

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

**Análise de motores síncronos de ímãs
permanentes no software Ansys
Motor-CAD**

César Felipe de Souza Pissolati

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ENGENHARIA ELÉTRICA

Brasília
2025

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

**Análise de motores síncronos de ímãs
permanentes no software Ansys
Motor-CAD**

César Felipe de Souza Pissolati

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
como requisito parcial para obtenção do grau
de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Francis Arody Moreno Vásquez

Brasília
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Souza Pissolati, César Felipe de.

Análise de motores síncronos de ímãs permanentes no software Ansys Motor-CAD / César Felipe de Souza Pissolati; orientador Francis Arody Moreno Vásquez. -- Brasília, 2025.

96 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) -- Universidade de Brasília, 2025.

1. Motores síncronos de ímãs permanentes. 2. Método dos elementos finitos. 3. Ímãs permanentes. 4. Ansys Motor-CAD. 5. Topologias. I. Moreno Vásquez, Francis Arody, orient. II. Título.

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

**Análise de motores síncronos de ímãs permanentes no
software Ansys Motor-CAD**

César Felipe de Souza Pissolati

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
como requisito parcial para obtenção do grau
de Engenheiro Eletricista.

Trabalho aprovado. Brasília, 15 de Maio de 2025:

Prof. Dr. Francis Arody Moreno Vásquez,
UnB/FT/ENE
Orientador

Prof. Dr. Ivan Marques de Toledo Camargo,
UnB/FT/ENE
Examinador interno

Prof. Dr. Taygoara Felamingo de Oliveira,
UnB/FT/ENM
Examinador interno

Para meus pais, César Pereira e Maria Aldecy.

Agradecimentos

Antes de tudo, agradeço a Deus pela saúde e pela oportunidade de realizar e concluir este curso ao longo desses seis longos anos. Certamente, foi o período mais desafiador da minha vida, mas também o de maior aprendizado. O Seu zelo e cuidado por mim me concederam forças para não desistir e superar, com muita dedicação, a graduação em engenharia elétrica.

Em seguida, sou grato aos meus pais, César Pereira e Maria Aldecy, por me apoiarem nos estudos e me motivarem a melhorar a cada dia. Além disso, me ensinaram o que é gentileza, respeito e honestidade. Querido pai, seus esforços diários para me proporcionar tudo o que há de melhor, sem faltar nada em nossa mesa, me ensinaram que a vida não é fácil e exige muito trabalho. Mãe, minha rainha, mesmo à distância, você sempre se preocupou comigo, e sua trajetória acadêmica e profissional sempre me inspirou a evoluir constantemente.

Aos meus irmãos, Gabriel José e Carlos Ramon, agradeço pelo amor, carinho e exemplo. Peço desculpas pelas teimosias, mas sei que lidar comigo nunca foi tarefa fácil. Demonstro também minha imensa gratidão a Dona Maria (in memoriam) por ter cuidado de mim ao longo da pandemia. Descanse em paz.

À minha namorada, Luiza Sibovitz, agradeço pelo companheirismo e carinho. Os momentos mais felizes da minha vida são ao seu lado, te amo.

Aos meus amigos, manifesto meus sinceros agradecimentos. Vocês tornaram essa caminhada mais tranquila e divertida, em especial: Caio Flores, Lucas Lessa, Matheus Sangi, Felipe Perone, Felipe Jales e Pedro Nogueira. Aos meus amigos de intercâmbio: Samir Chahin, Enzo Furumoto, Pedro Sinkoc, Thays Pires e Luca Poletto.

Por último, mas não menos importante, agradeço à Universidade de Brasília por me proporcionar um curso de excelência, com professores altamente capacitados e dedicados ao ensino, destaco meu professor orientador, Dr. Francis Arody. Agradeço também ao *Shibaura Institute of Technology*, onde realizei um ano de intercâmbio na grandiosa capital do Japão, oportunidade na qual conheci pessoas incríveis.

*"So do not fear, for I am with you; do not be dismayed, for I am your God. I will strengthen you
and help you; I will uphold you with my righteous right hand."
(Isaiah 41:10)*

Resumo

Diante do crescente interesse global por soluções mais sustentáveis e eficientes em setores como mobilidade elétrica, geração de energia elétrica e automação industrial, este trabalho se propõe a investigar, por meio de simulações numéricas, diferentes topologias de motores síncronos de ímãs permanentes (PMSM), buscando identificar seus benefícios, desafios construtivos e operacionais sob diferentes perspectivas, como a utilização de diferentes materiais, a segmentação de ímãs e entre outros. O trabalho oferece uma abordagem prática para o uso do Ansys Motor-CAD, que utiliza o método do elementos finitos (FEM), contribuindo como base técnica para futuros projetos e validações experimentais.

No *software* Ansys Motor-CAD foram simuladas e comparadas topologias de motores de fluxo radial, com ímãs montados na superfície (SPM) e embutidos (IPM), e de fluxo axial, incluindo configurações com rotor e estator únicos, bem como com dois rotores e estator único, mais especificamente a topologia Torus-S com magnetos NN. O estudo abrangeu a análise de torque, análises térmicas, assim como perdas magnéticas, elétricas e mecânicas, comportamento dinâmico e desempenho em diferentes condições de operação. Os resultados concluem que as topologias de fluxo axial, especialmente as com dois rotores e um único estator (Torus-S com magnetos NN) apresentam vantagens significativas em termos de compactidade e aproveitamento de torque, demonstrando potencial para aplicações em que o espaço físico é limitado, a alta eficiência e a robustez são necessárias. Este estudo reforça a importância da pesquisa aplicada no desenvolvimento de motores elétricos mais eficientes, alinhando-se aos objetivos globais de transição energética e descarbonização da matriz industrial e de transporte.

Palavras-chave: Motores síncronos de ímãs permanentes. Método dos elementos finitos. Ímãs permanentes. Ansys Motor-CAD. Topologias.

Abstract

In light of the growing global interest in more sustainable and efficient solutions in sectors such as electric mobility, electric power generation, and industrial automation, this work aims to investigate, through numerical simulations, different topologies of permanent magnet synchronous motors (PMSM), seeking to identify their benefits, constructive and operational challenges from different perspectives, such as the use of different materials, magnet segmentation, among others. This work offers a practical approach to the use of Ansys Motor-CAD, which employs the Finite Element Method (FEM), contributing as a technical foundation for future projects and experimental validations.

Using the Ansys Motor-CAD software, topologies of radial flux motors, with surface-mounted magnets (SPM) and interior permanent magnets (IPM), as well as axial flux motors—including configurations with single rotor and stator, as well as with two rotors and a single stator, specifically the Torus-S topology with NN magnets—were simulated and compared. The study covered torque analysis, thermal analysis, as well as magnetic, electrical, and mechanical losses, dynamic behavior, and performance under different operating conditions. The results conclude that axial flux topologies, especially those with two rotors and a single stator (Torus-S with NN magnets), offer significant advantages in terms of compactness and torque utilization, demonstrating potential for applications where physical space is limited, and high efficiency and robustness are required. This study reinforces the importance of applied research in the development of more efficient electric motors, aligning with global goals for energy transition and the decarbonization of the industrial and transportation sectors.

Keywords: Permanent magnet synchronous motor. Finite element method. Permanent magnets. Ansys Motor-CAD. Topologies.

Lista de figuras

Figura 2.1	Três diferentes situações de interação de um ímã e uma bobina energizada.	21
Figura 2.2	Exemplo de eletroímã de núcleo ferromagnético.	22
Figura 2.3	Curva $B - H$ ou curva de magnetização.	24
Figura 2.4	Motor síncrono de ímãs permanentes de fluxo radial de rotor interno . .	26
Figura 2.5	Máquina com rotor interno de ímãs permanentes montados em superfície	27
Figura 2.6	Máquina com rotor externo de ímãs permanentes montados em superfície	27
Figura 2.7	Três estruturas distintas de rotores com ímãs permanentes embutidos .	28
Figura 2.8	Máquina elétrica de ímãs permanentes de fluxo axial	28
Figura 2.9	Máquina elétrica de ímãs permanentes de fluxo axial com um único estator e um único rotor	29
Figura 2.10	Máquina elétrica de ímãs permanentes de fluxo axial Torus-NS	30
Figura 2.11	Máquinas elétricas de ímãs permanentes de fluxo axial Torus-S.	30
Figura 2.12	seção de par de polos de máquina elétrica de ímãs permanentes de fluxo axial Torus-S.	31
Figura 2.13	seção de par de polos de uma máquina elétrica de ímãs permanentes Torus-NS do tipo NN. 1-Enrolamentos, 2-Ímã permanente, 3-Estator e 4-Rotor.	31
Figura 2.14	Máquinas de ímãs permanentes com diferentes disposições de enrolamentos	33
Figura 2.15	Circuito equivalente de um motor síncrono de ímãs permanentes	34
Figura 2.16	Diagrama fasorial de um motor síncrono com carga	34
Figura 2.17	Ímã cercado por um anel de metal com dois dentes	38
Figura 2.18	Torque de <i>cogging</i> resultante no ímã conforme inclinação ϕ	39
Figura 3.1	Exemplo de estrutura formada por elementos interconectados	41
Figura 3.2	Exemplo de máquina de ímãs permanentes formada por uma malha de elementos finitos	42
Figura 3.3	Página inicial do Ansys Motor-CAD com sinalização das entradas . . .	45
Figura 3.4	Página Axial do Ansys Motor-CAD com sinalização das entradas	47
Figura 3.5	Página <i>Pattern</i> do Ansys Motor-CAD com sinalização das entradas . . .	48
Figura 3.6	Página <i>Definition</i> do Ansys Motor-CAD com sinalização das entradas .	49
Figura 3.7	Página <i>Materials</i> do Ansys Motor-CAD com sinalização das entradas . .	50
Figura 3.8	Página <i>Calculation</i> do Ansys Motor-CAD com sinalização das entradas	51
Figura 3.9	Página <i>E-Magnetics</i> do Ansys Motor-CAD no modelo <i>E-Magnetic</i> com sinalização das páginas de resultados	52
Figura 4.1	Modelo 1 - Motor síncrono de fluxo radial com rotor interno de ímãs permanentes montados em superfícies.	53

Figura 4.2	Modelo 1 - Motor síncrono de fluxo radial com rotor interno de ímãs permanentes montados em superfícies, enrolamentos e diagrama de fases.	55
Figura 4.3	Modelo 1 - Ranhura com 80 voltas de fio de cobre.	55
Figura 4.4	Modelo 1 - Padrão dos enrolamentos de cobre por fase e ranhura.	56
Figura 4.5	Modelo 1 - Tensão terminal de linha x grau elétrico.	58
Figura 4.6	Modelo 1 - Torque x grau elétrico.	58
Figura 4.7	Modelo 1 - Torque para diferentes ângulos de avanço x Velocidade.	59
Figura 4.8	Modelo 1 - Torque x Ângulos de avanço da corrente.	60
Figura 4.9	Modelo 1 - Torque de <i>cogging</i> x grau mecânico.	60
Figura 4.10	Modelo 1 - Densidade de perdas por histerese e correntes de Foucault.	62
Figura 4.11	Modelo 1 - Densidade de perdas por histerese e correntes de Foucault, ímãs segmentados.	62
Figura 4.12	Modelo 1 - Densidade de perdas por histerese.	63
Figura 4.13	Modelo 1 - Perdas mecânicas	64
Figura 4.14	Modelo 1 - Motor com carcaça <i>Housing Fins</i>	65
Figura 4.15	Modelo 1 - Esquemático superior simulado em estado estacionário com respectivas temperaturas.	66
Figura 4.16	Modelo 1 - Visão axial do motor com carcaça e respectivas temperaturas.	66
Figura 4.17	Modelo 1 - Temperatura em um pequeno segmento do estator.	67
Figura 4.18	Modelo 2 - Motor síncrono de fluxo radial de ímãs permanentes embutidos em superfícies.	68
Figura 4.19	Modelo 2 - Motor síncrono de fluxo radial de ímãs permanentes embutidos em superfícies, disposição dos enrolamentos por circuito de fase.	69
Figura 4.20	Modelo 2 - Tensão terminal de linha x grau elétrico.	71
Figura 4.21	Modelo 2 - Torque x grau elétrico.	72
Figura 4.22	Modelo 2 - Torque para diferentes ângulos de avanço x Velocidade.	72
Figura 4.23	Modelo 2 - Torque x Ângulos de avanço da corrente.	73
Figura 4.24	Modelo 2 - Torque de <i>cogging</i> x grau mecânico.	74
Figura 4.25	Modelo 2 - Densidade de perdas por histerese e correntes de Foucault.	76
Figura 4.26	Modelo 2 - Densidade de perdas por histerese.	76
Figura 4.27	Modelo 2 - Densidade de perdas por histerese, estator composto pelo material <i>M1000-65A</i>	77
Figura 4.28	Modelo 2 - Motor com carcaça <i>Housing Fins</i>	78
Figura 4.29	Modelo 2 - Esquemático simulado em estado estacionário com respectivas temperaturas.	79
Figura 4.30	Modelo 2 - Visão axial do motor com carcaça <i>Housing Fins</i>	79
Figura 4.31	Modelo 2 - Visão radial do motor com carcaça <i>Water Jacket</i>	80
Figura 4.32	Modelo 2 - Visão axial do motor com carcaça <i>Water Jacket</i> e suas temperaturas.	81

Figura 4.33	Modelos 3 e 4 - Motores síncronos de fluxo axial, visão linear.	82
Figura 4.34	Modelos 3 e 4 - Motores síncronos de fluxo axial, visão axial.	82
Figura 4.35	Modelos 3 e 4 - Motores síncronos de fluxo axial de ímãs permanentes, disposição dos enrolamentos por circuito de fase.	84
Figura 4.36	Modelos 3 e 4 - Motores síncronos de fluxo axial de ímãs permanentes, representação de uma ranhura.	84
Figura 4.37	Modelo 3 - Tensão terminal de linha x grau elétrico.	86
Figura 4.38	Modelo 4 - Tensão terminal de linha x grau elétrico.	87
Figura 4.39	Modelo 3 - Torque x grau elétrico.	88
Figura 4.40	Modelo 4 - Torque x grau elétrico.	88
Figura 4.41	Modelo 3 - Torque de <i>cogging</i> x grau mecânico.	89
Figura 4.42	Modelo 4 - Torque de <i>cogging</i> x grau mecânico.	89
Figura 4.43	Modelo 3 - Densidade de perdas por histerese e correntes de Foucault. .	91
Figura 4.44	Modelo 4 - Densidade de perdas por histerese e correntes de Foucault. .	91
Figura 4.45	Modelo 3 - Densidade de perdas por histerese.	92
Figura 4.46	Modelo 4 - Densidade de perdas por histerese.	92

Lista de tabelas

Tabela 2.1	Aspectos relacionado a topologia de ímãs montados das máquinas RFPM	32
Tabela 2.2	Aspectos relacionado a topologia de ímãs embutidos das máquinas RFPM	32
Tabela 2.3	Aspectos relacionado a topologia de rotor e estator único das máquinas AFPM	32
Tabela 2.4	Aspectos relacionado a topologia Torus-NS das máquinas AFPM	32
Tabela 2.5	Aspectos relacionado a topologia Torus-NN das máquinas AFPM	33
Tabela 4.1	Modelo 1 - Parâmetros físicos de entrada do estator	54
Tabela 4.2	Modelo 1 - Parâmetros físicos de entrada do rotor	54
Tabela 4.3	Modelo 1 - Parâmetros de entrada da simulação	56
Tabela 4.4	Modelo 1 - Resultados da simulação de operação do motor	57
Tabela 4.5	Modelo 1 - Resultados de perdas da simulação de operação do motor . .	61
Tabela 4.6	Modelo 1 - Parâmetros físicos de entrada da carcaça	64
Tabela 4.7	Modelo 2 - Parâmetros físicos de entrada do estator	68
Tabela 4.8	Modelo 2 - Parâmetros físicos de entrada do rotor	69
Tabela 4.9	Modelo 2 - Parâmetros de entrada da simulação	70
Tabela 4.10	Modelo 2 - Resultados da simulação de operação do motor	70
Tabela 4.11	Modelo 2 - Resultados de perdas da simulação de operação do motor . .	75
Tabela 4.12	Modelos 3 e 4 - Parâmetros físicos de entrada do estator	83
Tabela 4.13	Modelos 3 e 4 - Parâmetros físicos de entrada do rotor	83
Tabela 4.14	Modelos 3 e 4 - Parâmetros de entrada da simulação idênticos ao Modelo 1	85
Tabela 4.15	Modelo 3 e 4 - Resultados da simulação de operação do motor	85
Tabela 4.16	Modelos 3 e 4 - Resultados de perdas da simulação de operação do motor	90

Lista de abreviaturas e siglas

AFPM	<i>Axial Flux Permanent Magnet</i>
DOF	<i>Degrees of freedom</i>
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
IPM	<i>Interior Permanent Magnet</i>
NdFeB	Neodímio-Ferro-Boro
NS	<i>Non-Slotted</i>
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous Motor</i>
RFPM	<i>Radial Flux Permanent Magnet</i>
S	<i>Slotted</i>
SmCo	Samário-Cobalto
SPM	<i>Surface-mounted Permanent Magnet</i>
UnB	Universidade de Brasília

