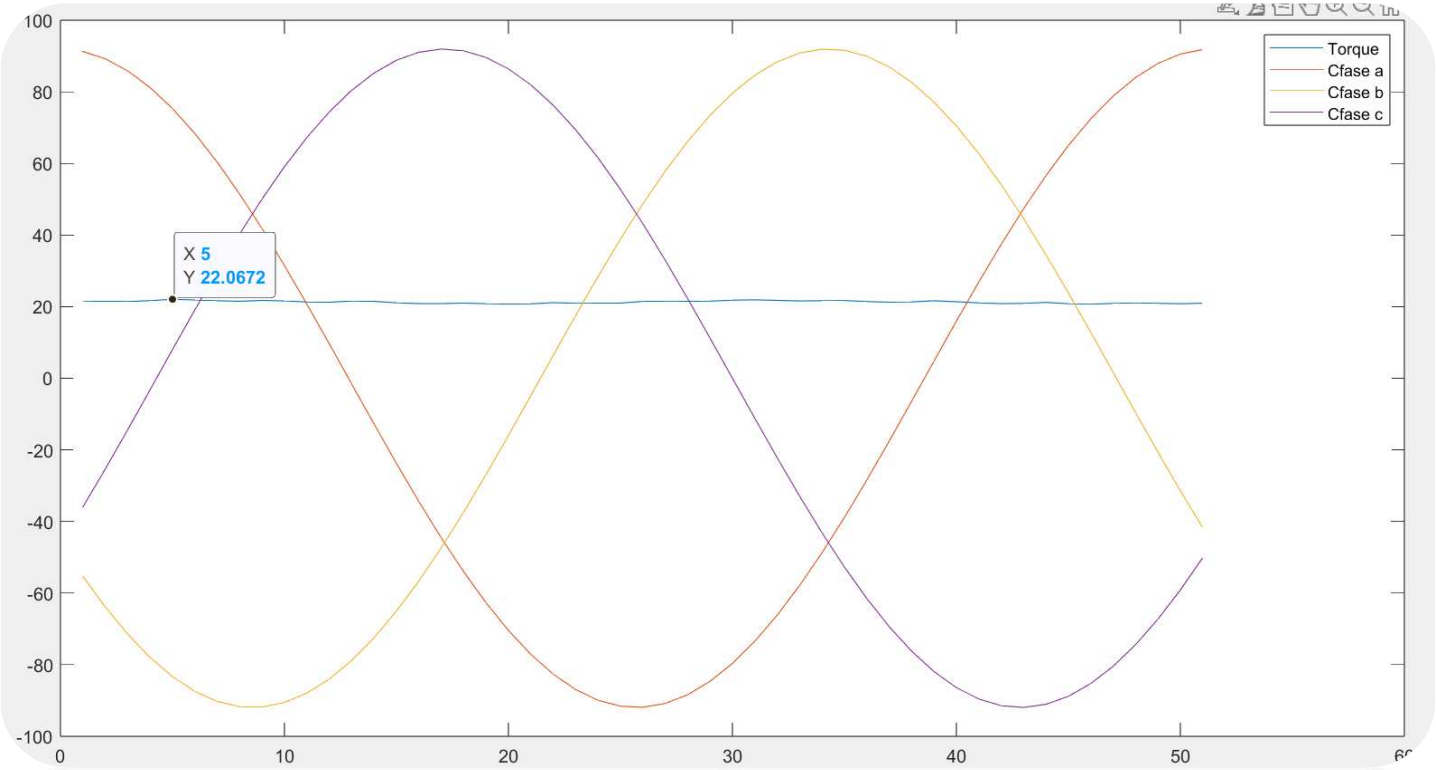
Raffreddamento attivo nelle cave e nelle testate, permettendo di aumentare la densità di corrente massima

RISULTATI CON MIGLIORAMENTI PENSATI

A seguito di alcuni miglioramenti, la coppia arriva ad un valore di 22Nm.

- Analisi termica fatta con 30 A/mm2 mostra un incremento di temperatura di circa 32 gradi nei primi 8 secondi di funzionamento (*acceleration*).

- La coppia massima rispetta quella degli AMK, considerando però il peso il motore risulta un ottimo candidato per la sostituzione.



