

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell' Energia

Relazione per la prova finale
**Progettazione di massima ed analisi agli
elementi finiti di un motore brushless
DC**

Tutor universitario:

Prof. Mauro Andriollo

Laureando:

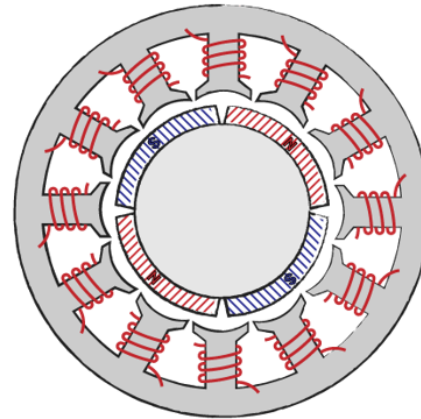
Filippo Crescenzo

Padova, 25/09/2023

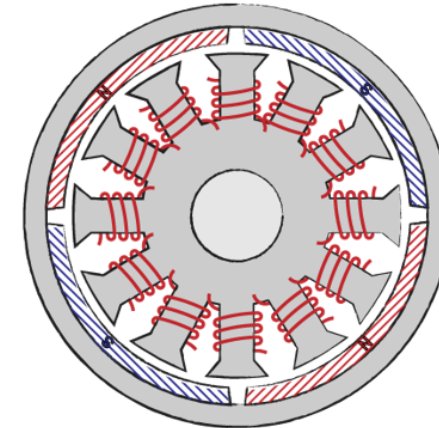
Diverse configurazioni:

- **Disposizione rotore-statore:**

- rotore interno

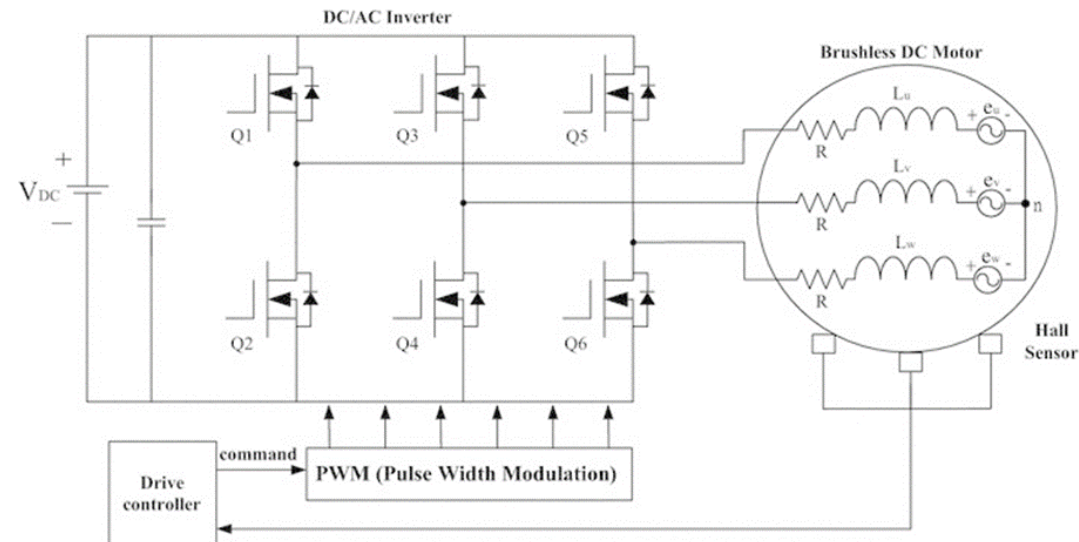


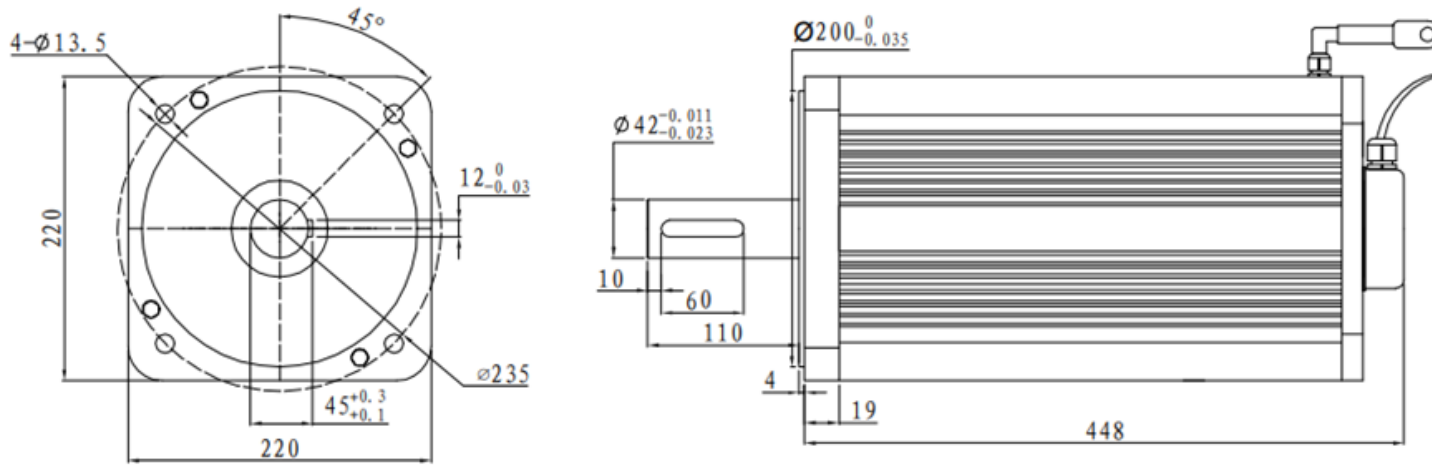
-rotore esterno



- **Alimentazione:**

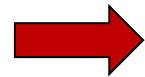
- onda quadra (brushless sinusoidale)
- sinusoidale





Il motore è dell'azienda ATO:

- **Onda quadra**
- **8 poli**
- Potenza nominale: **10.1 kW**



Classe di interesse

Scelte di progetto:

- **q=2 cave/polo/fase**
- **Statore a 36 cave:**
diametro esterno, altezza d'asse



6 poli

Type	220WD-M500200-72V
Power (KW)	10.1
Rated voltage (V)	72
Rated current (A)	163
Rated speed (rpm)	2000
Rated torque (NM)	50
Rotor inertia (Kgcm ²)	335x10 ⁻⁴
Protection rank	IP65
Insulation rank	F
Appropriate environment	Temperature: -20 ~ 60 °C Humidity: < 90% (No dewdrop)
Motor weight (KG)	70

Per il progetto sono stati adottati magneti **NdFeB**



Alta **induzione residua** e **forza coercitiva**

Con l'obiettivo di avere una **smagnetizzazione a vuoto contenuta** (induzione magnete attorno ad 1T), si sono ricavate le dimensioni dei magneti dalle leggi di Gauss di Ampere e dalle equazioni caratteristiche dei magneti

- magnete

$$B_{rem} = 1.23T$$

$$\mu_{rec} = 1.1$$

- Circuito magnetico

$$g = 1mm$$

$$t_m = 4mm$$

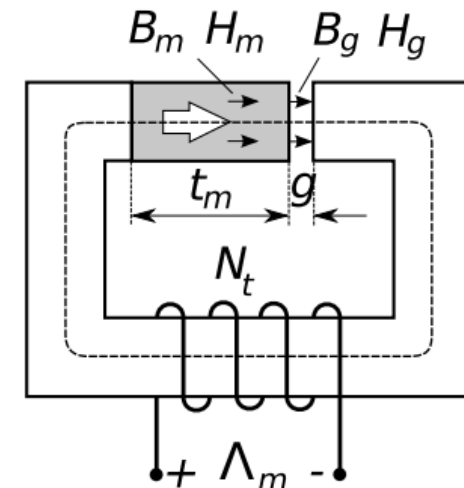
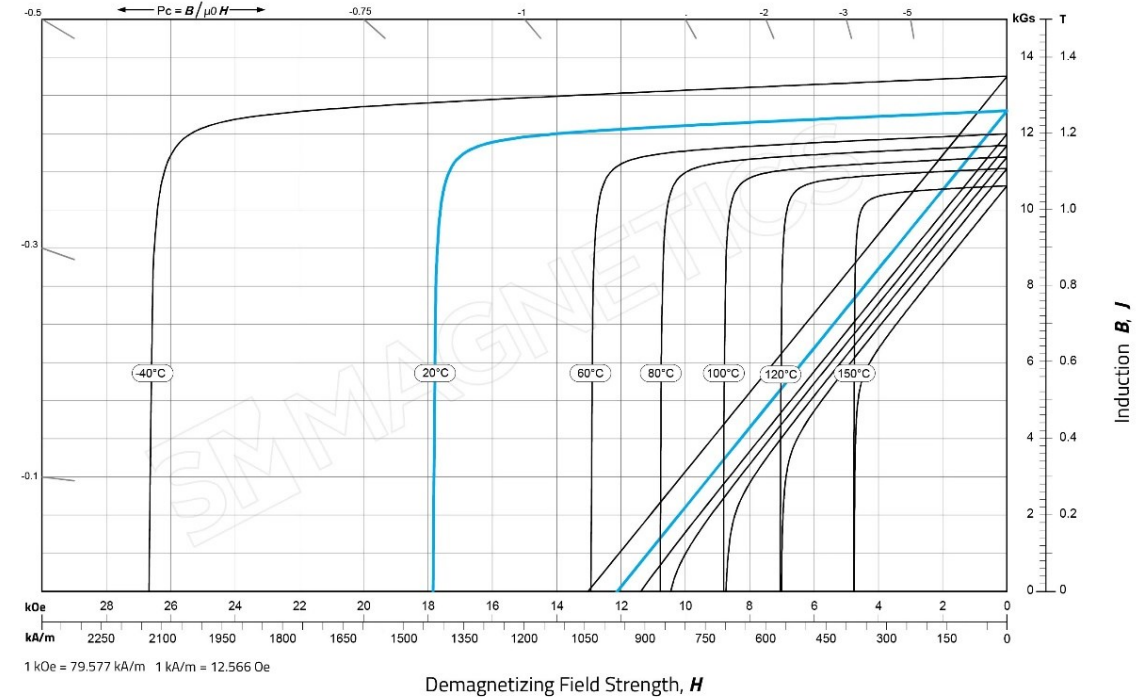
magnete copre il 90% del semipasso polare



$$B_m = 0.98 [T]$$

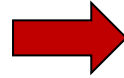
$$B_g = 0.87 [T]$$

(valori medi per polo a vuoto)



Fissati:

- **Riempimento:** 45%
- **Densità di corrente:** 3A/mm²
- **Rendimento** (parti attive): 90%
- **Area di cava:** 151mm² (da RMxprt)

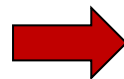


$$N_{cond./cava} = 10$$

$$e_l = 2e_a = 2 \frac{N_{ph}}{a} B_m \omega_m D L_{stk}$$

Avendo determinato:

- **Numero di conduttori per cava**
- **Induzione**
- **Lamierini: diametro**

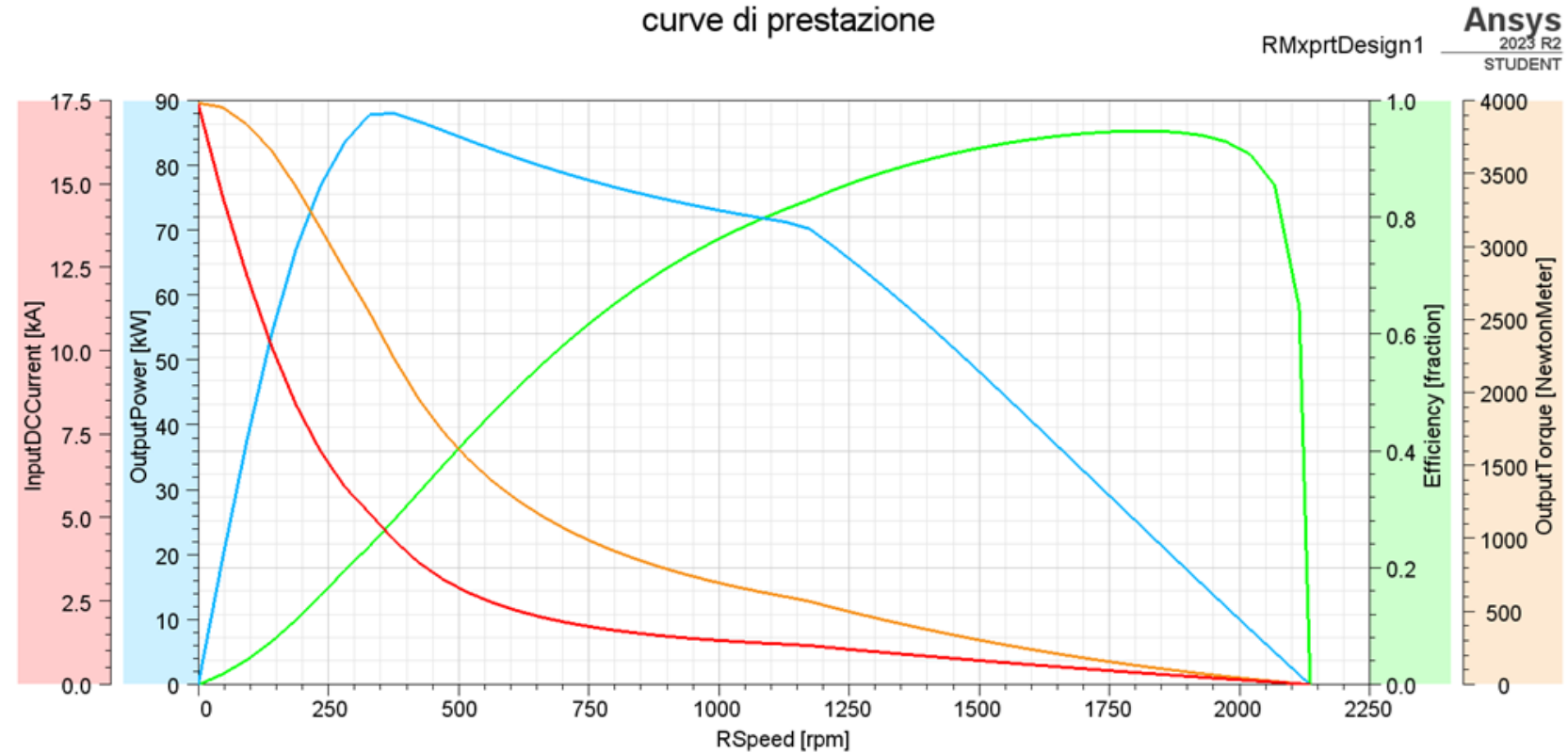


$$L_{stk} = 145mm$$

È necessario definire la **lunghezza del pacco lamierini** adatta per questa configurazione.

rpm	fase	linea
[1/min]	[V]	[V]
1800	29,72	59,4
1850	30,55	61,1
1900	31,37	62,7
1950	32,20	64,4
2000	33,02	66,0
2050	33,85	67,7
2100	34,67	69,3
2150	35,50	71,0
2200	36,33	72,7

FULL-LOAD DATA	
Average Input Current (A):	147.281
Root-Mean-Square Armature Current (A):	127.144
Armature Thermal Load (A^2/mm^3):	58.7876
Specific Electric Loading (A/mm):	19.4262
Armature Current Density (A/mm^2):	3.0262
Frictional and Windage Loss (W):	0
Iron-Core Loss (W):	460.34
Armature Copper Loss (W):	101.007
Transistor Loss (W):	0
Diode Loss (W):	0
Total Loss (W):	561.347
Output Power (W):	10042.9
Input Power (W):	10604.2
Efficiency (%):	94.7064
Rated Speed (rpm):	1990.59
Rated Torque (N.m):	48.1781
Locked-Rotor Torque (N.m):	2785.11
Locked-Rotor Current (A):	17252.8



- **Efficienza:** 94,7% (no perdite meccaniche)
- **Massa:** 30kg (solo parti attive)
- **Coppia e velocità nominali:** 48 Nm e 1990 rpm

Magneti di Ferrite:

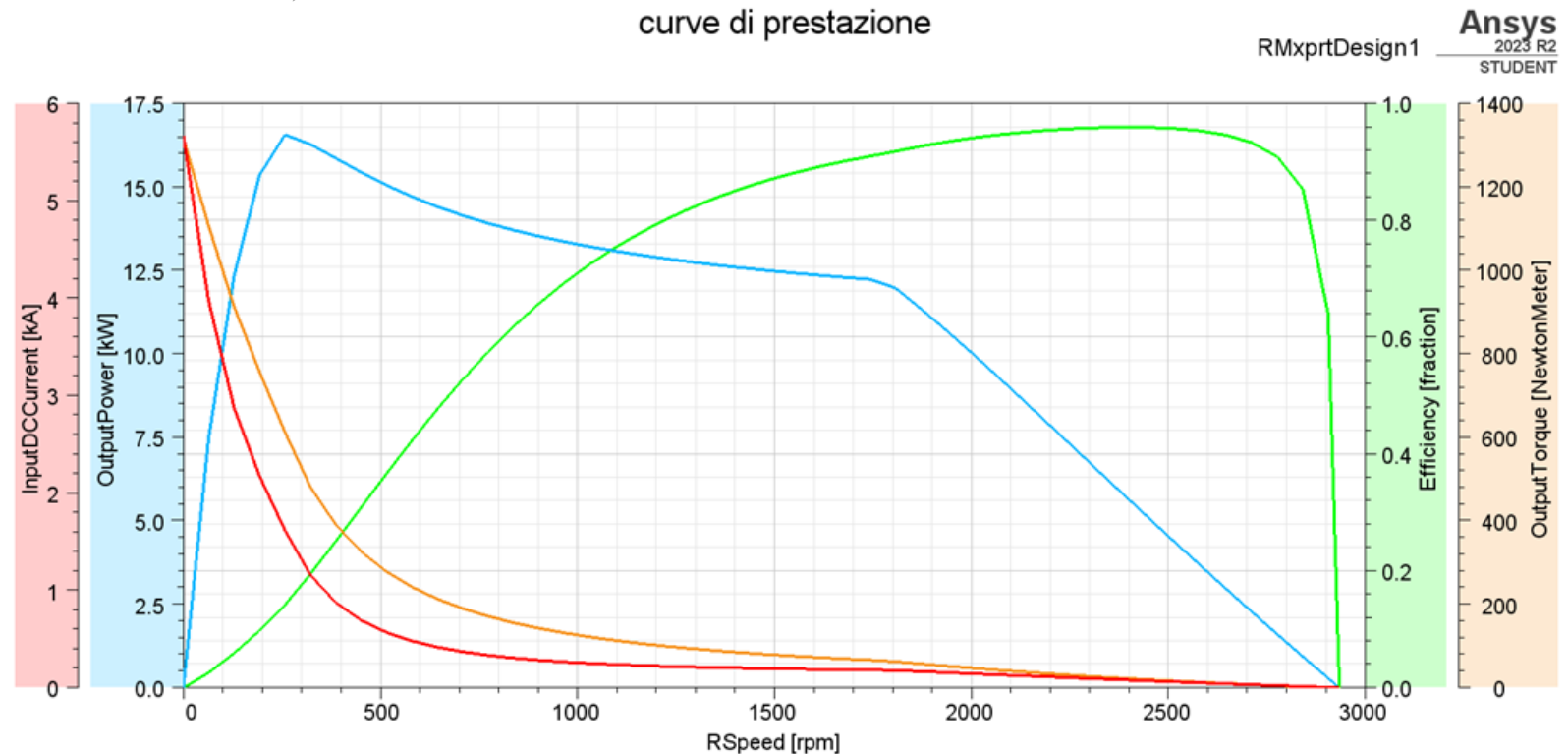
- **Induzione residua:** 0,4T (1,24T NdFeB)
- **Forza coercitiva:** 267kA/m (890kA/m NdFeB)