Lista de símbolos

α	Ângulo mecânico
δ	Ângulo de torque
ε	Força eletromotriz
μ	Permeabilidade
τ	Torque induzido
τ_{AFPM}	Torque induzido nas máquinas de fluxo axial
τ_{cog}	Torque de <i>cogging</i>
τ_{RFPM}	Torque induzido nas máquinas de fluxo radial
ϕ	Fluxo magnético
B	Densidade do fluxo magnético
B_r	Fluxo magnético remanescente
E_A	Tensão interna do estator
ED	Ângulo elétrico
f	Frequência
H	Intensidade do campo magnético
H_c	Intensidade do campo coercitivo
I_A	Corrente de armadura
N	Número de espiras
n_s	Velocidade angular em rpm
P	Potência mecânica
p	Pares de polos magnéticos
P_{cobre}	Perdas no cobre
P_f	Perdas por correntes Foucault
P_h	Perdas por histerese
R_A	Resistência de armadura
V_ϕ	Tensão de fase
ω_r	Velocidade angular
X_s	Reatância síncrona

Sumário

1	Introdução	17
1.1	Prefácio	17
1.2	Objetivos	18
1.3	Estrutura e organização do trabalho	19
2	Fundamentação Teórica	20
2.1	Princípio da indução eletromagnética	20
2.1.1	Bobinas	21
2.1.2	Ímãs	23
2.2	Motores síncronos de ímãs permanentes (PMSM)	25
2.2.1	Estrutura física	25
2.2.2	Funcionamento	34
2.2.3	Perdas em operação	36
3	Metodologia	40
3.1	Método dos elementos finitos (FEM) e análise do elementos finitos (FEA)	40
3.1.1	Elemento estrutural e sistema estrutural	41
3.1.2	Análise eletromagnética	42
3.2	Ansys Motor-CAD	44
3.3	Guia de utilização	44
3.4	Visualização de resultados	52
4	Simulações e resultados	53
4.1	Motor síncrono de fluxo radial com rotor interno de ímãs permanentes montados em superfícies - SPM	53
4.1.1	Resultados do modelo 1	57
4.1.2	Torque no modelo 1	58
4.1.3	Perdas no modelo 1	61
4.1.4	Temperatura no modelo 1	64
4.2	Motor síncrono de fluxo radial de ímãs permanentes embutidos em superfícies - IPM	68
4.2.1	Resultados do modelo 2	70
4.2.2	Torque no modelo 2	72
4.2.3	Perdas no modelo 2	75
4.2.4	Temperatura no modelo 2	78
4.3	Motores síncronos de fluxo axial: rotor e estator únicos; e dois rotores com magnetos NN e estator único do tipo S (Torus-S com magnetos NN) - AFPM	82

4.3.1	Resultados dos modelos 3 e 4	85
4.3.2	Torque nos modelos 3 e 4	88
4.3.3	Perdas nos modelo 3 e 4	90
4.3.4	Temperatura nos modelos 3 e 4	93
5	Conclusões	94
	Referências	95

1 Introdução

1.1 Prefácio

Em 2011, a Agência Internacional de Energia (AIE) publicou um extenso levantamento estatístico sobre o consumo de energia elétrica nos usos finais mais comuns. Estima-se que os motores elétricos sejam responsáveis por aproximadamente 53% do consumo mundial de energia elétrica, com destaque para o setor industrial, onde esses motores consomem cerca de 70% da energia elétrica utilizada. Todavia, em estabelecimentos comerciais, como escritórios e lojas, os motores elétricos representam apenas 40% do consumo de energia elétrica, sendo empregados principalmente em sistemas de refrigeração ([Filho, 2021](#)). Mais especificamente, em 2021, no Brasil, a WEG estimou que os motores elétricos trifásicos consumam aproximadamente 144 GWh por ano, o que corresponde a cerca de 23,24% do consumo total de energia elétrica no país ([WEG, 2021](#)).

Devido ao significativo consumo de energia pelos motores elétricos, iniciativas para melhorar sua eficiência sempre são avaliadas. A *International Electrotechnical Commission* (IEC) estabelece a classe de rendimentos de motores elétricos CA pela norma IEC 60034-30-1, de 2014, conforme segue: IE1 (rendimento padrão); IE2 (alto rendimento); IE3 (premium); IE4 (super premium) e IE5 (ultra premium). No Brasil a norma que estabelece as classes de eficiência energética em motores elétricos de indução é a ABNT NBR 17094-1 ([ABNT, 2018](#)), baseada na IEC 60034-30-1. Na legislação vigente no Brasil, o nível de eficiência mínimo exigido para a comercialização de motores elétricos é o IR3 (equivalente ao IE3 da norma internacional), os quais não podem ser fabricados ou importados desde agosto de 2019 ([Bender, 2022](#)).

As máquinas elétricas de ímãs permanentes são algumas das mais eficientes disponíveis no mercado e podem ser a solução de diversos sistemas ineficientes. Entretanto, os motores mais utilizados são os de indução e os de corrente contínua, pois são mais amplamente consolidados e estudados, o que dificulta a expansão das máquinas de ímãs permanentes. Vale ressaltar, a dificuldade de encontrar estudos e pesquisas que expressem com precisão a porcentagem de cada tipo de motor elétrico em uso.

Ainda assim, as máquinas de ímãs permanentes têm ganhado popularidade recentemente, especialmente em aplicações que demandam alta eficiência e compactação, como veículos elétricos e equipamentos industriais avançados. O mercado global desses motores está projetado para crescer significativamente, passando de US\$ 48,34 bilhões em 2024 para US\$ 77,71 bilhões até 2029, com uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 9,96% ([Company, 2022](#)). Ademais, destaca-se a importância do avanço na manipulação

das propriedades magnéticas dos materiais, especialmente para o desenvolvimento de ímãs permanentes.

Dessa maneira, o estudo aprofundado sobre motores síncronos de ímãs permanentes torna-se cada vez mais necessário. A evolução tecnológica trouxe novos materiais magnéticos, diversidade de topologias dos motores de ímãs permanentes, incluindo configurações radiais, axiais e transversais. Logo, o conhecimento detalhado de materiais, topologias e parâmetros técnicos é indispensável para o avanço dos motores síncronos de ímãs permanentes, permitindo o desenvolvimento de soluções mais eficientes, sustentáveis e adaptadas às necessidades contemporâneas da indústria elétrica e de transporte.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo principal demonstrar as diferenças entre as topologias de motores síncronos de ímãs permanentes através de simulações utilizando o *software* Ansys Motor-CAD. Nesse contexto, os objetivos são definidos abaixo:

- Detalhar as diversas topologias utilizadas nas máquinas elétricas de ímãs permanentes, além de compará-las com relação seus funcionamentos e aplicações. Além disso, conceituar as perdas de natureza elétrica, magnética e mecânica dessas máquinas. Em seguida, demonstrar um guia de utilização do Ansys Motor-CAD, visando a criação de trabalhos futuros e um melhor entendimento das simulações.
- Construção de diversos modelos de distintas topologias motores síncronos de ímãs permanentes no *software* Ansys Motor-CAD. Os modelos estão descritos a seguir.
 - Motor síncrono de fluxo radial com rotor interno e ímãs montados na superfície;
 - Motor síncrono de fluxo radial com rotor interno e ímãs embutidos simples;
 - Motor síncrono de ímãs permanentes de fluxo axial com rotor e estator únicos;
e
 - Motor síncrono de ímãs permanentes de fluxo axial com dois rotores e um estator único, Torus-S com magnetos NN.
- Analisar e comparar os resultados de cada modelo em diferentes situações, como materiais, parâmetros físicos e elétricos distintos, com ênfase nos valores de perdas, eficiência, temperatura e torque.

1.3 Estrutura e organização do trabalho

O presente trabalho está estruturado em 5 capítulos.

No Capítulo 1, apresenta-se uma introdução e contextualização das máquinas elétricas de ímãs permanentes que serão abordadas ao longo de todo o trabalho. Além disso, descrevem-se os objetivos de forma breve.

O Capítulo 2 expõe a fundamentação teórica necessária para compreender os assuntos abordados nas simulações, são eles a indução eletromagnética, ímãs, estrutura física e aplicações das máquinas elétricas de ímãs permanentes, distribuição de enrolamentos nas máquinas trifásicas, funcionamento e circuito equivalente das máquinas elétricas de ímãs permanentes, torque, rotação e perdas em operação. Nesse mesmo capítulo há também a descrição de diversas topologias utilizadas em máquinas elétricas de ímãs permanentes, especificamente as de fluxo axial e radial.

O Capítulo 3 abrange uma breve explicação sobre o método de elementos finitos (FEM), utilizado no Ansys Motor-CAD, e as equações de Maxwell essenciais para a análise de máquinas elétricas. Em seguida, descreve-se um passo a passo de como realizar uma simulação utilizando esse *software*, cujos detalhes não se encontram na internet, o que torna esse conteúdo de grande importância para novos usuários do programa.

O penúltimo capítulo do trabalho visa demonstrar as simulações e os modelos criados pelo autor, analisando e comparando os resultados em distintos cenários. A ordem dos modelos abordados é a seguinte: primeiro, um motor síncrono de fluxo radial com rotor interno e ímãs montados na superfície; em seguida, um motor síncrono de fluxo radial com rotor interno e ímãs embutidos simples; em terceiro, um motor síncrono de ímãs permanentes de fluxo axial com rotor e estator únicos; e, por fim, um motor síncrono de ímãs permanentes de fluxo axial com dois rotores e um estator único.

O trabalho é concluído no capítulo 5, onde são apresentadas as conclusões finais em relação ao que foi discutido e obtido neste estudo. Além disso, são sugeridas diferentes possibilidades para trabalhos futuros sobre máquinas síncronas de ímãs permanentes, como avaliação dos modelos estudados no capítulo anterior em operação como geradores síncronos, avaliação da implementação deles na eletrificação de veículos, entre outros.

2 Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais para o entendimento do funcionamento de máquinas elétricas, abordando os princípios da conversão eletromagnética de energia e os principais aspectos que regem o comportamento desses dispositivos. Serão exploradas as grandezas elétricas e magnéticas envolvidas, como fluxo magnético, densidade de fluxo, força magnetomotriz e circuitos magnéticos, bem como as equações fundamentais que descrevem o desempenho dessas máquinas. Além disso, será dada ênfase às máquinas elétricas de ímãs permanentes, destacando suas características físicas, topologias mais utilizadas e o impacto das propriedades dos materiais magnéticos no desempenho dessas estruturas. Serão discutidos os principais parâmetros de projeto, como a disposição dos ímãs, as configurações do estator e rotor, e as vantagens e desafios associados à utilização desse tipo de tecnologia. Esse embasamento teórico é essencial para a compreensão das análises e simulações conduzidas nos capítulos seguintes, permitindo uma visão detalhada do comportamento eletromagnético e térmico das máquinas elétricas de ímãs permanentes.

2.1 Princípio da indução eletromagnética

A indução eletromagnética é o princípio fundamental que explica como as máquinas elétricas, motores e geradores, convertem energia elétrica em mecânica e vice-versa. Esse fenômeno é descrito pela Lei de Faraday da Indução Eletromagnética, que estabelece que uma força eletromotriz é induzida em um circuito quando há uma variação do fluxo magnético ao longo do tempo, conforme equação 2.1. A indução eletromagnética ocorre em condutores (bobinas) que se movem dentro de um campo magnético ou quando o campo magnético varia ao redor de condutores estacionários.

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

Na equação 2.1, ε é a força eletromotriz, em volts (V), e $\frac{d\phi}{dt}$ representa a taxa de variação do fluxo magnético, em Weber por segundo (Wb/s). O sinal negativo está em conformidade com a Lei de Lenz, que estabelece que o sentido da corrente induzida em um condutor, como uma bobina, será sempre tal que o campo magnético resultante se opõe à variação que o originou. Dessa forma, ao aproximar um ímã de uma bobina, a corrente gerada pela indução cria um campo magnético que tenta resistir ao movimento, seja atraindo ou repelindo o ímã.

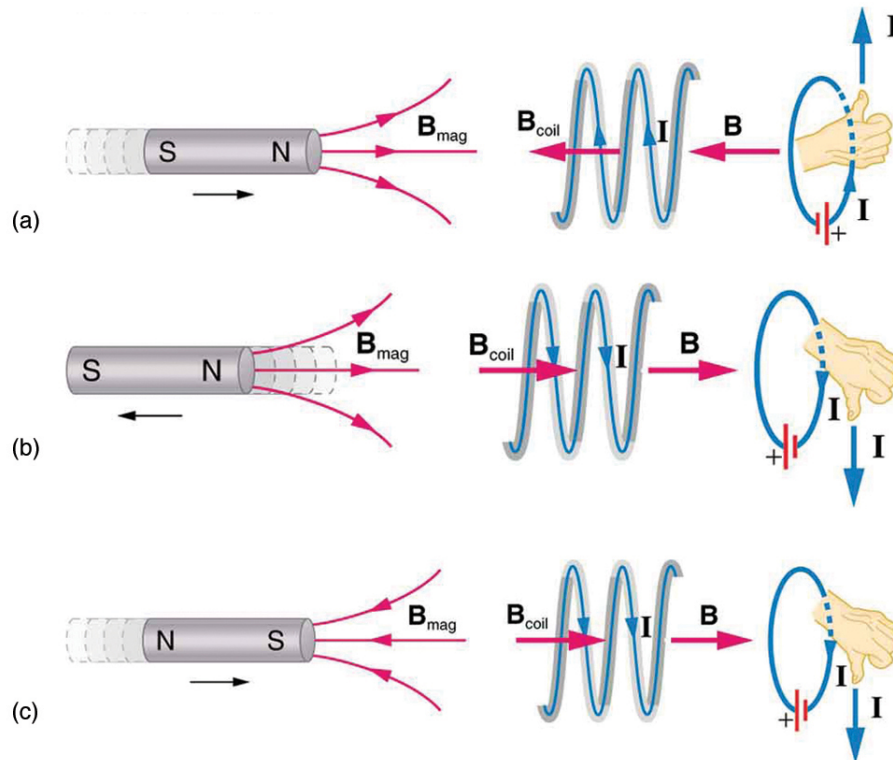
A partir da definição das duas leis citadas nessa seção, a interação entre uma bobina energizada e um ímã, resume-se em:

- **Atração:** Se o polo norte do ímã estiver próximo da extremidade da bobina que gera um polo sul (de acordo com a corrente), haverá uma atração entre o ímã e a bobina, pois polos opostos se atraem.
- **Repulsão:** Se o polo norte do ímã estiver próximo da extremidade da bobina que também atua como polo norte, ocorrerá uma repulsão, já que polos iguais se repelem.

2.1.1 Bobinas

Presentes em todas as máquinas elétricas, usadas para gerar e ou reagir a campos magnéticos, são formadas por várias espiras de fios condutores enroladas. Quando uma fonte de tensão alimenta uma bobina, uma corrente elétrica I passará por ela, dessa maneira um campo magnético B circulará ao redor das espiras (motor). Já para uma situação em que o campo magnético B é gerado em torno da bobina por outro componente, uma corrente elétrica I será induzida nessa bobina sem a necessidade de uma fonte de alimentação (gerador). O sentido do campo magnético pode ser determinado pela regra da mão direita: ao enrolar os dedos da mão direita no sentido da corrente nas espiras, o polegar apontará na direção do campo magnético dentro da bobina.

Figura 2.1 – Três diferentes situações de interação de um ímã e uma bobina energizada.



Fonte: (Lenz, 2013)

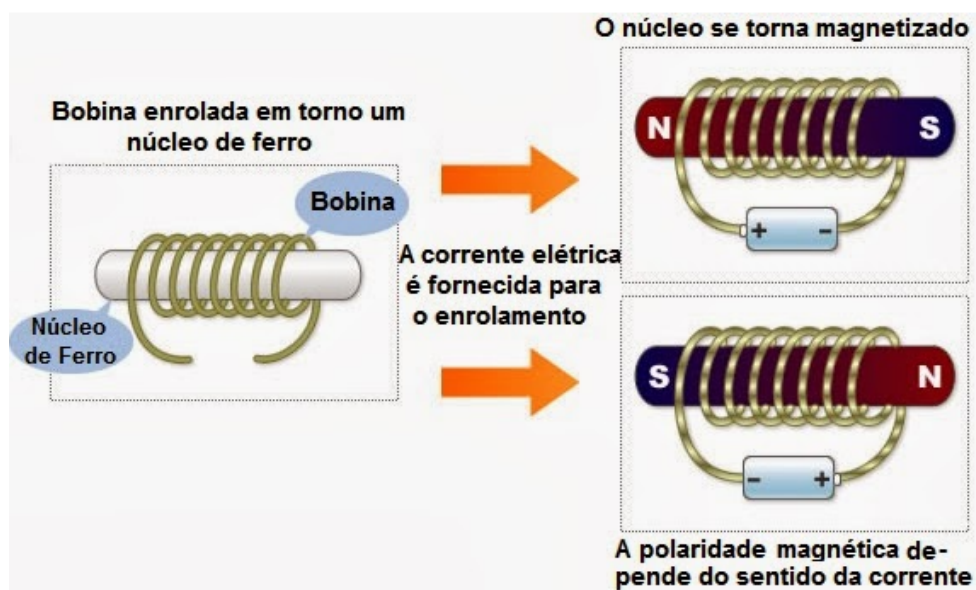
A figura 2.1 exemplifica três diferentes situações. Em (a), um ímã aproxima-se rapidamente da bobina com o campo magnético em direção a ela; porém, como explicado

anteriormente, a reação do campo magnético na bobina será contrária, de maneira a opor-se ao fluxo magnético do ímã. Dessa forma, uma corrente é induzida nessa bobina no mesmo sentido horizontal de seu campo magnético (da direita para a esquerda). Na situação (b), temos o mesmo ímã, porém, dessa vez, afastando-se rapidamente da bobina; logo, a reação do fluxo magnético na bobina será de sentido contrário a esse movimento, e sua corrente induzida terá um novo sentido (da esquerda para a direita). Por fim, a situação (c) repete o ímã se aproximando rapidamente da bobina, entretanto, dessa vez, com polarização diferente, ou seja, agora se aproximando com o polo sul, o qual atrai o fluxo magnético. A reação da bobina, mais uma vez, será contrária, de acordo com a Lei de Lenz, e seu campo magnético terá outro sentido, de maneira a se opor ao ímã, provocando assim uma corrente no mesmo sentido horizontal de seu campo magnético (da esquerda para a direita).