CONCLUSIONI

AMK

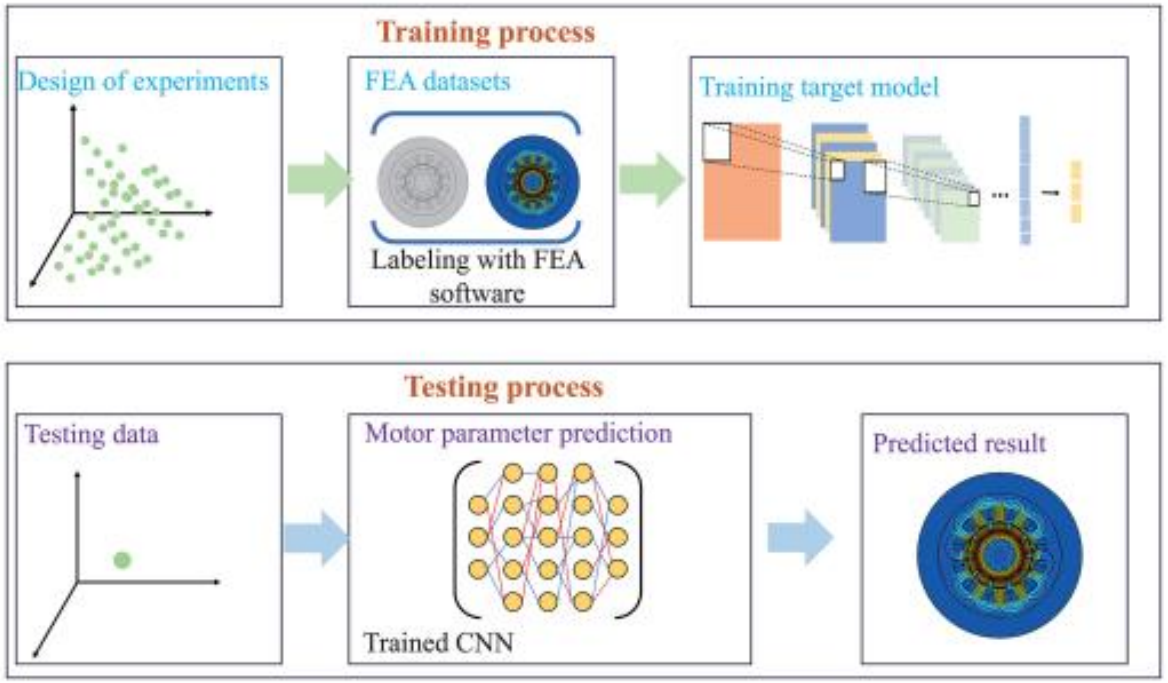
- Coppia Massima: 21Nm
- Peso: 3.8 Kg

Nuovo Motore

- Coppia Massima: 22.2 Nm
- Peso: 3.15 Kg
- Stesso ingombro, e stessa alimentazione.
- Da considerare anche facilità di realizzazione.
- Assenza di analisi strutturale e meccanica.

Curiosità

Implementazione di algoritmi di intelligenza artificiale nello sviluppo di un design ottimale per un motore elettrico, utilizzando algoritmi genetici ed evolutivi.



Grazie per la vostra attenzione!

[1] Design, analysis, and control of interior pm synchronous machines IEEE (Nicola Bianchi, Thomas M. Jahns)

[2] Application of Artificial Intelligence-Based Technique in Electric Motors: A Review (Wangde Qiu , Xing Zhao , Senior Member, IEEE, Andy Tyrrell , Senior Member, IEEE, Suresh Perinpanayagam , Member, IEEE, Shuangxia Niu , Senior Member, IEEE, and Guojun Wen)

[3] Performance Improvement of Concentrated-Flux Type IPM-PMSM Motor with Flared-Shape Magnet Arrangement (Keun-Young Yoon and Soo-Whang Baek)

[4] Macchine elettriche rotanti. Teoria ed esercizi per i corsi in ingegneria (Mauro Andriollo, Giovanni Martinelli, Augusto Morini, Andrea Tortella)

[5] Demagnetization Analysis and Magnet Design of Per manent Magnet Synchronous Motor for Electric Power Steering Applications (Weihua Huang, Jin Wang*, Junchen Zhao, Libing Zhou, and Zhiwei Zhang)

[6] AStudyonCoreSkewConsidering Manufacturability of Double-Layer Spoke-Type PMSM (Dong-Woo Nam ,Kang-BeenLee and Hyung-KwanJang , Hyun-Jo Pyo , Min-Jae Jeong , Seo-Hee Yang , Won-Ho Kim)