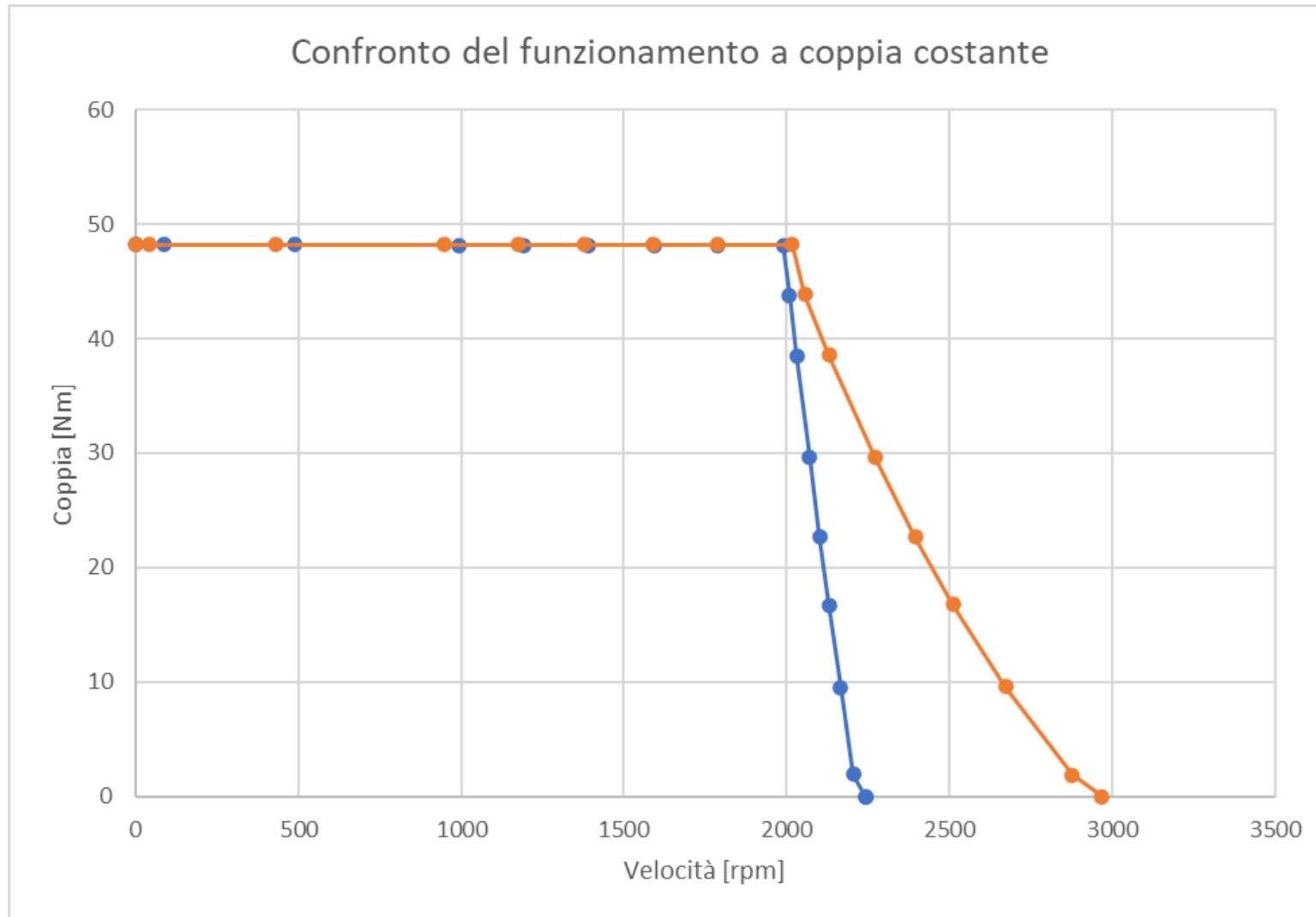
$$L_{stk} = 375mm$$

FULL-LOAD DATA	
Average Input Current (A):	148.002
Root-Mean-Square Armature Current (A):	170.528
Armature Thermal Load (A ² /mm ³):	105.751
Specific Electric Loading (A/mm):	26.0548
Armature Current Density (A/mm ²):	4.0588
Frictional and Windage Loss (W):	0
Iron-Core Loss (W):	103.294
Armature Copper Loss (W):	368.909
Transistor Loss (W):	0
Diode Loss (W):	0
Total Loss (W):	472.203
Output Power (W):	10183.9
Input Power (W):	10656.1
Efficiency (%):	95.5687
Rated Speed (rpm):	2017.43
Rated Torque (N.m):	48.2047
Locked-Rotor Torque (N.m):	1854.67
Locked-Rotor Current (A):	8497.55

curve di prestazione



- **Efficienza:** 95,5% (no perdite meccaniche)
- **Massa:** 72kg (solo parti attive)
- **Coppia e velocità nominale:** 48Nm e 2017rpm



- Velocità massima **prima configurazione**: 2242 rpm
- Velocità massima **seconda configurazione**: 2969 rpm