O fluxo magnético ϕ tende a se concentrar no núcleo da bobina, especialmente quando esta envolve um material ferromagnético, como o ferro. Dentro do núcleo, o fluxo é mais intenso devido à alta permeabilidade magnética desse material, que facilita a condução das linhas de fluxo.

Essa distribuição do fluxo pode ser observada na figura 2.2.

Figura 2.2 – Exemplo de eletroímã de núcleo ferromagnético.



Fonte: (Lenz, 2013)

O fluxo magnético em Weber (Wb) total de uma bobina é visto a seguir.

$$\phi = N \cdot B \cdot A \quad (2.2)$$

Na equação 2.2, N é o número de espiras, B é a densidade do fluxo magnético dada em Tesla (T) e A é a área da seção transversal da bobina em m^2 .

2.1.2 Ímãs

Os ímãs são definidos como corpos capazes de gerar um campo magnético ao seu redor, resultante do movimento ordenado dos elétrons em sua estrutura atômica. O campo magnético de um ímã apresenta-se na forma de linhas de fluxo magnético, que partem do polo norte e retornam ao polo sul. Essas linhas são mais densas perto dos polos e se dispersam conforme se afastam do ímã. A intensidade do campo é mais forte nas proximidades dos polos e diminui à medida que a distância em relação ao ímã aumenta.

Existem vários tipos de ímãs: naturais e artificiais (permanentes, temporários e eletroímãs). Os eletroímãs, como visto na figura 2.2, possuem essa propriedade magnética enquanto estão envoltos por uma bobina energizada por uma corrente elétrica; já os ímãs permanentes são objetos que mantêm suas propriedades magnéticas de forma duradoura, mesmo na ausência de um campo magnético externo. Para produzir esses ímãs, um processo específico é necessário para alinhar os domínios magnéticos dentro do material, iniciando-se pela escolha do material ferromagnético, sendo os mais comuns:

- **Neodímio-Ferro-Boro(NdFeB):** É um composto de neodímio, ferro e boro. Resulta em ímãs muito fortes, sendo amplamente utilizado em tecnologias modernas, como motores elétricos de alta eficiência, que serão alvo desse estudo.
- **Samário-Cobalto (SmCo):** Um ímã resistente à corrosão e a altas temperaturas, mais estável que o neodímio.
- **Alnico:** Composto de alumínio, níquel e cobalto, apresenta boa resistência à desmagnetização e é usado em dispositivos de medição.
- **Ferrite (óxido de ferro):** Barato e amplamente disponível, usado em aplicações de baixo custo.

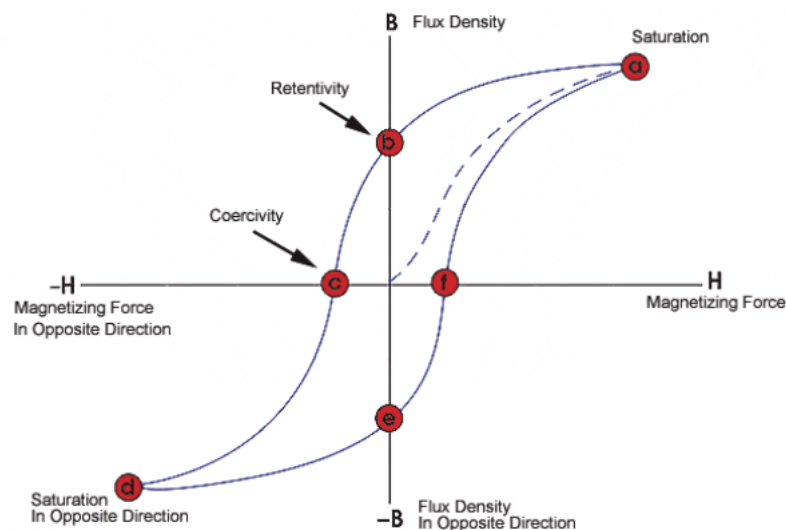
Depois que o material é escolhido, moldado e solidificado, ele passa por um processo de magnetização. Aplica-se um campo magnético muito forte ao objeto, reorganizando seus átomos e alinhando os domínios magnéticos internos em uma direção comum. Isso cria os polos norte e sul permanentes no objeto, tornando-o um ímã permanente. Atualmente, a maneira utilizada para gerar esse campo é por meio de uma corrente elétrica intensa em uma bobina que envolve o material, acionada por uma descarga elétrica gerada por um banco de capacitores carregados. Máquinas com essa funcionalidade são chamadas de magnetizadoras.

2.1.2.1 Curva B-H

Também chamada de ciclo de histerese magnética ou curva de magnetização, essa curva representa a relação entre a densidade de fluxo magnético (B) e a intensidade do campo magnético (H) em materiais ferromagnéticos. Um exemplo pode ser observado na figura 2.3.

Os principais pontos dessa curva são: (a) saturação, (b) remanência e (c) coercitividade. No ponto (a), mesmo com o aumento de H , B não cresce mais significativamente, ou seja, o material está saturado. No ponto (b), quando $H = 0$ após uma prévia magnetização, o material retém um fluxo magnético remanescente B_r . Já no ponto (c), para desmagnetizar completamente o material ($B = 0$), é necessário aplicar um campo reverso H_c .

Figura 2.3 – Curva $B - H$ ou curva de magnetização.



Fonte: (University, 2015)

2.2 Motores síncronos de ímãs permanentes (PMSM)

Os motores elétricos são um dos três grandes grupos de máquinas elétricas, esse grupo têm como função transformar energia elétrica em energia mecânica.

Um motor síncrono literalmente opera “em tempo com” ou “em sincronismo com” o sistema de alimentação (WEG, 2010). Ou seja, a velocidade de rotação está diretamente ligada à frequência da fonte de corrente alternada desse motor, pois o campo magnético gerado pelos ímãs permanentes é fixo, e sua repulsão ou atração depende necessariamente do campo magnético gerado pelas bobinas do estator. Assim, o rotor, onde estão presentes os ímãs permanentes de campo magnético fixo, gira em conformidade com o campo magnético criado no estator.

2.2.1 Estrutura física

Seus principais componentes são:

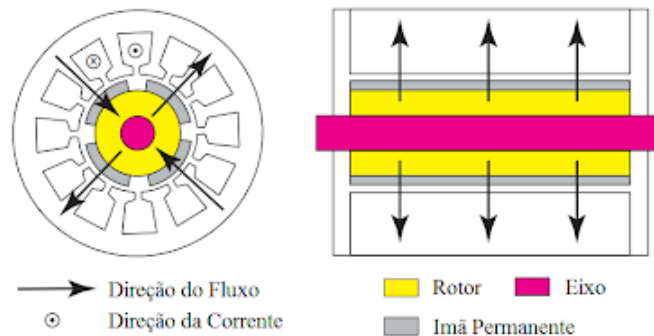
- **Estator:** A parte fixa do motor, onde se localizam as bobinas ou enrolamentos. O estator é geralmente feito de laminados de aço para minimizar as perdas por correntes parasitas, e nele ocorre a criação de um campo magnético rotativo quando a corrente elétrica alternada passa pelos enrolamentos.
- **Rotor:** É a parte móvel do motor e contém os ímãs permanentes. Esses ímãs podem ser montados na superfície (rotor de ímãs superficiais) ou embutidos (rotor de ímãs embutidos), influenciando o desempenho e as características de torque do motor. O campo magnético gerado pelos ímãs interage com o campo gerado pelo estator, resultando no movimento rotacional do rotor.
- **Ímãs permanentes:** Como citado na seção anterior, eles são geralmente feitos de materiais com alta densidade magnética, como Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB) ou Samário-Cobalto (SmCo). Esses ímãs geram o campo magnético sem a necessidade de corrente elétrica, o que aumenta a eficiência do motor.
- **Eixo:** Conecta o rotor à carga externa, transmitindo a energia mecânica gerada pelo motor.
- **Carcaça:** Protege os componentes internos do motor contra danos externos e também auxilia na dissipação de calor gerado durante a operação. A carcaça é projetada para suportar o ambiente operacional.

Os motores síncronos de ímãs permanentes podem ser subclassificados de acordo com sua estrutura construtiva e o fluxo eletromagnético de sua operação: motores de ímãs permanentes de fluxo radial, fluxo axial e fluxo transversal.

2.2.1.1 Motores síncronos de ímãs permanentes de fluxo radial (RFPM, do inglês *Radial Flux Permanent Magnet*)

Esses são os motores de ímãs permanentes mais utilizados, caracterizados pelo fluxo eletromagnético resultante na direção radial, devido à construção de seu rotor, estator e à disposição de seus ímãs, conforme ilustrado na figura 2.4.

Figura 2.4 – Motor síncrono de ímãs permanentes de fluxo radial de rotor interno



Fonte: (Lenz, 2013)

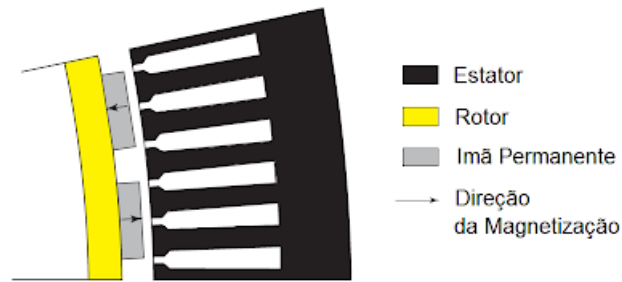
Dentre as principais estruturas de montagem dos motores de fluxo radial estão as topologias:

2.2.1.1.1 Máquina com rotor interno ou externo de ímãs permanentes montados em superfície

Conhecidas como SPM (*Surface-mounted Permanent Magnet*), essas são as máquinas de ímãs permanentes mais utilizadas no mundo. Esse tipo possui uma construção simples, pois utiliza ímãs permanentes fixados diretamente na superfície do rotor, o que resulta em menor custo de produção. Todavia, seus ímãs estão mais suscetíveis à desmagnetização e a danos por estarem expostos no rotor.

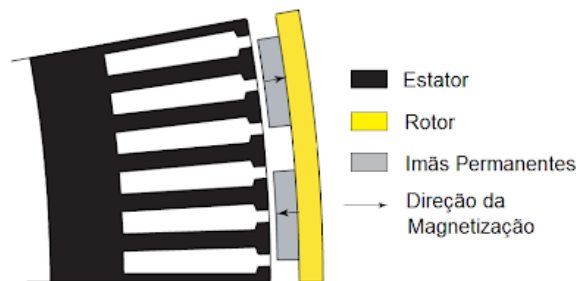
As máquinas que apresentam rotor interno, ou seja, aquelas cujo estator envolve a parte rotativa, representada na figura 2.5, são amplamente utilizadas em embarcações e até mesmo em usinas eólicas que adotam o princípio *direct-drive*, no qual a turbina está diretamente acoplada ao rotor da máquina, eliminando a necessidade de uma caixa de transmissão. Portanto, as máquinas que apresentam rotor externo, com o estator estacionário envolto pelo rotor, possuem um diâmetro de rotor maior e, conseqüentemente, oferecem mais espaço para polos magnéticos de maior dimensão ou para o aumento da quantidade de polos; verifica-se um exemplo na figura 2.6.

Figura 2.5 – Máquina com rotor interno de ímãs permanentes montados em superfície



Fonte: (Lenz, 2013)

Figura 2.6 – Máquina com rotor externo de ímãs permanentes montados em superfície

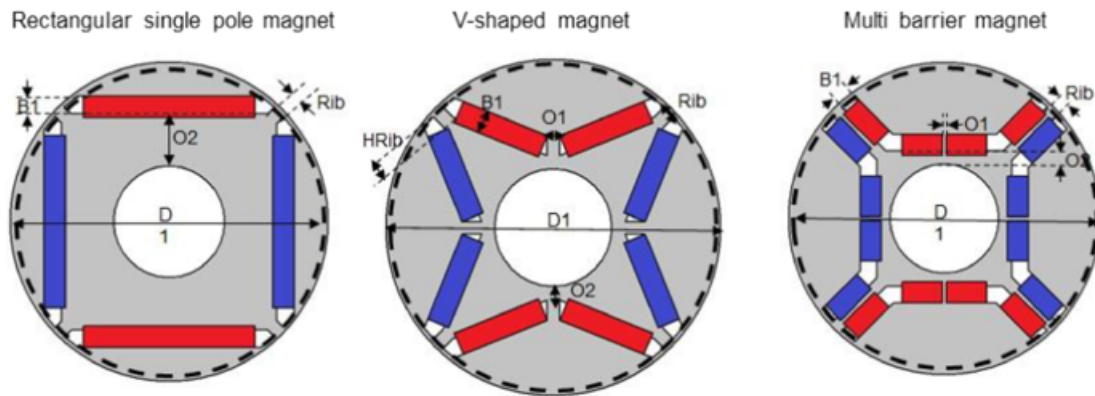


Fonte: (Lenz, 2013)

2.2.1.1.2 Máquina com rotor interno de ímãs permanentes embutidos

As máquinas elétricas com ímãs embutidos, também conhecidas como IPM (*Interior Permanent Magnet*), diferenciam-se das máquinas com ímãs montados por apresentarem sua configuração caracterizada pelos ímãs permanentes posicionados dentro do rotor. Essa estrutura é amplamente utilizada em motores de veículos elétricos, devido às suas vantagens em termos de resistência mecânica, controle do fluxo magnético e eficiência em velocidades variáveis. Ademais, o posicionamento dos ímãs dentro do rotor permite diferentes formas de disposição, como em “V”, “camadas”, entre outras. A figura 2.7 ilustra alguns desses exemplos.

Figura 2.7 – Três estruturas distintas de rotores com ímãs permanentes embutidos

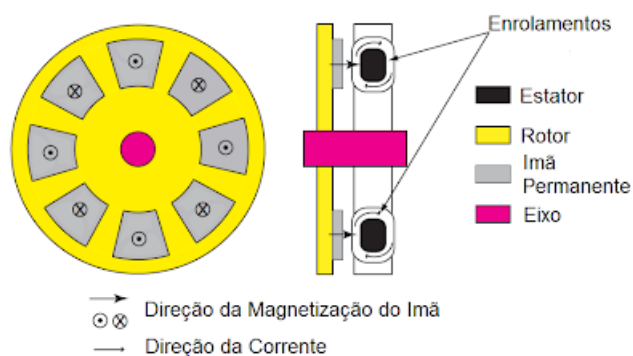


Fonte: (Demir, 2022)

2.2.1.2 Motores síncronos de ímãs permanentes de fluxo axial (AFPM, do inglês *Axial Flux Permanent Magnet*)

Diferentemente das máquinas elétricas de fluxo radial, nas quais o fluxo magnético é orientado de maneira perpendicular ao eixo, os motores de ímãs permanentes de fluxo axial apresentam o fluxo magnético, gerado pelos ímãs do rotor, percorrendo o comprimento do motor na direção axial, ou seja, paralelamente ao eixo de rotação, conforme ilustrado na figura 2.8. Devido à sua construção mais simples e à facilidade de resfriamento, essas máquinas são particularmente úteis em sistemas de mobilidade elétrica e em aplicações industriais onde a eficiência é essencial e o espaço é limitado.

Figura 2.8 – Máquina elétrica de ímãs permanentes de fluxo axial



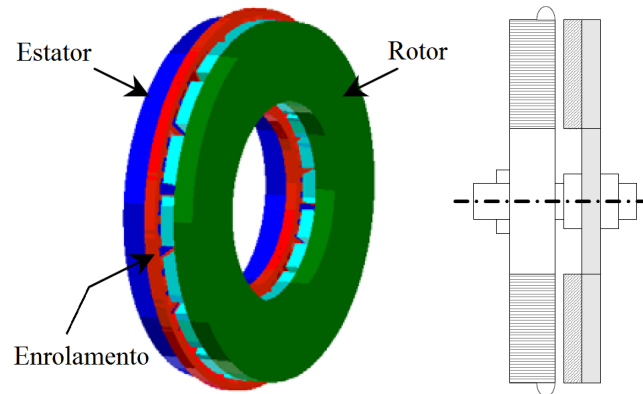
Fonte: (Lenz, 2013)

Para que esse fluxo axial resultante seja obtido, é necessária uma estrutura um pouco diferente do padrão de motores elétricos. Agora, o rotor não estará envolto pelo estator, nem vice-versa, mas sim dispostos em paralelo, podendo até mesmo apresentar mais de um rotor ou estator.