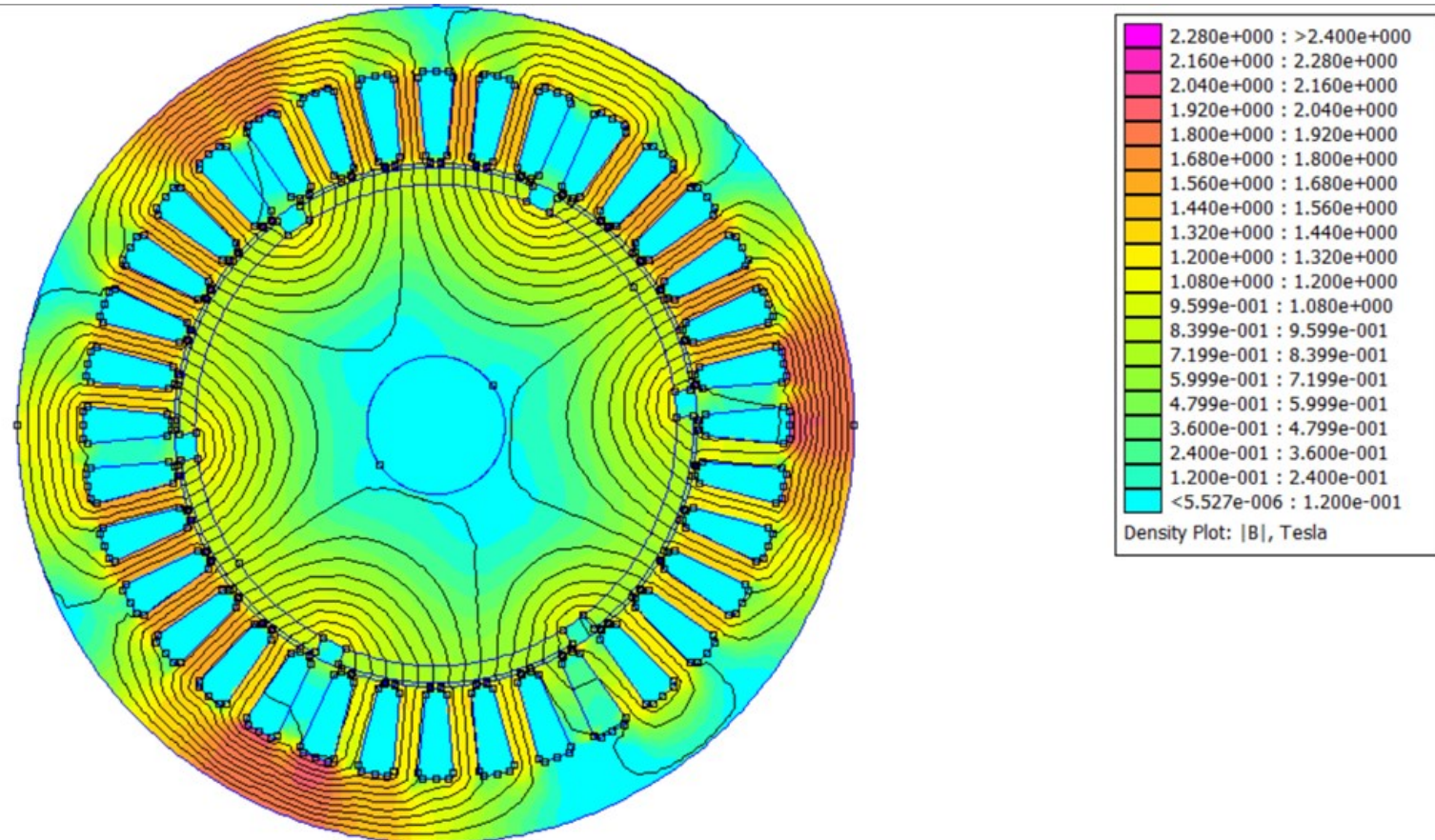
NO-LOAD MAGNETIC DATA

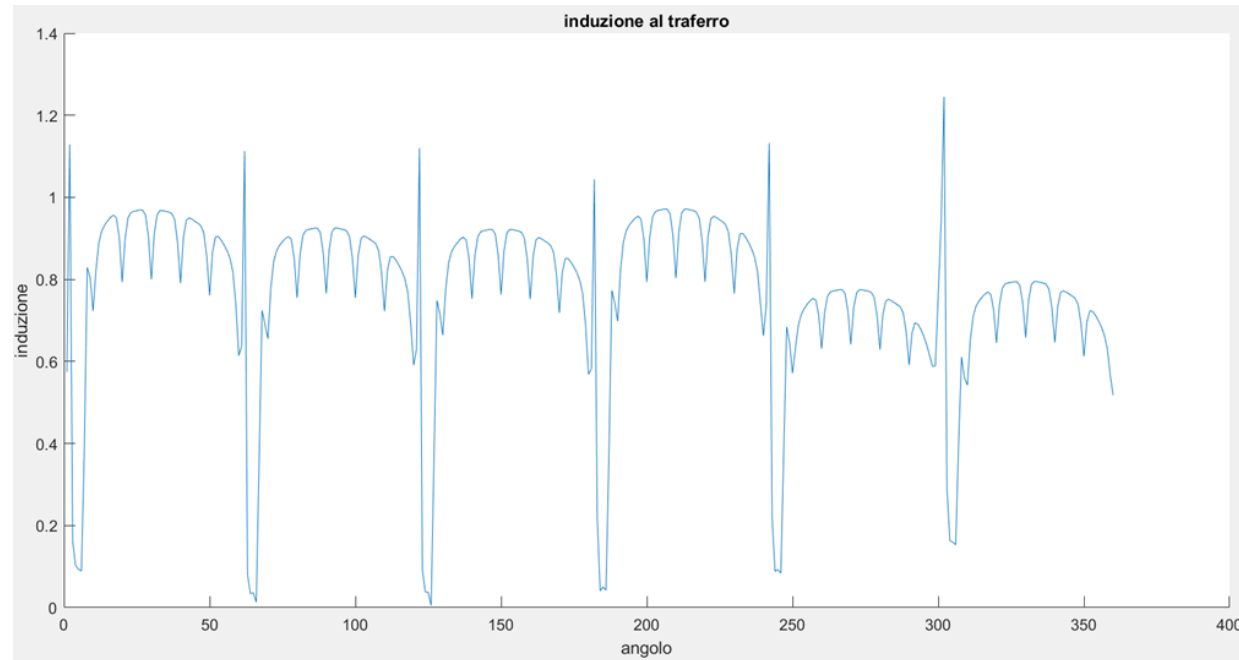
Stator-Teeth Flux Density (Tesla):	1.76501
Stator-Yoke Flux Density (Tesla):	1.79571
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla):	0.646019
Air-Gap Flux Density (Tesla):	0.850644
Magnet Flux Density (Tesla):	0.900654