2.2.1.2.1 Máquina de fluxo axial com rotor e estator único

As máquinas de fluxo axial com rotor e estator únicos proporcionam um equilíbrio adequado entre simplicidade, densidade de torque e eficiência, sendo ideais para aplicações que exigem uma estrutura compacta e leve, figura 2.9.

Figura 2.9 – Máquina elétrica de ímãs permanentes de fluxo axial com um único estator e um único rotor



Fonte: (Lenz, 2013)

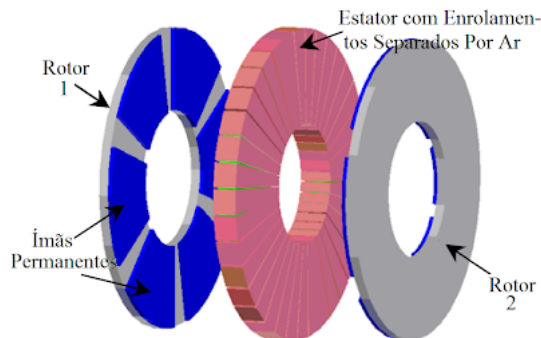
2.2.1.2.2 Máquina de fluxo axial Torus (ou Taurus)

Essa topologia é caracterizada pela presença de dois rotores externos e um estator central, proporcionando um fluxo magnético otimizado comparado aos de fluxo radial e permitindo uma operação eficiente em um design mais leve, devido a menor quantidade de material, e de alta potência. Apesar de sua complexidade e do custo de fabricação, devido à necessidade de um maior número de ímãs permanentes, as vantagens proporcionadas tornam a máquina Torus uma escolha amplamente adotada em drones, sistemas aeroespaciais e outras aplicações de alto desempenho. Também tem sido muito estudado para aplicação em veículos terrestres principalmente carros de alta performance, um exemplo é a Mercedes-Benz que tem feito parcerias com a fabricante de AFPMs YASA.

Além dessas características, as máquinas Torus apresentam duas classificações distintas relacionadas ao estator:

A Torus-NS (não ranhurada, do inglês *Non-Slotted*) é caracterizada por um estator liso, ou seja, sem a presença de ranhuras, pode ser visualizada na figura 2.10. Dessa forma, os enrolamentos estão diretamente inseridos no estator, sem a presença de dentes, e separados por um pequeno espaço de ar ou por resina epóxi, a fim de aumentar a robustez e proporcionar uma dissipação térmica mais eficiente, conforme indicado em (Lenz, 2013). A ausência de dentes no estator torna essa máquina adequada para rotação suave e baixos níveis de ruído, pois não sofrerá influência do torque de *cogging*, explicado posteriormente na seção 2.2.3.4.

Figura 2.10 – Máquina elétrica de ímãs permanentes de fluxo axial Torus-NS

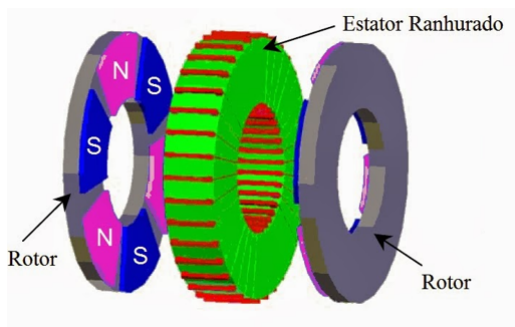


Fonte: (Lenz, 2013)

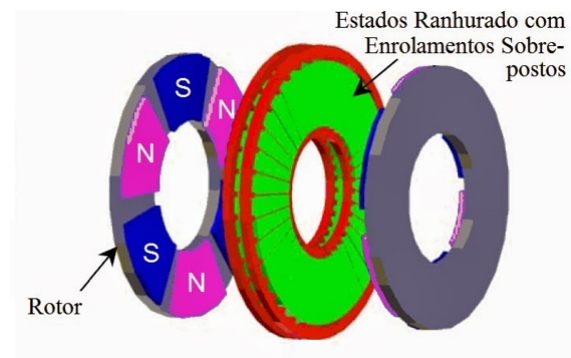
A Torus-S (ranhurada, do inglês *Slotted*) é caracterizada por um estator padrão, que possui ranhuras e, por ser um estator central, apresenta dentes projetados em direção a ambos os rotores, conforme as figuras 2.11a e 2.11b. Devido à sua maior densidade de torque e energia, é utilizada em uma variedade maior de aplicações do que a topologia Torus-NS.

Figura 2.11 – Máquinas elétricas de ímãs permanentes de fluxo axial Torus-S.

(a) Magnetos tipo NN.



(b) Magnetos tipo NS.



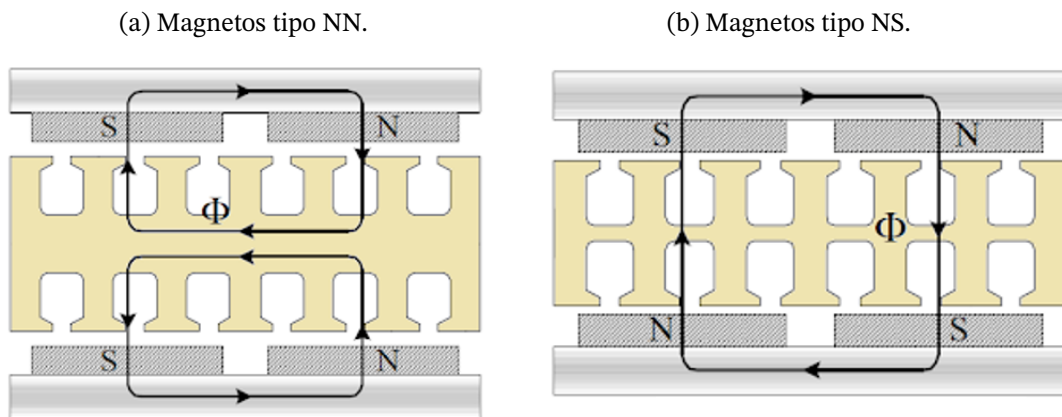
Fonte: Adaptado de (Lenz, 2013)

Conforme ilustrado na figura 2.11, as máquinas Torus-S apresentam duas classificações adicionais: Tipo NN e Tipo NS. Essa classificação está relacionada à orientação dos polos magnéticos dos ímãs montados nos rotores em relação ao estator e ao fluxo magnético gerado.

Nos rotores de uma máquina Torus-S do tipo NN (Norte-Norte), os ímãs em ambos os rotores possuem polos do mesmo tipo voltados para o estator (por exemplo, ambos com o polo norte ou ambos com o polo sul direcionados ao estator). O fluxo magnético gerado por essa configuração não atravessa diretamente o estator, mas forma um caminho de fluxo ao redor dos ímãs, conforme ilustrado na figura 2.12a. A presença de polos iguais voltados para o estator contribui para uma operação com menor *ripple* de torque, proporcionando um funcionamento mais suave e com vibrações reduzidas.

Para as máquinas Torus-S do tipo NS (Norte-Sul), os polos magnéticos nos rotores são orientados de maneira oposta: um rotor possui o polo norte direcionado ao estator, enquanto o outro apresenta o polo sul voltado para o estator, conforme ilustrado na figura 2.12b. Nessa configuração, o fluxo magnético é conduzido diretamente através do estator, formando um caminho magnético do polo norte para o polo sul entre os dois rotores.

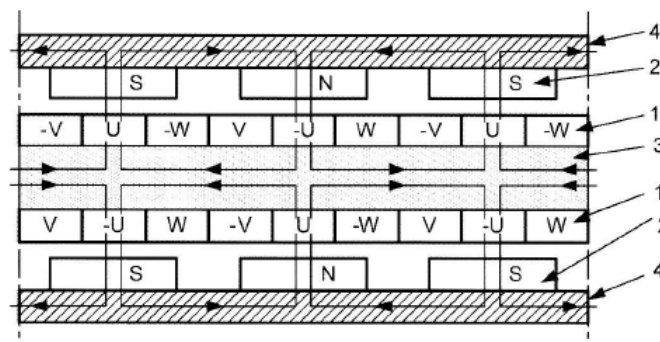
Figura 2.12 – seção de par de polos de máquina elétrica de ímãs permanentes de fluxo axial Torus-S.



Fonte: Adaptado de (Lenz, 2013)

Por fim, essa classificação também se aplica à Torus-NS; entretanto, seu funcionamento só é viável com magnetos NN, pois a ausência de ranhuras no estator exige a utilização de enrolamentos concentrados. Dessa forma, o campo magnético resultante em um lado do estator será espelhado no outro lado, uma vez que a corrente terá sentidos opostos, conforme demonstrado na figura 2.13.

Figura 2.13 – seção de par de polos de uma máquina elétrica de ímãs permanentes Torus-NS do tipo NN. 1-Enrolamentos, 2-Ímã permanente, 3-Estator e 4-Rotor.



Fonte: (Gieras; Wang; Kamper, 2004)

Resumindo as topologias citadas nessa seção 2.2, temos as seguintes tabelas:

Tabela 2.1 – Aspectos relacionado a topologia de ímãs montados das máquinas RFPM

Aspecto	Máquinas elétricas de ímãs permanentes de fluxo radial (RFPM)
Topologia	Ímãs montados (SPM)
Variações	Rotor interno ou externo.
Campo magnético e distribuição	Fluxo magnético concentrado na superfície do rotor.
Vantagens	Design simples, fabricação mais barata, bom torque em baixa velocidade.
Desvantagens	Menor resistência a forças centrífugas, menor eficiência em altas velocidades.
Aplicações comuns	Motores de eletrodomésticos e ventiladores industriais, aplicações de baixo custo.

Fonte: Autor, 2025

Tabela 2.2 – Aspectos relacionado a topologia de ímãs embutidos das máquinas RFPM

Aspecto	Máquinas elétricas de ímãs permanentes de fluxo radial (RFPM)
Topologia	Ímãs embutidos (IPM)
Variações	Ímãs em posições retangulares, em “V” e “camadas”.
Campo magnético e distribuição	Fluxo magnético distribuído e melhor controle de relutância, ideal para altas velocidades.
Vantagens	Maior resistência mecânica e eficiência em uma faixa ampla de velocidades.
Desvantagens	Design mais complexo e custo de fabricação mais alto.
Aplicações comuns	Veículos elétricos e pequenas turbinas eólicas, aplicações de alta performance.

Fonte: Autor, 2025

Tabela 2.3 – Aspectos relacionado a topologia de rotor e estator único das máquinas AFPM

Aspecto	Máquinas elétricas de ímãs permanentes de fluxo axial (AFPM)
Topologia	Rotor e estator único
Variações	Não possui variações devido à simplicidade estrutural.
Campo magnético e distribuição	Campo magnético uniforme em direção axial, com fluxo magnético direcionado de forma linear.
Vantagens	Design mais simples, menor peso e não há torque de <i>cogging</i> .
Desvantagens	Limitações de densidade de torque e eficiência em comparação com configurações mais avançadas.
Aplicações comuns	Aplicações de baixa potência onde simplicidade e leveza são prioridades.

Fonte: Autor, 2025

Tabela 2.4 – Aspectos relacionado a topologia Torus-NS das máquinas AFPM

Aspecto	Máquinas elétricas de ímãs permanentes de fluxo axial (AFPM)
Topologia	Torus-NS
Variações	Magnetos NN apenas.
Campo magnético e distribuição	Fluxo magnético passa entre os dois rotores e o estator central.
Vantagens	Maior torque em comparação com o rotor único e não há torque de <i>cogging</i> .
Desvantagens	Estrutura mais complexa e de alto custo.
Aplicações comuns	Veículos elétricos de alta potência e aplicações aeronáuticas.

Fonte: Autor, 2025

Tabela 2.5 – Aspectos relacionado a topologia Torus-NN das máquinas AFPM

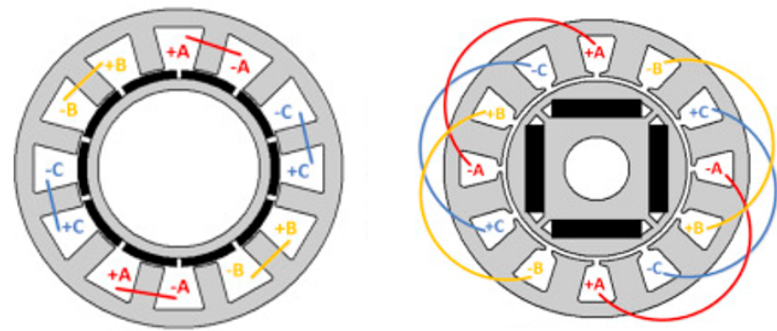
Aspecto	Máquinas elétricas de ímãs permanentes de fluxo axial (AFPM)
Topologia	Torus-S
Variações	Magnetos NN e NS.
Campo magnético e distribuição	Fluxo magnético distribuído entre os dois rotores e o estator central, dependendo da variação.
Vantagens	Alta densidade de torque e melhor controle de fluxo magnético.
Desvantagens	Estrutura mais complexa de alto custo e rotação menos suave.
Aplicações comuns	Equipamentos industriais de alta potência e veículos elétricos.

Fonte: Autor, 2025

Vale ressaltar que os enrolamentos no estator podem ser dispostos de duas maneiras em quase todas as máquinas elétricas trifásicas de ímãs permanentes. Os enrolamentos concentrados (*solenoides*), representados na figura 2.14a, são aqueles em que os enrolamentos de cada fase estão isolados uns dos outros e concentrados ao redor de polos individuais, conhecidos como polos salientes. Por outro lado, nos enrolamentos distribuídos, representados na figura 2.14b, cada fase se sobrepõe. Nessa configuração, o estator passa a possuir dentes que se projetam em direção aos ímãs no rotor, a partir do anel externo de aço do estator, chamado de *yoke*. Entre os dentes, há ranhuras ocupadas pelos enrolamentos. Cada enrolamento percorre uma ranhura, passando por um número de dentes, e depois desce pela ranhura seguinte (Hanselman, 2011).

Figura 2.14 – Máquinas de ímãs permanentes com diferentes disposições de enrolamentos

(a) Enrolamentos concentrados (b) Enrolamentos distribuídos

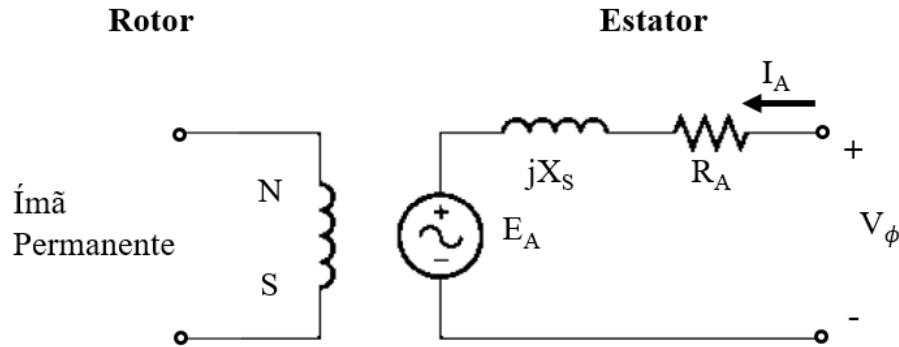


Fonte: Adaptado de (Yilmaz, 2015)

2.2.2 Funcionamento

O circuito equivalente por fase de um motor síncrono de ímãs permanentes pode ser observado na figura 2.15 a seguir:

Figura 2.15 – Circuito equivalente de um motor síncrono de ímãs permanentes



Fonte: Autor, 2025

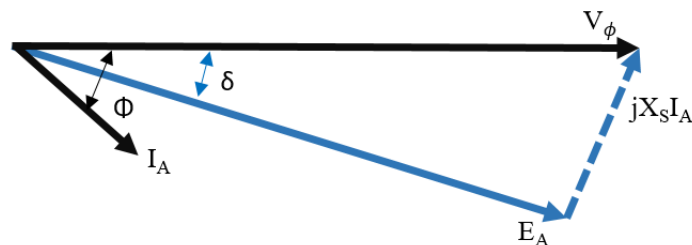
$$V_\phi = E_A + jX_s \cdot I_A + R_A \cdot I_A \quad (2.3)$$

ou

$$E_A = V_\phi - jX_s \cdot I_A - R_A \cdot I_A \quad (2.4)$$

V_ϕ é a tensão de fase proveniente da fonte de alimentação, E_A é a força eletromotriz interna do estator, X_s é a reatância síncrona no estator e, por fim, R_A e I_A são, respectivamente, a resistência e a corrente de armadura. Para melhor compreensão, deve-se observar o diagrama fasorial dos componentes citados, supondo um motor síncrono em operação:

Figura 2.16 – Diagrama fasorial de um motor síncrono com carga



Fonte: Autor, 2025

Desconsiderando as perdas no cobre do estator, a potência mecânica, em watts (W), exigida por um motor operando com carga pode ser calculada pela equação 2.5.

$$P = \frac{3E_A V_\phi}{X_s} \sin \delta \quad (2.5)$$

A equação 2.5 mostra que a potência mecânica dos motores síncronos cresce de maneira proporcional ao ângulo de torque δ (ou ângulo de carga), e será máxima para $\delta = 90^\circ$. Esse ângulo é a defasagem entre a tensão interna (E_A) e a tensão de fase da fonte de alimentação (V_ϕ), conforme ilustrado na figura 2.16. No que diz respeito ao torque, este é diretamente proporcional à potência mecânica, uma vez que a velocidade do rotor é fixa. O torque pode ser obtido a partir da equação 2.6.

$$\tau = \frac{60 \cdot P}{2\pi \cdot n_s} \quad (2.6)$$

Apesar da equação 2.6 ser aplicável a todas as máquinas síncronas de ímãs permanentes, independentemente de sua topologia, a potência mecânica de saída apresenta uma relação distinta com o diâmetro externo do rotor quando comparadas as máquinas de fluxo radial e de fluxo axial. Conforme indicado em (Hanselman, 2011), o torque de um motor síncrono de fluxo radial pode ser expresso da seguinte forma:

$$\tau_{RFPM} = k \cdot D^2 \cdot L \quad (2.7)$$

onde o coeficiente k é uma constante associada às características físicas da máquina, D é o diâmetro externo do rotor e L é o comprimento axial do eixo.

Para as máquinas de fluxo axial, tem-se:

$$\tau_{AFPM} \propto D^3 \quad (2.8)$$

Observa-se que a capacidade de torque da máquina de fluxo axial com ímãs permanentes (AFPM) escala com o cubo do diâmetro do rotor, o qual geralmente possui o mesmo tamanho do diâmetro do estator, conforme a equação 2.8. Por outro lado, o torque das máquinas de fluxo radial com ímãs permanentes (RFPM) escala com o quadrado do diâmetro do rotor, que será menor que o diâmetro do estator no caso de máquinas com rotor interno, verifica-se comparando as figuras 2.5 e 2.6, multiplicado pelo comprimento, conforme a equação 2.7. Dessa forma, os benefícios associados às geometrias de fluxo axial podem ser reduzidos à medida que o nível de potência ou a razão geométrica entre o comprimento e o diâmetro do motor aumenta (Gieras; Wang; Kamper, 2004).

2.2.2.1 Rotação

A rotação desses motores pode ser facilmente calculada por meio da seguinte fórmula:

$$n_s = 60 \cdot \frac{f}{p} \quad (2.9)$$

onde n_s é o número de rotações por minuto, f é a frequência em hertz (Hz) da fonte de alimentação do motor e p é o número de pares de polos presentes no rotor.

Para a obtenção da velocidade angular do rotor, ω_r , em radianos por segundo, tem-se:

$$\omega_r = 2\pi \cdot \frac{f}{p} \quad (2.10)$$

A relação entre torque mecânico e torque elétrico é facilmente encontrada a partir da equação 2.11, onde ED é o angulo elétrico e α é o ângulo mecânico (Wildi, 2002).

$$ED = p\alpha \quad (2.11)$$

2.2.3 Perdas em operação

As perdas em máquinas elétricas correspondem à dissipação de energia durante o processo de conversão eletromecânica, impactando diretamente sua eficiência. Essas perdas podem ser categorizadas de acordo com sua origem física e os mecanismos envolvidos. São elas as perdas ôhmicas, magnéticas, mecânicas e adicionais (ou estranhas).

2.2.3.1 Perdas ôhmicas (perdas no cobre ou por efeito Joule)

O principal condutor elétrico utilizado em máquinas elétricas é o cobre; dessa forma, as perdas ôhmicas mais relevantes são denominadas “perdas no cobre” quando se trata de máquinas elétricas. Diferentemente dos motores de indução e de corrente contínua, os motores de ímãs permanentes não possuem enrolamentos no rotor, ou seja, não há perdas em enrolamentos de cobre nessa região. Todavia, a presença de enrolamentos no estator ainda é necessária, o que acarreta perdas ôhmicas decorrentes da resistência dos condutores que transportam corrente elétrica.

Essas perdas resultam na conversão de energia elétrica em calor, reduzindo a eficiência do sistema. Dessa maneira, qualquer condutor elétrico apresentará perdas de energia elétrica na forma de calor, independentemente de ser composto por cobre ou outro material condutor. As perdas no cobre seguem a Lei de Joule, que estabelece que a potência dissipada em um condutor é dada por:

$$P_{cobre} = I^2 \cdot R \quad (2.12)$$

onde I representa a corrente elétrica, em amperes (A), que percorre o condutor, e R é a sua resistência elétrica, em ohms (Ω).

Em todos os motores elétricos, essa perda costuma ser a de maior magnitude, o que confere uma vantagem significativa às máquinas de ímãs permanentes no que se refere à eficiência. Isso ocorre porque essas máquinas tendem a apresentar menores perdas, uma vez que não possuem enrolamentos ou gaiola de esquilo no rotor.

2.2.3.2 Perdas por histerese e correntes de Foucault (correntes parasitas ou *eddy currents*)

No contexto dos motores de ímãs permanentes, essas duas perdas são classificadas como perdas no núcleo. As perdas por histerese em motores de ímãs permanentes ocorrem no núcleo do estator devido à constante inversão da magnetização do material ferromagnético que o compõe, ela é causada pelo campo girante gerado nos enrolamentos trifásicos. Quando um material ferromagnético (como o núcleo laminado do estator) é submetido a um campo magnético alternado, os domínios magnéticos dentro do material sofrem ciclos repetidos de magnetização, como ilustrado na figura 2.3. Esse processo não é totalmente reversível e resulta em dissipação de energia na forma de calor. Essa perda pode ser expressa pela equação 2.13.

$$P_h = k_h f B_{pk}^n \quad (2.13)$$

onde o coeficiente k_h é uma constante dependente das características físicas do material, f representa a frequência da excitação aplicada, B_{pk} é a amplitude pico da densidade de fluxo dentro do material e n é outra constante dependente do material e comumente varia de 1,5 a 2,5 (Hanselman, 2011).

As perdas por correntes de Foucault são causadas por correntes elétricas induzidas no material ferromagnético sob excitação variável no tempo. Essas correntes circulantes dissipam potência (ou seja, perdas devido à resistividade do material). Podem ser descritas como:

$$P_f = k_f f^2 B_f^2 \quad (2.14)$$

sendo o coeficiente k_f uma constante dependente das características físicas do material e B_f a amplitude da densidade de fluxo dentro do material.

A forma mais direta de minimizar as perdas por correntes de Foucault é aumentar a resistividade do material. Como essa corrente flui em uma volta fechada dentro do material condutor, outro método comum consiste na construção de dispositivos utilizando laminações, as quais reduzem a quantidade de material magnético disponível para conduzir o fluxo dentro de uma determinada área de seção transversal (Hanselman, 2011). Quando o material é composto por ímãs permanentes, o processo de laminação pode ser chamado de segmentação, ou seja, dividir um único ímã permanente em vários segmentos. Por se tratar de uma corrente elétrica, ela também pode ser expressa pela Lei de Joule, conforme a equação 2.12. No entanto, nesse caso, o condutor não será o cobre, mas sim o material ferromagnético que compõe o estator.

2.2.3.3 Perdas mecânicas e adicionais

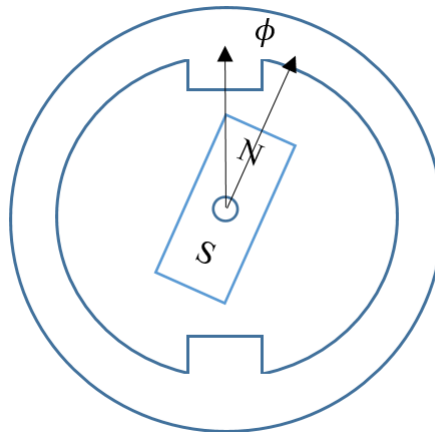
As perdas mecânicas são originadas principalmente pelo atrito e pela ventilação, resultando no desgaste dos rolamentos e na resistência ao movimento imposta pelo ar no interior da máquina, especialmente em aplicações de alta velocidade.

Por outro lado, as perdas adicionais correspondem às dissipações de energia nos elementos estruturais, ocasionadas pela indução de correntes em suportes metálicos e outros componentes mecânicos (Guedes, 1992).

2.2.3.4 Torque de *cogging* (ou de retenção)

Nos motores de ímãs permanentes, não está presente apenas o torque resultante do fluxo concatenado entre os ímãs e as bobinas alimentadas por uma corrente. Observe a seguinte situação: um ímã submetido a uma pequena rotação, envolto por um anel de metal com dois dentes, conforme ilustrado na figura 2.17. Esse ímã tende a parar nas posições em que $\phi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ e 270°

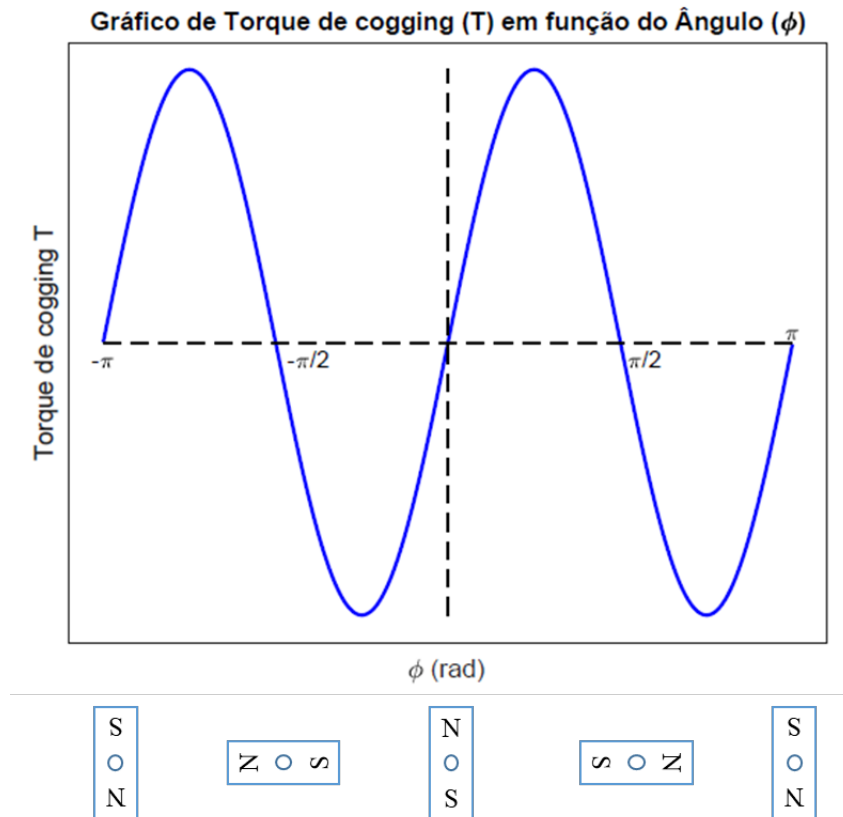
Figura 2.17 – Ímã cercado por um anel de metal com dois dentes



Fonte: Autor, 2025

Para melhor visualização, tem-se a figura 2.18, que apresenta um gráfico relacionando a magnitude do torque de *cogging* com a posição do ímã. Espera-se que, em todas as posições em que o torque é nulo, o ímã se mantenha estável. Entretanto, caso o ímã esteja nas posições $\phi = 90^\circ$ e 270° e sofra uma pequena perturbação, ele se alinhará com os dentes do anel metálico em $\phi = 0^\circ$ ou 180° . Esses são seus pontos de verdadeiro equilíbrio estável.

Figura 2.18 – Torque de *cogging* resultante no ímã conforme inclinação ϕ



Fonte: Autor, 2025

O torque de *cogging* é resultado da interação do campo magnético dos polos no rotor com os dentes do estator, independentemente se há presença de corrente nas bobinas do estator ou não. Pode ser descrito também como o máximo torque produzido pela tentativa dos ímãs permanentes se alinharem com a maior quantidade de materiais ferromagnéticos. Isso é visível nas figuras 2.17 e 2.18. Pode ser calculado como:

$$\tau_{cog} = -\frac{1}{2}\phi^2 \cdot \frac{dR}{d\theta} \quad (2.15)$$

onde ϕ é o fluxo magnético cruzando a lacuna de ar e R é a relutância total do caminho por onde o fluxo passa. Claramente, se a relutância R não varia à medida que o rotor gira, a derivada é zero e o torque de *cogging* será zero. Além disso, o torque é independente da direção do fluxo, pois o fluxo magnético está ao quadrado (Hanselman, 2011).

Em geral, esse torque é consideravelmente pequeno e muitas vezes desprezável quando comparado ao torque produzido pelo motor em operação.

3 Metodologia

Este capítulo visa detalhar o método mais utilizado por trás de prototipagens de máquinas elétricas, ele baseia-se na realização de simulações numéricas detalhadas, permitindo a avaliação do impacto de distintas configurações geométricas e materiais utilizados nas máquinas. Para isso, será utilizado o *software* Ansys Motor-CAD, ferramenta amplamente reconhecida para o projeto e análise de máquinas elétricas, especialmente no que tange à avaliação térmica, eletromagnética e mecânica dessas máquinas.

3.1 Método dos elementos finitos (FEM) e análise dos elementos finitos (FEA)

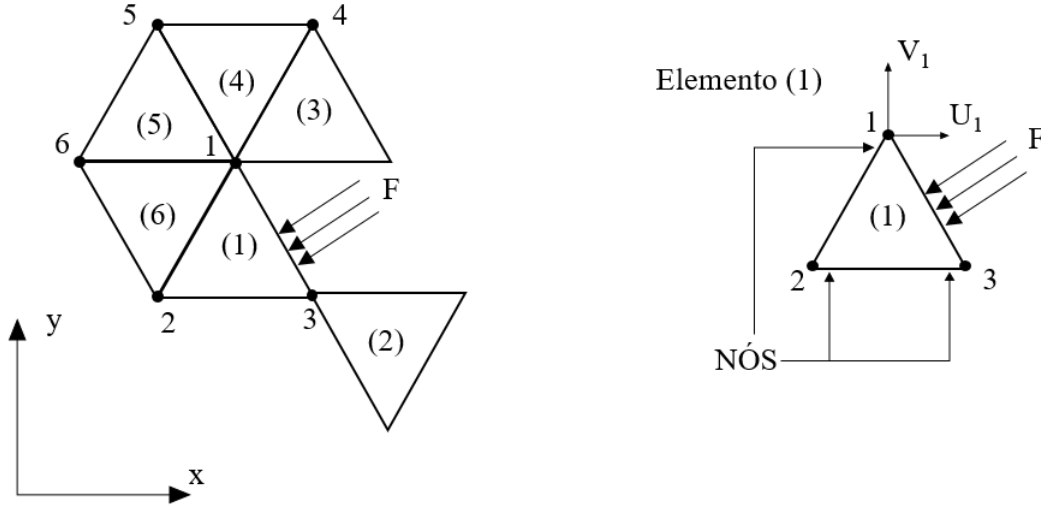
O processo de subdividir todos os sistemas em seus componentes individuais, ou "elementos", cujo comportamento é facilmente compreendido e, em seguida, reconstruir o sistema original a partir desses componentes para estudar seu comportamento, é uma abordagem natural adotada por engenheiros e cientistas.

Em diversas situações, um modelo pode ser obtido por um número finito de componentes bem definidos, sendo esses conhecidos como problemas *discretos*. Em outros casos, a subdivisão continua indefinidamente, e o problema só pode ser tratado utilizando o artifício matemático de um infinitesimal, resultando em equações diferenciais ou em manobras equivalentes que implicam uma infinidade de elementos. Esses casos são chamados de sistemas *contínuos* (Zienkiewicz; Taylor; Zhu, 2005).

3.1.1 Elemento estrutural e sistema estrutural

A figura 3.1 representa uma estrutura 2D montada por elementos individuais e interconectados pelos nós numerados de 1 a 6.

Figura 3.1 – Exemplo de estrutura formada por elementos interconectados



Fonte: Autor, 2024

Assumindo que pelos resultados de um experimento, as características de cada elemento são precisamente conhecidas. Assim, se um elemento típico rotulado como (1) e associado aos nós de número 1, 2 e 3 for examinado, as forças atuando nos nós são definidas de maneira única pelos deslocamentos desses nós e pela carga distribuída atuando no elemento (F). Para melhor entendimento, as forças e os deslocamentos correspondentes são definidos por componentes apropriados (U, V e u, v) em um sistema de coordenadas comum (x, y), dessa forma cada nó possui 2 DOF (*Degrees of freedom*). Listando as forças que atuam em todos os nós (três no caso ilustrado na figura 3.1) do elemento (1) em formato de matriz, tem-se:

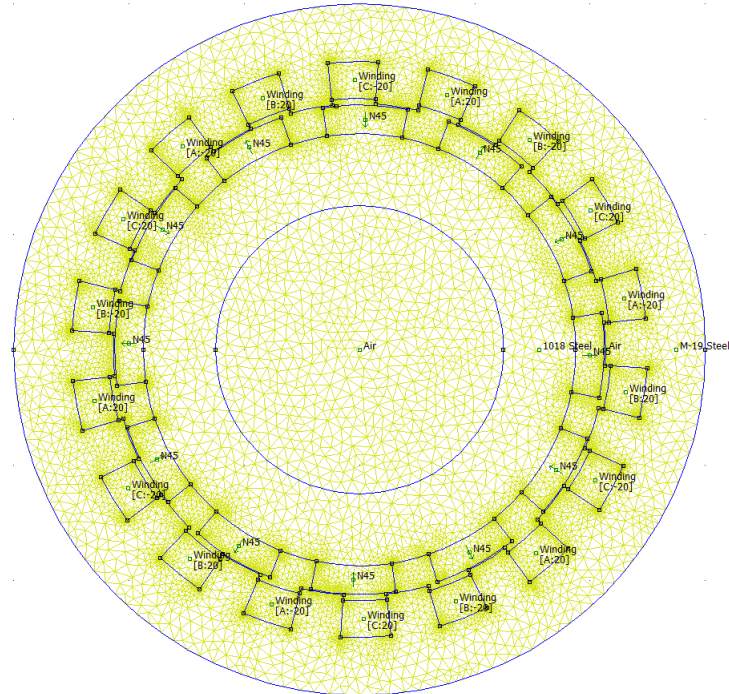
$$q^1 = \begin{bmatrix} q_1^1 \\ q_2^1 \\ q_3^1 \end{bmatrix}, q_1^1 = \begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \end{bmatrix}, etc. \quad (3.1)$$

e para os deslocamentos nodais correspondentes;

$$u^1 = \begin{bmatrix} u_1^1 \\ u_2^1 \\ u_3^1 \end{bmatrix}, u_1^1 = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_1 \end{bmatrix}, etc. \quad (3.2)$$

A figura 3.2 ilustra um exemplo real de uma máquina de ímãs permanentes discretizada em uma malha de elementos finitos formada por vários triângulos.