Le analisi fatte con gli elementi finiti
sono di tipo **magnetostatico**

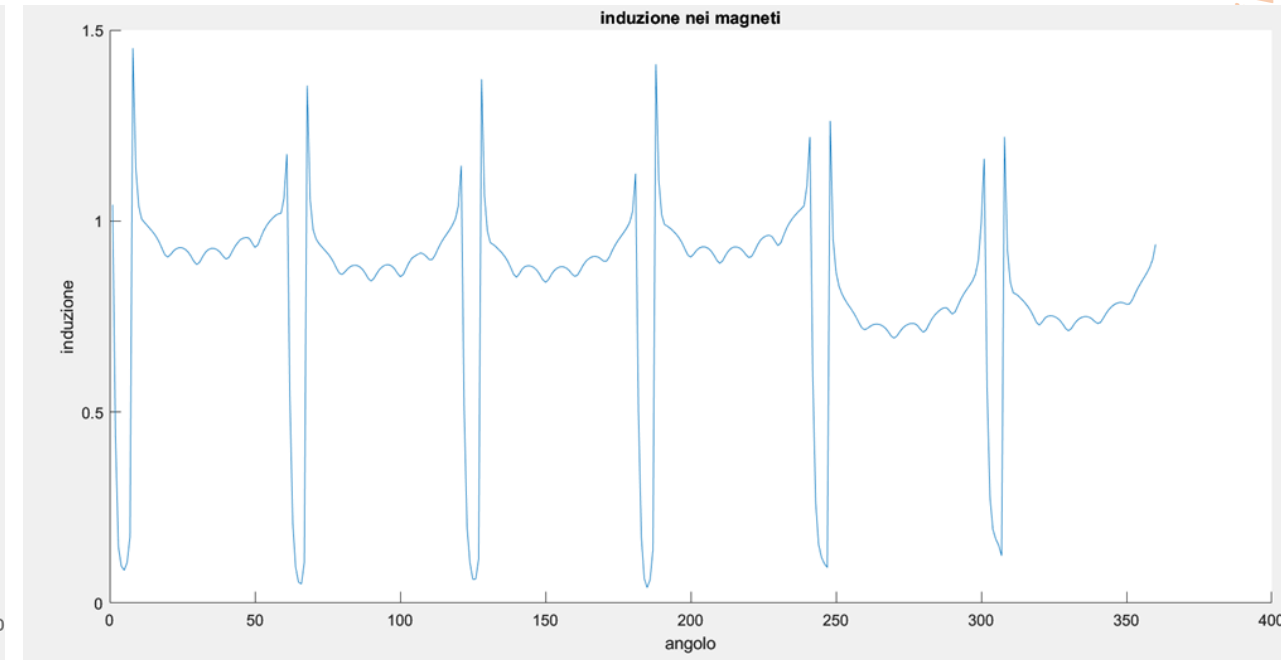


Si è fatto uso di **FEMM** con il
supporto di **Matlab**



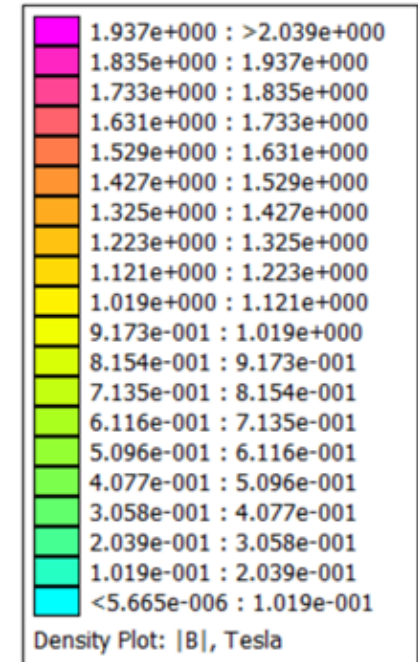
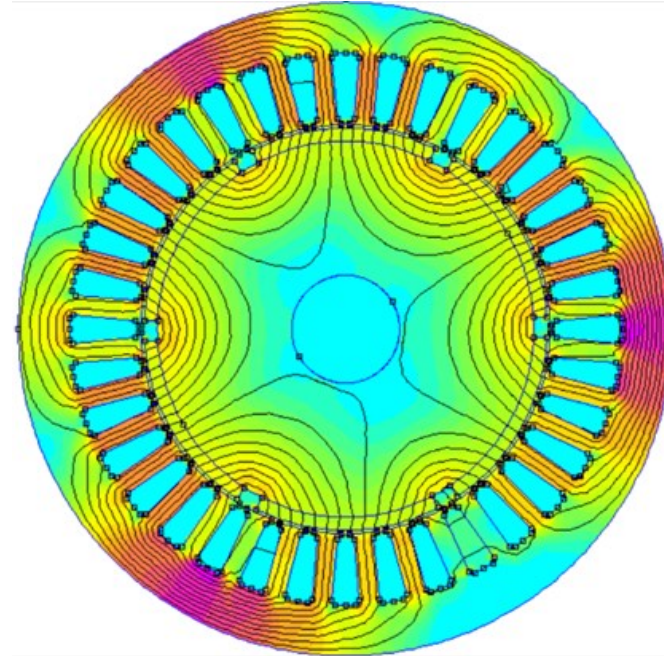
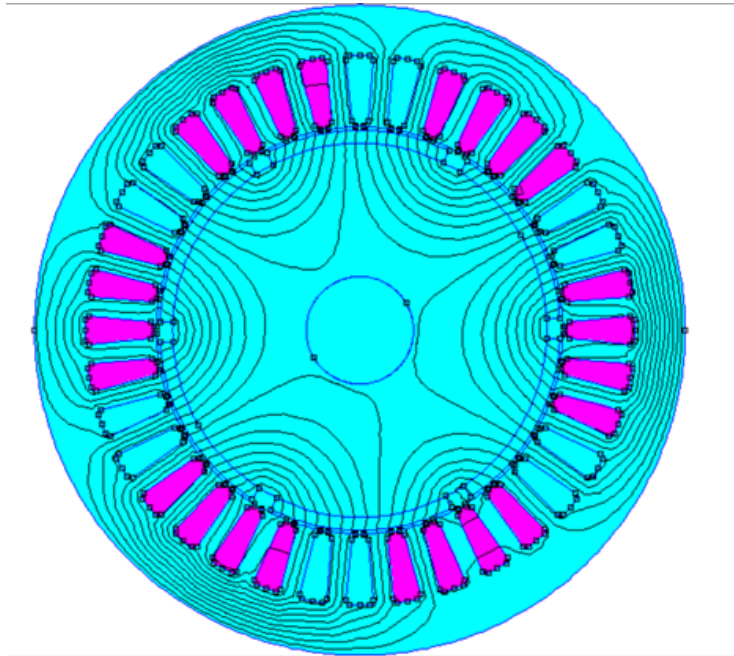


Valore medio per polo: 0,85T



Valore medio per polo: 0,88T

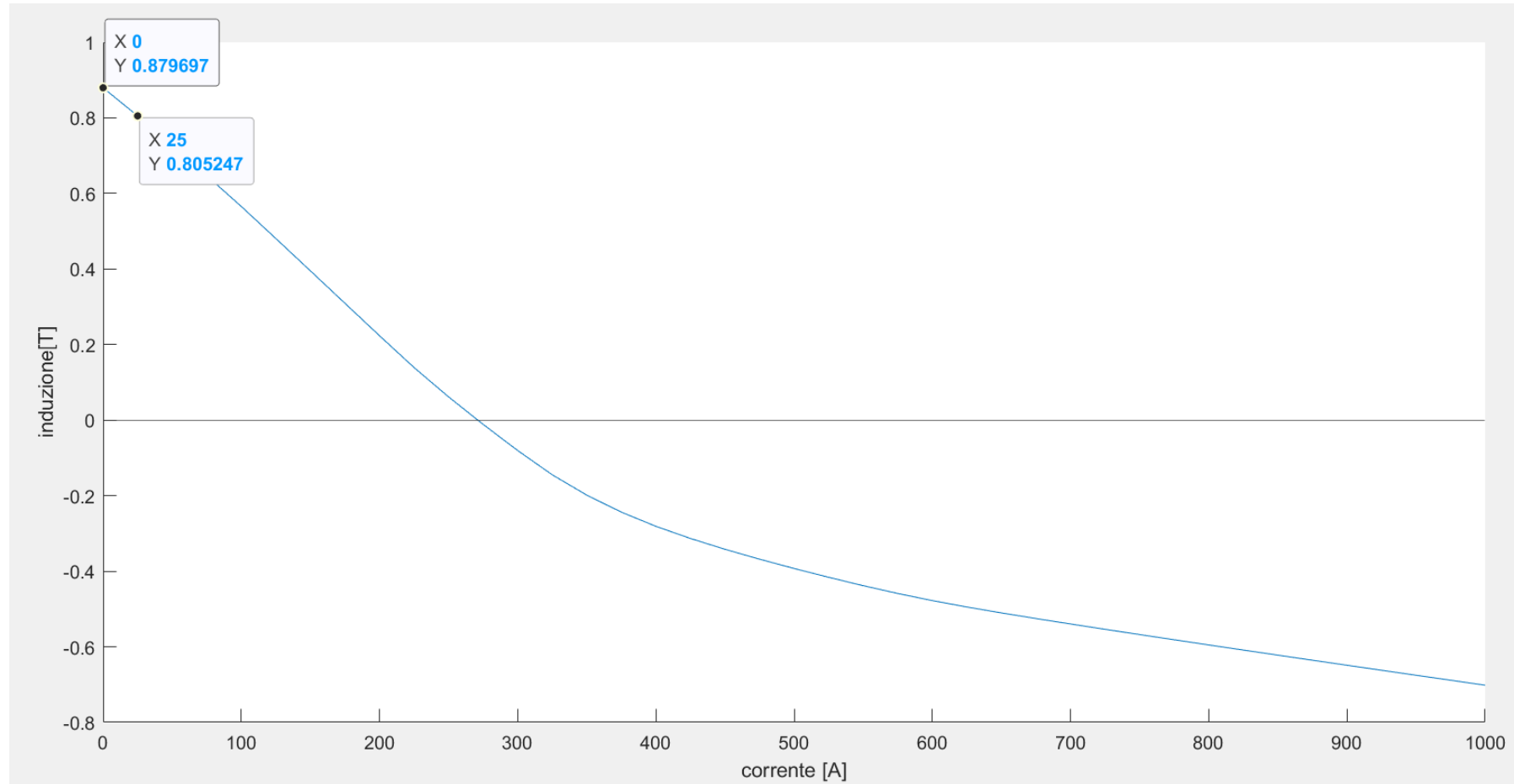
Andamento del modulo dell'induzione: |B|