Figura 3.2 – Exemplo de máquina de ímãs permanentes formada por uma malha de elementos finitos



Fonte: Autor, 2025

3.1.2 Análise eletromagnética

A análise de sistemas eletromagnéticos tem como ponto de partida as equações de Maxwell, as quais descrevem as relações entre a intensidade do campo elétrico (E), a densidade de fluxo elétrico (D), a intensidade do campo magnético (H) e a densidade de fluxo magnético (B) (3.3 e 3.4) (Stoev *et al.*, 2017). Onde q e J representam, respectivamente, a carga da fonte e a densidade de corrente da fonte.

A equação de Maxwell-Faraday, 3.3, descreve como um campo elétrico (E) é gerado por uma variação temporal do campo magnético (B). A relação é importante em situações onde há campos magnéticos variáveis no tempo, como em máquinas elétricas trifásicas, que operam com variação de corrente e, conseqüentemente, de campos magnéticos.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.3)$$

Já a equação de Ampère-Maxwell, 3.4, apresenta como o campo magnético (H) é gerado por correntes elétricas (J) e por uma variação temporal do deslocamento elétrico (D). Ela é essencial para modelar o comportamento de materiais e condutores em movimento ou em situações de variação de corrente (Griffiths, 1999).

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.4)$$

Em seguida, a equação 3.5 explica como o deslocamento elétrico (D) se distribui em torno de cargas volumétricas (ρ_v).

$$\nabla \cdot D = \rho_v \quad (3.5)$$

Por fim, a equação 3.6 afirma que o campo magnético (B) não tem fontes ou sumidouros, ou seja, ele sempre forma laços fechados. Isso implica que não existem monopólos magnéticos, sendo útil para a análise de fluxos magnéticos em máquinas elétricas (Griffiths, 1999).

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.6)$$

As equações de Maxwell devem ser complementadas pelas chamadas relações constitutivas:

$$B = \mu H \quad (3.7)$$

$$D = \epsilon E \quad (3.8)$$

O campo eletromagnético é calculado por meio do potencial vetor magnético **A**, que, com base na restrição de ausência de divergência da densidade de fluxo magnético, é definido como:

$$B = \nabla \times A \quad (3.9)$$

O campo eletromagnético em máquinas elétricas rotativas é excitado por condutores percorridos por corrente. Ao aplicar a Equação 3.4 com $\frac{\partial D}{\partial t} = 0$, a relação constitutiva da Equação 3.7 com $\mu = \mu_0$ e substituir na Equação 3.9, o potencial vetor magnético A pode ser expresso em termos da densidade de corrente J (Stoev *et al.*, 2017).

$$\nabla^2 A = -\mu_0 J \quad (3.10)$$

As Equações 3.9 e 3.10 demonstram que o potencial vetor magnético segue a direção da corrente no condutor, enquanto o campo magnético gerado por essa corrente é perpendicular à sua direção. Esse fenômeno pode ser facilmente explicado pela regra da mão direita, figura 2.1.

3.2 Ansys Motor-CAD

Há mais de 50 anos, a empresa Ansys Inc. tem desenvolvido *softwares* de simulações das mais diversas áreas da engenharia, como mecânica, fluidos, eletrônica, eletromagnetismo, computação em nuvem, entre outras (Ansys, 2025). Todavia, o Ansys Motor-CAD é majoritariamente utilizado por grandes empresas e não apresenta muito conteúdo disponível na internet sobre como usá-lo. Dessa forma, a seguir será apresentada uma breve explicação de como o Ansys Motor-CAD foi utilizado neste trabalho.

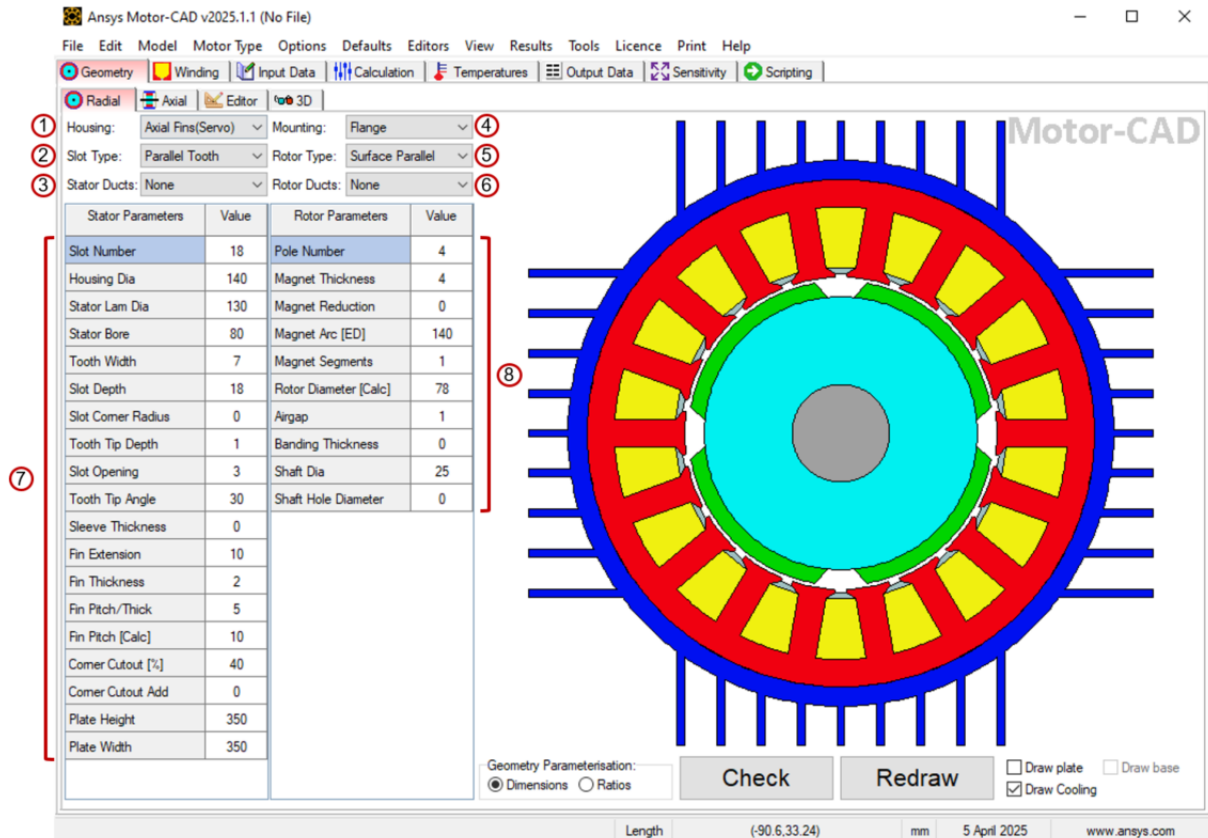
3.3 Guia de utilização

Nesta seção, expõe-se o passo a passo necessário para realizar uma simulação de uma máquina elétrica no Ansys Motor-CAD. A figura 3.3 ilustra a página inicial do Ansys Motor-CAD, ao inicializar o *software* os valores e opções de entradas configurados serão sempre esses presentes na figura. Ainda na figura 3.3, há uma legenda a respeito das opções de entradas que serão configuradas pelo usuário. As entradas estão descritas a seguir.

- No índice 1, será determinada a carcaça que envolve o motor, cada opção tem seus determinados parâmetros físicos alterando assim as opções no índice 7.
- No índice 2, será determinado o modelo de ranhura presente no estator, mais uma vez cada opção tem seus determinados parâmetros físicos alterando assim as opções no índice 7.
- No índice 3, será determinado se há presença de dutos ou não no estator, ainda assim cada opção tem seus determinados parâmetros físicos alterando assim as opções no índice 7.
- No índice 4, será determinado se há presença de suporte ou não para segurar o motor, essa é a última opção que gerará efeitos também nas opções no índice 7.
- No índice 5, será determinado a topologia do motor com relação ao rotor (ímãs em superfície, embutidos, entre outros), dessa vez cada opção alterará as opções no índice 8.
- No índice 6, será determinado se há presença de dutos ou não no rotor, outra vez cada opção alterará as opções no índice 8.
- No índice 7, encontram-se todos os parâmetros físicos relacionados ao estator e à carcaça, como o número de ranhuras, diâmetro do estator, angulação da ponta dos pés, entre outros. Para visualizar o que cada parâmetro altera na figura do motor, basta pressionar o botão direito do mouse sobre o parâmetro desejado, e ele será ajustado, permitindo ao usuário observar as modificações.

- Por fim, o índice 8 contém todos os parâmetros físicos relacionados ao rotor, aos ímãs e ao eixo, como o número de polos, diâmetro do rotor, angulação dos ímãs, entre outros. Para visualizar o que cada parâmetro altera na figura do motor, basta pressionar o botão direito do mouse sobre o parâmetro desejado, e ele será ajustado, permitindo ao usuário observar as modificações.

Figura 3.3 – Página inicial do Ansys Motor-CAD com sinalização das entradas

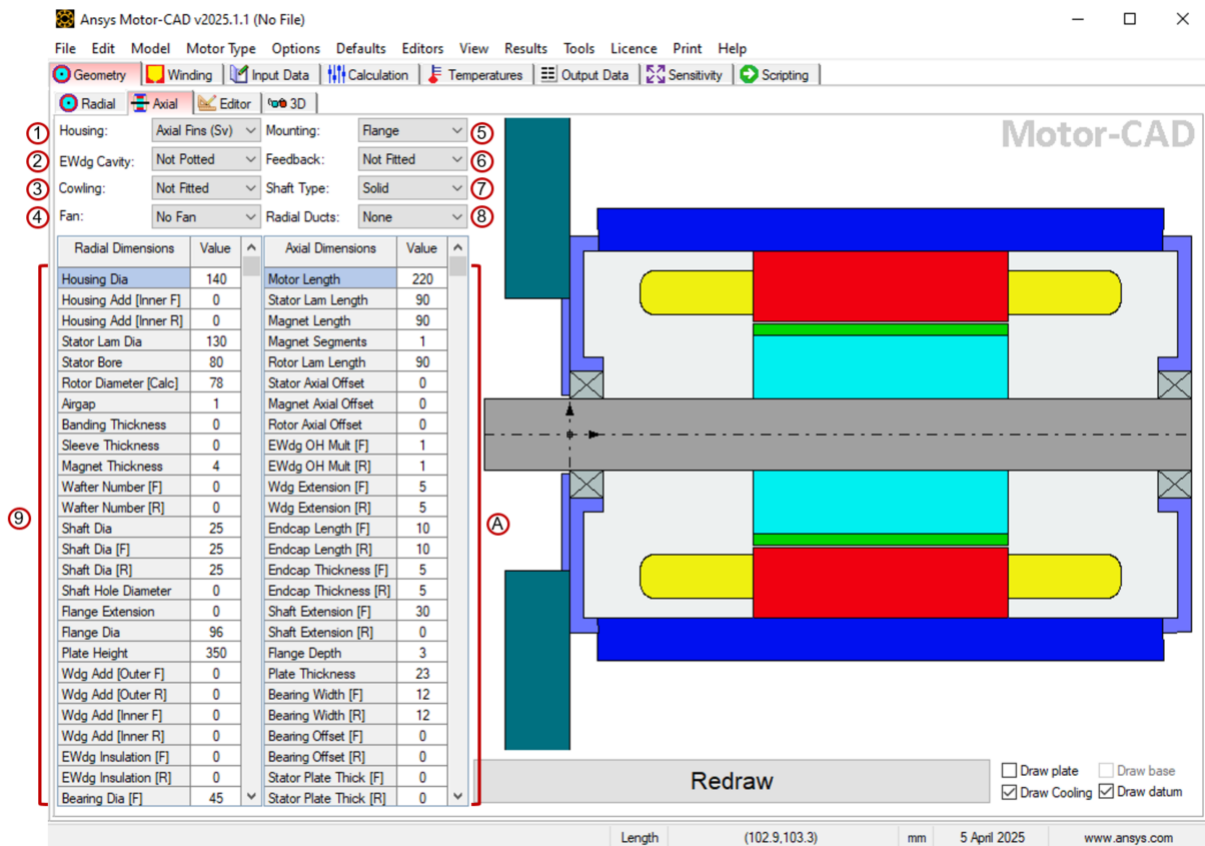


Fonte: Autor, 2025

As entradas definidas acima se referem ao valores dos parâmetros radiais da máquina, ao prosseguir para a página de título "Axial", tem-se a figura 3.4. Nela encontram-se parâmetros adicionais que estão descritos a seguir.

- O índice 1 da página Axial é o mesmo da página inicial.
- No índice 2, será determinado se as cavidades das extremidades dos enrolamentos serão “potados” ou não, cada opção tem seus determinados parâmetros físicos alterando assim as opções nos índices 9 e A.
- No índice 3, será determinado se há carenagem ou não na parte traseira da máquina, mais uma vez cada opção tem seus determinados parâmetros físicos alterando assim as opções nos índices 9 e A.
- No índice 4, será determinado se há presença de um *cooler* na parte traseira da máquina ou não, ainda assim cada opção tem seus determinados parâmetros físicos alterando assim as opções nos índices 9 e A.
- O índice 5 da página Axial é o mesmo que o índice 4 da página inicial.
- No índice 6, será determinado se há a proteção para sistemas de *feedback* na parte traseira da máquina, outra vez cada opção alterará as opções nos índices 9 e A.
- No índice 7, será determinado o tipo de eixo presente no centro da máquina, mais uma vez cada opção tem seus determinados parâmetros físicos alterando assim as opções nos índices 9 e A.
- O índice 8 da página Axial equivale ao índice 6 da página inicial.
- No índice 9, encontram-se todos os parâmetros físicos relacionados ao deslocamento radial, repetindo assim alguns parâmetros já definidos na página inicial. Para visualizar o que cada parâmetro altera na figura do motor, basta pressionar o botão direito do mouse sobre o parâmetro desejado, e ele será ajustado, permitindo ao usuário observar as modificações.
- Por fim, o índice A contém todos os parâmetros físicos relacionados ao deslocamento axial, como o comprimento do motor, estator, rotor, ímãs, entre outros. Para visualizar o que cada parâmetro altera na figura do motor, basta pressionar o botão direito do mouse sobre o parâmetro desejado, e ele será ajustado, permitindo ao usuário observar as modificações.

Figura 3.4 – Página Axial do Ansys Motor-CAD com sinalização das entradas

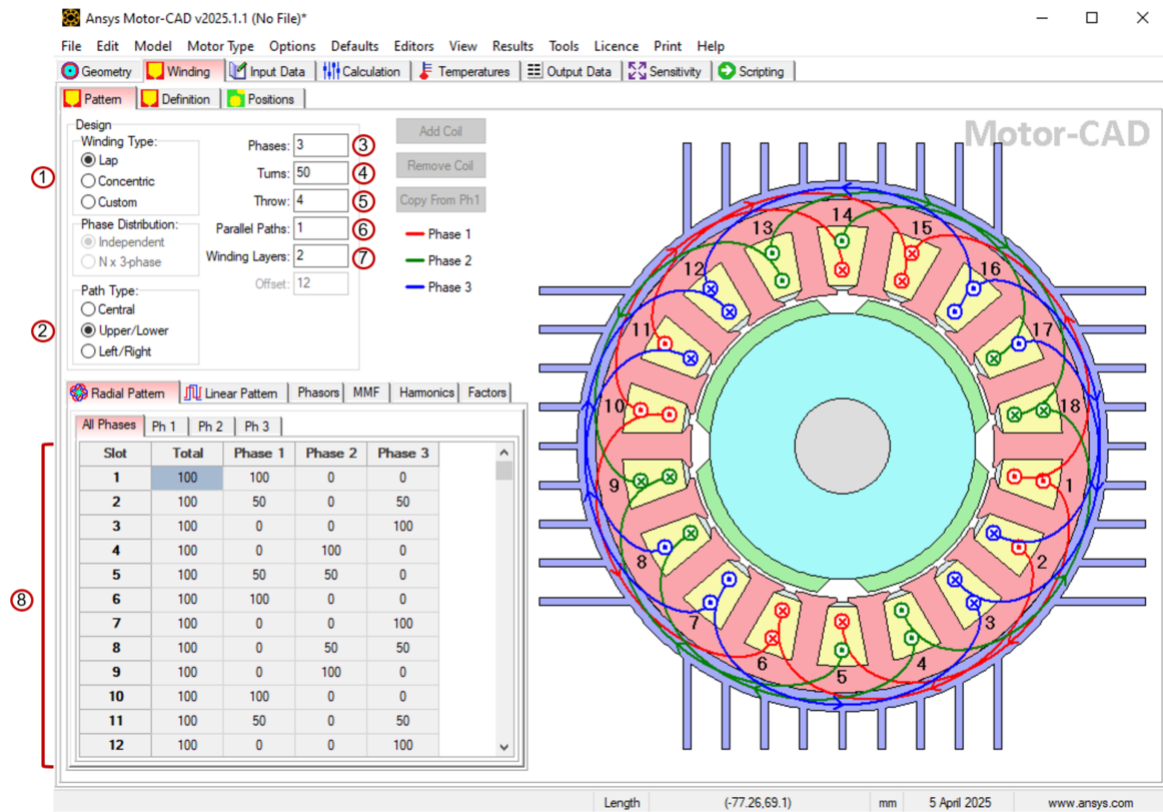


Fonte: Autor, 2025

Avançando para a definição e distribuição dos enrolamentos, tem-se as figuras 3.5 e 3.6. Os parâmetros apresentados na figura 3.5 são listados a seguir.

- No índice 1, será determinada se os enrolamentos serão distribuídos, concentrados ou customizados pelo usuário, os dois primeiros tipos são expostos na figura 2.14.
- No índice 2, será determinado como os enrolamentos de cada circuito será distribuído dentro das ranhuras.
- No índice 3, será determinado a quantidade de fases da máquina.
- No índice 4, será determinado o número de espiras por fase.
- No índice 5, será determinado o número de vezes que o mesmo circuito é enrolado passa pelas ranhuras.
- No índice 6, será determinado o número de circuitos em paralelo por fase.
- No índice 7, será determinado o número de circuitos enrolados em cada ranhura, será limitado pelas características físicas, como largura dos dentes, diâmetro dos enrolamentos, entre outros.
- Encerra-se esta página no índice 8 onde será visualizado pelo usuário a quantidade de espiras em cada ranhura e de qual fase pertencem.

Figura 3.5 – Página *Pattern* do Ansys Motor-CAD com sinalização das entradas

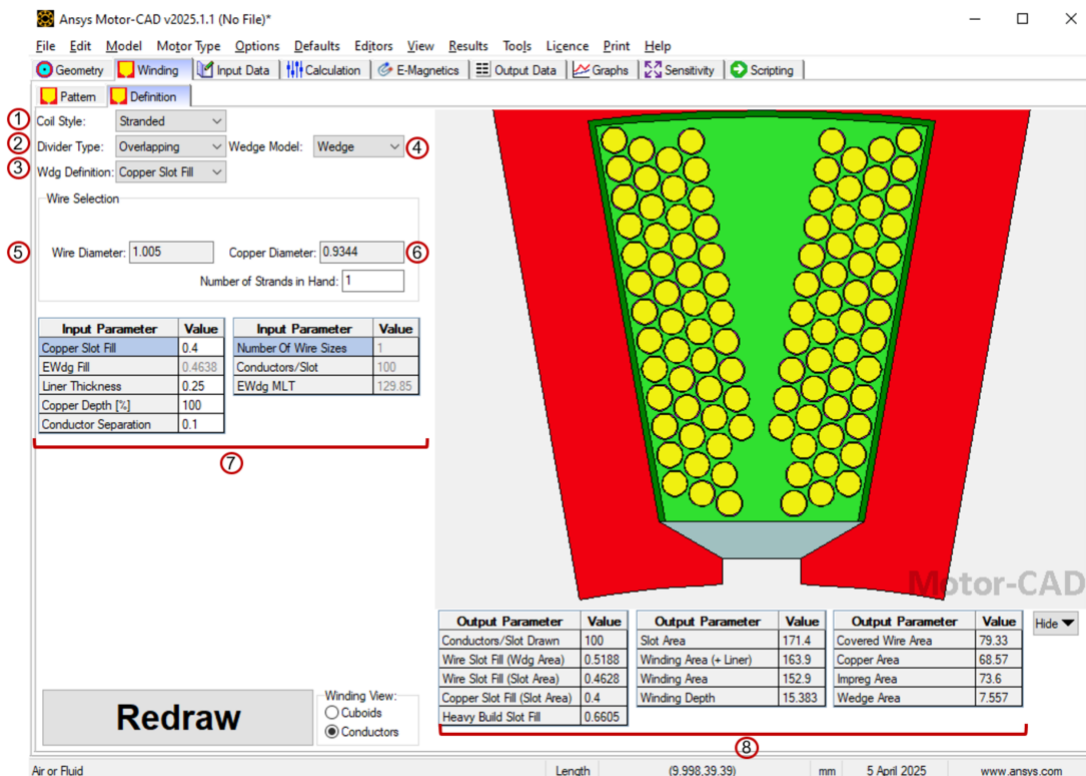


Fonte: Autor, 2025

Para encerrar a configuração dos parâmetros dos enrolamentos, tem-se a figura 3.6, e cada índice dessa imagem é descrito abaixo.

- No índice 1, será determinada se as bobinas seguem o padrão trançadas ou *hairpin*.
- No índice 2, será determinado como os enrolamentos de cada circuito estão separados.
- No índice 3, será definido como os cabos serão preenchidos.
- No índice 4, será determinado o modelo de isolamento entre os enrolamentos e os pés.
- No índice 5, será determinado o diâmetro do cabo.
- No índice 6, será determinado o diâmetro do material que compõe o cabo.
- No índice 7, os valores presentes serão automaticamente calculado pelo *software*, porém podem ser alteradas por parte do usuário.
- Novamente encerra-se esta página no índice 8 onde será visualizado pelo usuário parâmetros complementares calculados pelo *software* de acordo com as entradas escolhidas pelo usuário. Todavia, não podem ser alterados os valores presentes nesse índice.

Figura 3.6 – Página *Definition* do Ansys Motor-CAD com sinalização das entradas

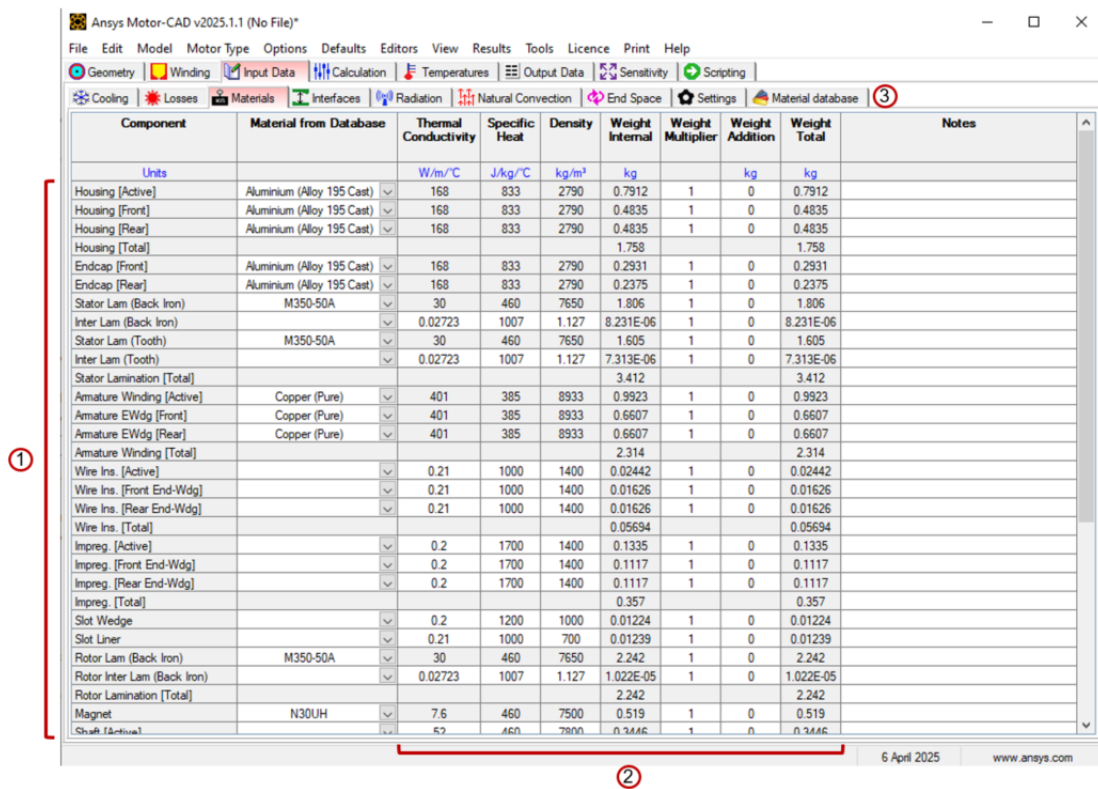


Fonte: Autor, 2025

Com os valores de dimensões definidos, pode-se prosseguir para a etapa de definição dos materiais que compõem cada parte da máquina, isso pode ser feito na página Materials, ilustrada na figura 3.7

- O índice 1 sinaliza todas as partes físicas da máquina que podem ter os materiais escolhidos, embora o *software* conta com alguns materiais já definidos, é possível adicionar materiais novos definindo suas propriedades a partir do índice 3.
- No índice 2, estão descritos algumas características físicas dos materiais selecionados no índice conforme definido no *software* ou pelo usuário.
- O índice 3 permite o acesso ao usuário aos dados de todos os materiais já disponíveis no *software*, como também permite a adição de novos materiais.

Figura 3.7 – Página Materials do Ansys Motor-CAD com sinalização das entradas



Component	Material from Database	Thermal Conductivity	Specific Heat	Density	Weight Internal	Weight Multiplier	Weight Addition	Weight Total	Notes
Units		W/m/°C	J/kg/°C	kg/m³	kg		kg	kg	
Housing [Active]	Aluminium (Alloy 195 Cast)	168	833	2790	0.7912	1	0	0.7912	
Housing [Front]	Aluminium (Alloy 195 Cast)	168	833	2790	0.4835	1	0	0.4835	
Housing [Rear]	Aluminium (Alloy 195 Cast)	168	833	2790	0.4835	1	0	0.4835	
Housing [Total]					1.758			1.758	
Endcap [Front]	Aluminium (Alloy 195 Cast)	168	833	2790	0.2931	1	0	0.2931	
Endcap [Rear]	Aluminium (Alloy 195 Cast)	168	833	2790	0.2375	1	0	0.2375	
Stator Lam (Back Iron)	M350-50A	30	460	7650	1.806	1	0	1.806	
Inter Lam (Back Iron)		0.02723	1007	1.127	8.231E-06	1	0	8.231E-06	
Stator Lam (Tooth)	M350-50A	30	460	7650	1.605	1	0	1.605	
Inter Lam (Tooth)		0.02723	1007	1.127	7.313E-06	1	0	7.313E-06	
Stator Lamination [Total]					3.412			3.412	
Armature Winding [Active]	Copper (Pure)	401	385	8933	0.9923	1	0	0.9923	
Armature EWdg [Front]	Copper (Pure)	401	385	8933	0.6607	1	0	0.6607	
Armature EWdg [Rear]	Copper (Pure)	401	385	8933	0.6607	1	0	0.6607	
Armature Winding [Total]					2.314			2.314	
Wire Ins. [Active]		0.21	1000	1400	0.02442	1	0	0.02442	
Wire Ins. [Front End-Wdg]		0.21	1000	1400	0.01626	1	0	0.01626	
Wire Ins. [Rear End-Wdg]		0.21	1000	1400	0.01626	1	0	0.01626	
Wire Ins. [Total]					0.05694			0.05694	
Impreg. [Active]		0.2	1700	1400	0.1335	1	0	0.1335	
Impreg. [Front End-Wdg]		0.2	1700	1400	0.1117	1	0	0.1117	
Impreg. [Rear End-Wdg]		0.2	1700	1400	0.1117	1	0	0.1117	
Impreg. [Total]					0.357			0.357	
Slot Wedge		0.2	1200	1000	0.01224	1	0	0.01224	
Slot Liner		0.21	1000	700	0.01239	1	0	0.01239	
Rotor Lam (Back Iron)	M350-50A	30	460	7650	2.242	1	0	2.242	
Rotor Inter Lam (Back Iron)		0.02723	1007	1.127	1.022E-05	1	0	1.022E-05	
Rotor Lamination [Total]					2.242			2.242	
Magnet	N30UH	7.6	460	7500	0.519	1	0	0.519	
Shaft [Initial]		52	460	7800	0.3446	1	0	0.3446	

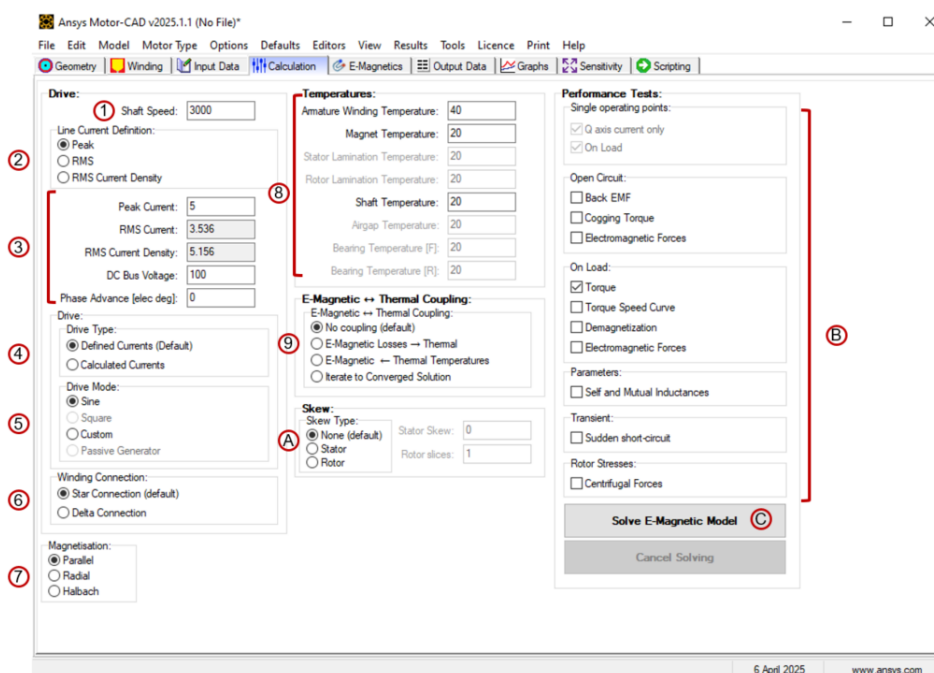
Fonte: Autor, 2025

Por último, é necessária a definição dos parâmetros elétricos e do que será simulado, tudo isso se encontra na figura 3.8, cada opção é definida abaixo.

- No índice 1, será definido a velocidade de operação da máquina, que está diretamente ligada a frequência da alimentação.
- No índice 2, o usuário irá escolher qual parâmetro de corrente de alimentação da máquina será definido por ele, assim o *software* irá disponibilizar as opções que devem ser informadas no índice 3.

- Nos índices 4 e 5, serão definidos mais uma vez parâmetros relacionados a alimentação da máquina, respectivamente se as correntes serão definidas ou calculadas e o formato do sinal de alimentação (senoidal, quadrada ou customizada).
- O índice 6 disponibiliza apenas duas opções que se refere ao tipo de conexão dos enrolamentos de cada fase: em estrela (Y) ou delta (Δ).
- O índice 7 disponibiliza três opções referentes ao tipo de magnetização dos ímãs presentes no rotor.
- No índice 8, serão determinadas as temperaturas de alguns componentes da máquina antes da entrada em operação, ou seja, temperaturas iniciais.
- O índice 9 é de extrema importância ao usuário, pois ele tem a opção de realizar a simulação com acoplamento de análises, podendo assim realizar uma análise eletromagnética considerando perdas térmicas ou não.
- O índice A trás a opção da adição de *skews* tanto no rotor quanto estator, elas são as inclinações das lâminas quanto ao eixo do motor.
- No índice B, são disponibilizadas diversas opções quanto a simulação e cada uma dessas opções são independentes, por exemplo: o usuário pode simular o torque de *cogging* em operação sem carga, quanto uma simulação de torque em plena carga.
- Por fim, o índice C é o botão para inicializar as simulações, conforme todos o parâmetros definidos anteriormente.