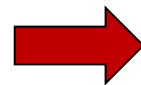
Si studia l'effetto smagnetizzante della corrente di alimentazione.
(inizialmente 24,5A corrispondente alla corrente di matassa al punto di lavoro nominale)



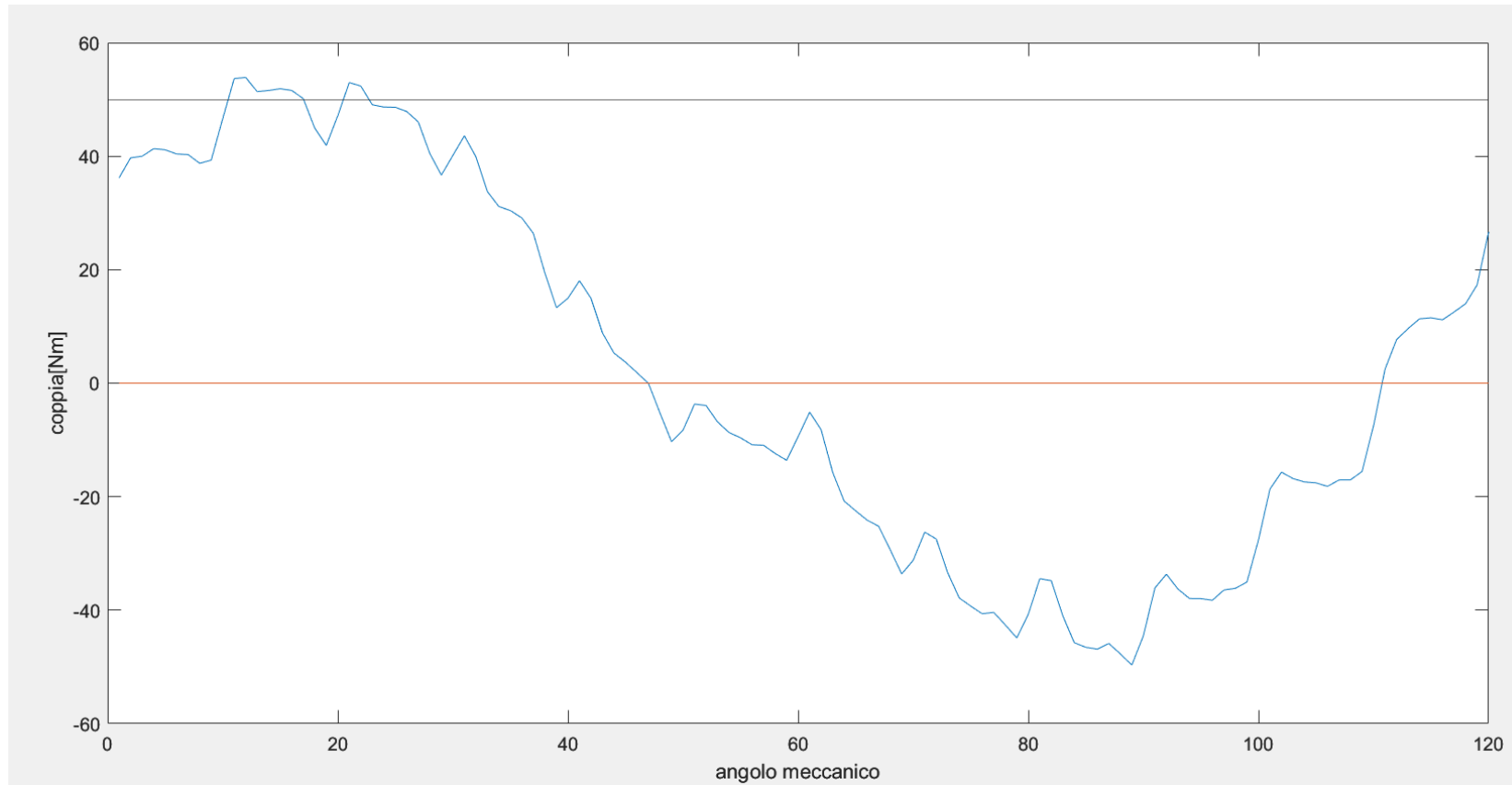
Rotore posizionato in modo da porre fmm di statore e fmm di rotore in opposizione di fase



Induzione nei magneti mediata sui punti di un **arco interno al magnete**, con **corrente di alimentazione crescente**



- **A vuoto: 0,88T**
- **A carico nominale: 0,8T**
- **Smagnetizzazione completa: 275A**



Andamento curva della coppia in funzione dell'angolo di coppia

Linea di riferimento a 50Nm

Grazie per l'attenzione

- [1] Andriollo, Mauro; Martinelli, Giovanni; Morini, Augusto; Tortella, Andrea, *Macchine elettriche rotanti. Teoria ed esercizi*. Bologna: Esculapio, 2016. 1a edizione
- [2] Design, Analysis, and Control of Interior PM Synchronous Machines: Presented at the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Seattle, USA, October 3rd, 2004
- [3] Hendershot, J. R. *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*. Magna Physics Publishing Clarendon Press, 1994
- [4] Key World Energy Statistics 2021. OECD Publishing.
- [5] Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems, Paul Wide Conrad U. Brunner. IEA