Figura 3.8 – Página *Calculation* do Ansys Motor-CAD com sinalização das entradas

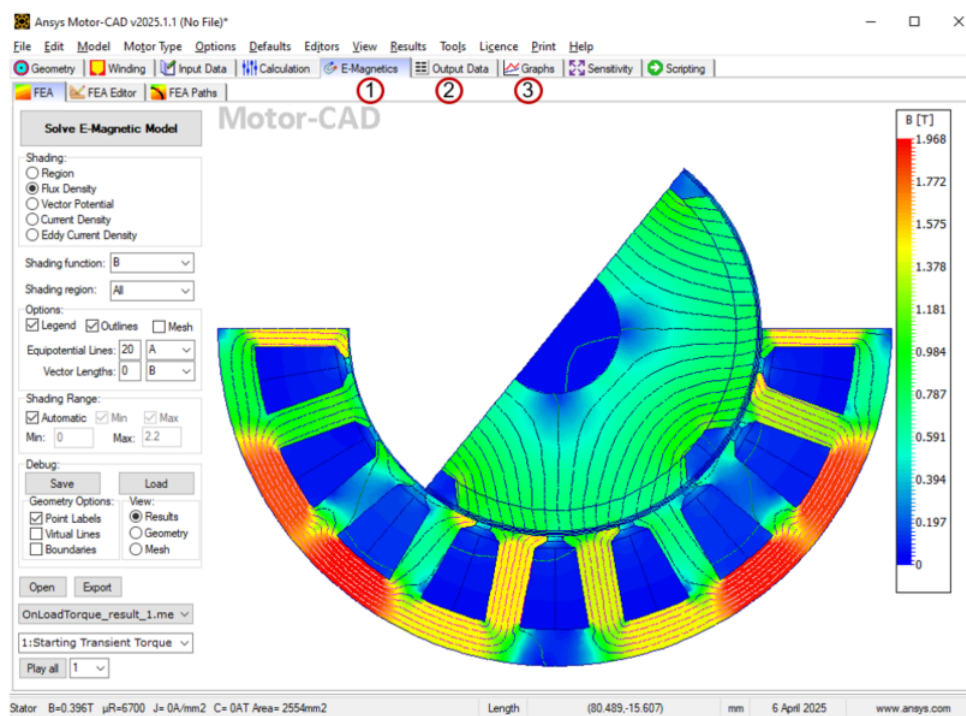


3.4 Visualização de resultados

Após seguir o passo a passo definido na seção anterior, o *software* disponibilizará diversos gráficos e análises, mas também disponibiliza a base de dados que pode ser exportada em formato “.csv”, caso o usuário queira fazer análises adicionais ou por meio de outro *software*. O Ansys Motor-CAD apresenta diversas análises distintas e o usuário pode escolher entre os modelos: *E-Magnetic*, *Thermal*, *Lab* e *Mechanical*. Respectivamente se referem à análise eletromagnética, térmica, “cíclica” e mecânica.

A figura 3.9 é um exemplo de simulação no modelo *E-Magnetic*, gerados pelos *software* podem ser vistos nos índices 1, 2 e 3.

Figura 3.9 – Página *E-Magnetics* do Ansys Motor-CAD no modelo *E-Magnetic* com sinalização das páginas de resultados



Fonte: Autor, 2025

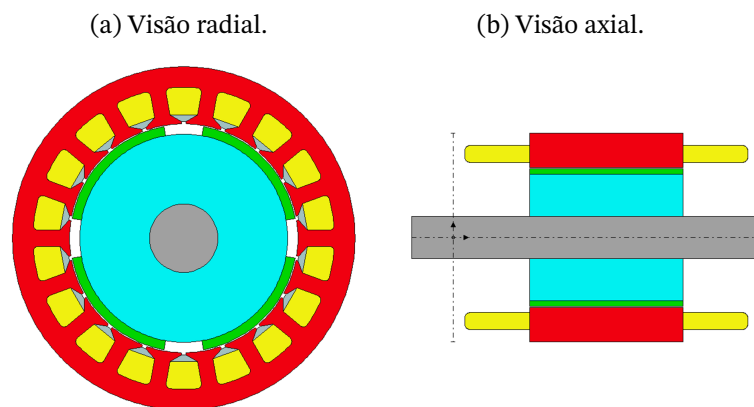
4 Simulações e resultados

O presente capítulo está dividido em subseções, cada uma com o objetivo de apresentar os modelos simulados e os respectivos resultados numéricos obtidos a partir deles. A ordem dos modelos abordados é a seguinte: primeiro, um motor síncrono de fluxo radial com rotor interno e ímãs montados na superfície; em seguida, um motor síncrono de fluxo radial com rotor interno e ímãs embutidos simples; em terceiro, um motor síncrono de ímãs permanentes de fluxo axial com rotor e estator únicos; e, por fim, um motor síncrono de ímãs permanentes de fluxo axial com dois rotores e um estator único, Torus-S com magnetos tipo NN.

4.1 Motor síncrono de fluxo radial com rotor interno de ímãs permanentes montados em superfícies - SPM

O primeiro modelo montado é ilustrado nas figuras 4.1a e 4.1b.

Figura 4.1 – Modelo 1 - Motor síncrono de fluxo radial com rotor interno de ímãs permanentes montados em superfícies.



Fonte: Autor, 2025.

Para a criação desse modelo, foram utilizados os parâmetros físicos de acordo com as tabelas 4.1 e 4.2. Os materiais escolhidos para compor esse modelo foram: *M350-50A* para o estator e rotor, cobre puro para os enrolamentos de armadura e *N30UH* para os ímãs permanentes. O *M350-50A* pertence à classe dos aços elétricos siliciosos, caracterizando-se por possuir baixa perda magnética e alta permeabilidade, o que melhora a eficiência do motor ao reduzir perdas por histerese e correntes parasitas devido a sua estrutura laminada. Todavia, o *N30UH* faz parte da família dos ímãs de Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB), caracterizando-se por apresentar uma densidade de fluxo magnético elevada como explicado na seção 2.1.2, o

seu sufixo *UH* indica que esse material pode suportar temperaturas de até 180°C, tornando-o adequado para motores e geradores que operam sob condições térmicas severas.

Tabela 4.1 – Modelo 1 - Parâmetros físicos de entrada do estator

Parâmetros do estator	Entradas	Unidade de medida
Número de Ranhuras	18	Não há
Diâmetro externo	150	Milímetro
Diâmetro interno	100	Milímetro
Largura do dente	7	Milímetro
Profundidade da ranhura	16	Milímetro
Angulação de canto da ranhura	2	Radiano
Profundidade da ponta do dente	1	Milímetro
Abertura da ranhura	2	Milímetro
Ângulo da ponta do dente	30	grau
Comprimento	110	Milímetro

Fonte: Autor, 2025.

Tabela 4.2 – Modelo 1 - Parâmetros físicos de entrada do rotor

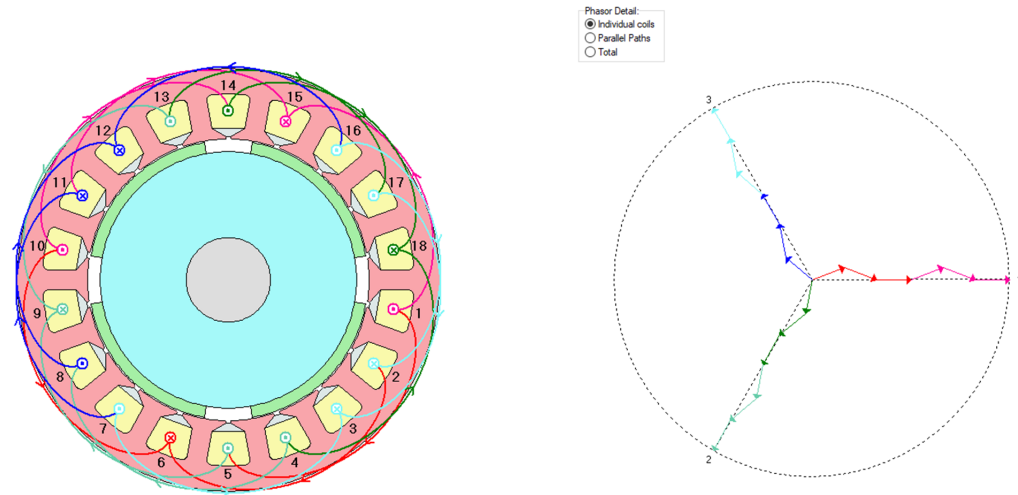
Parâmetros do rotor	Entradas	Unidade de medida
Número de polos	4	Não há
Largura do ímã	4	Milímetro
Arco do ímã [ED]	140	grau elétrico
Segmentos do ímã	1	Não há
Diâmetro do rotor	99	Milímetro
Comprimento do gap de ar	1	Milímetro
Diâmetro do eixo	30	Milímetro
Comprimento do rotor	110	Milímetro
Comprimento do ímã	110	Milímetro

Fonte: Autor, 2025.

A disposição dos circuitos e enrolamentos de cada fase é ilustrada na figura 4.2a. Cada fase é composta por dois conjuntos de enrolamentos conectados em paralelo, conforme figura 4.2b, suas conexões são orientadas em modo estrela (Y).

Figura 4.2 – Modelo 1 - Motor síncrono de fluxo radial com rotor interno de ímãs permanentes montados em superfícies, enrolamentos e diagrama de fases.

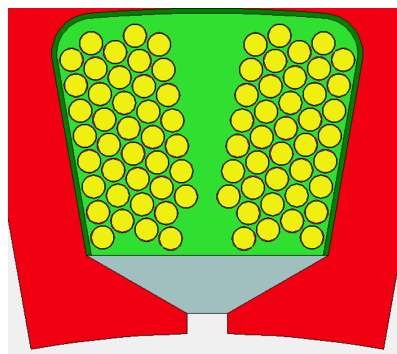
- (a) Disposição do enrolamentos por circuito (b) Diagrama de fases composto os dois circuitos de cada fase.



Fonte: Autor, 2025.

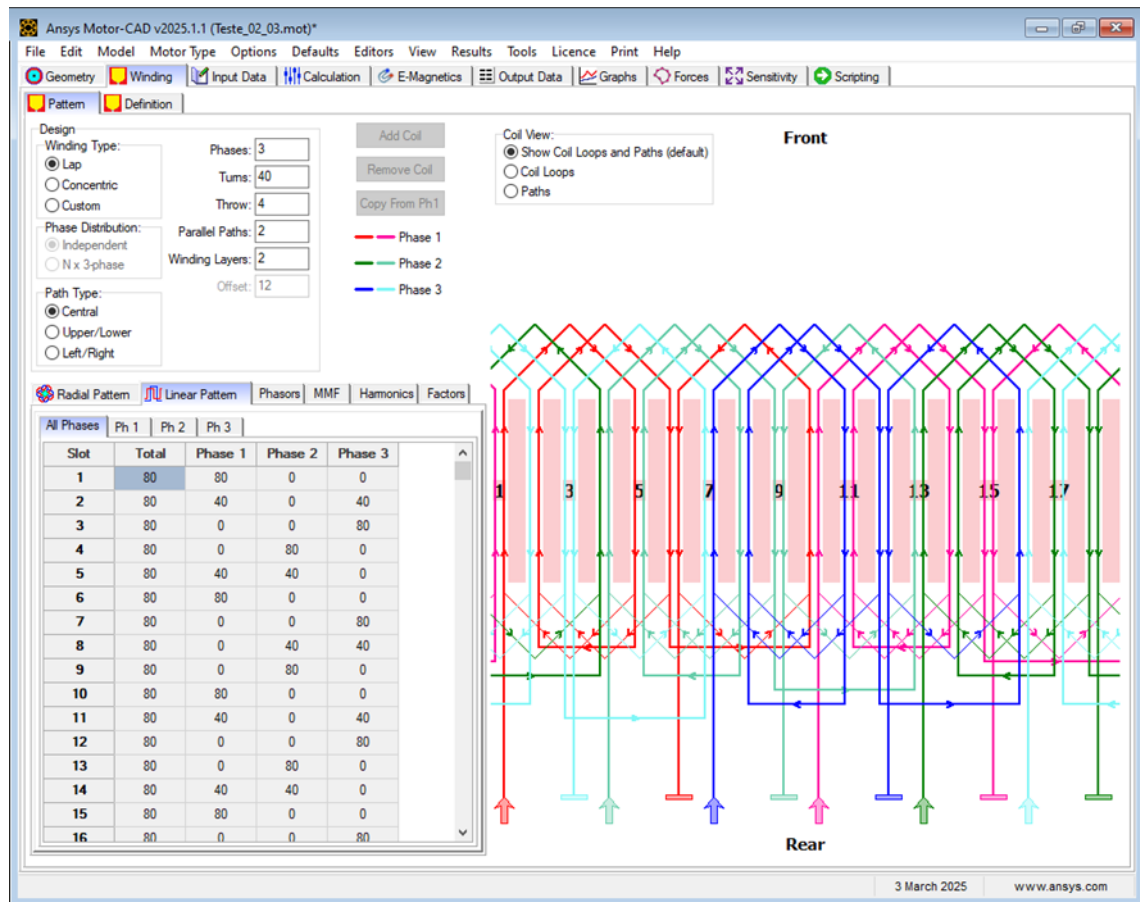
Em cada ranhura há 80 voltas de fios de cobre, separados nas extremidades laterais, sendo 40 voltas apenas de um circuito de uma fase, verifica-se na figura 4.3. Todavia, nem todas as ranhuras possuem enrolamentos de duas fases distintas, mas necessariamente possuem dois circuitos distintos, podendo ser da mesma fase, ilustrado na figura 4.4.

Figura 4.3 – Modelo 1 - Ranhura com 80 voltas de fio de cobre.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 4.4 – Modelo 1 - Padrão dos enrolamentos de cobre por fase e ranhura.



Fonte: Autor, 2025.

Por fim, para dar início às simulações, foi necessário determinar uma velocidade de operação, tensão e corrente elétrica de alimentação do motor, os valores escolhidos estão descritos na tabela 4.4.

Tabela 4.3 – Modelo 1 - Parâmetros de entrada da simulação

Parâmetros	Entradas	Unidade de medida
Velocidade de operação	1800	Rotações por minuto
Tensão da alimentação CC	380	volt
Corrente de pico da alimentação	21	ampere

Fonte: Autor, 2025.

4.1.1 Resultados do modelo 1

Os resultados elétricos com relação a potência de entrada, eficiência do motor, fator de potência, entre outros estão expressos na tabela 4.4.

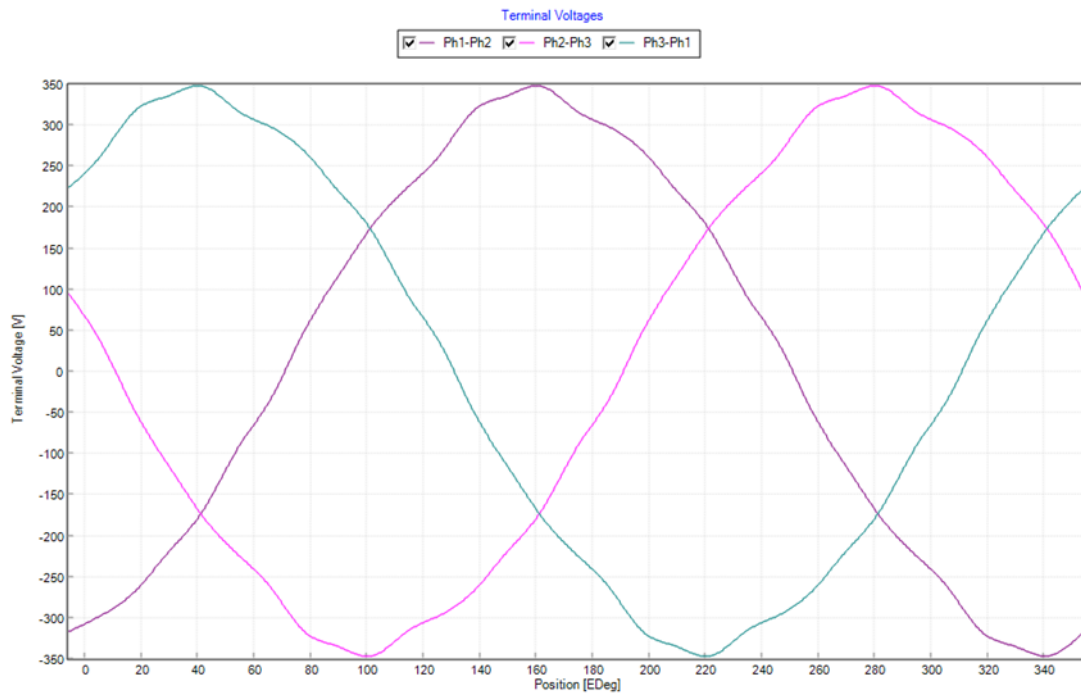
Tabela 4.4 – Modelo 1 - Resultados da simulação de operação do motor

Parâmetros	Valores	Unidade de medida
Valor médio da corrente de alimentação	15,25	ampere
Corrente de Linha (RMS)	14,85	ampere
Frequência fundamental	60	hertz
Torque médio	28,579	newton-metro
<i>Ripple</i> de torque de <i>cogging</i>	4,6572	newton-metro
Potência de entrada	5793,2	watt
Perdas totais sob carga	487,5	watt
Potência de saída	5305,8	watt
Eficiência do sistema	91,585	Porcentagem
Torque no eixo	28,148	newton-metro
Fator de potência indutivo	0,9449	Não há
Ângulo de carga	19,104	grau elétrico

Fonte: Autor, 2025.

Pela equação 2.10, que estabelece a relação da velocidade de rotação da máquina com a frequência de alimentação dela, e com as informações dos parâmetros de entrada já espera-se que a frequência seja de 60 *Hz* como visto na tabela 4.4. Para melhor visualização das tensões terminais ao longo de diferentes angulações, têm-se o seguinte gráfico 4.5.

Figura 4.5 – Modelo 1 - Tensão terminal de linha x grau elétrico.

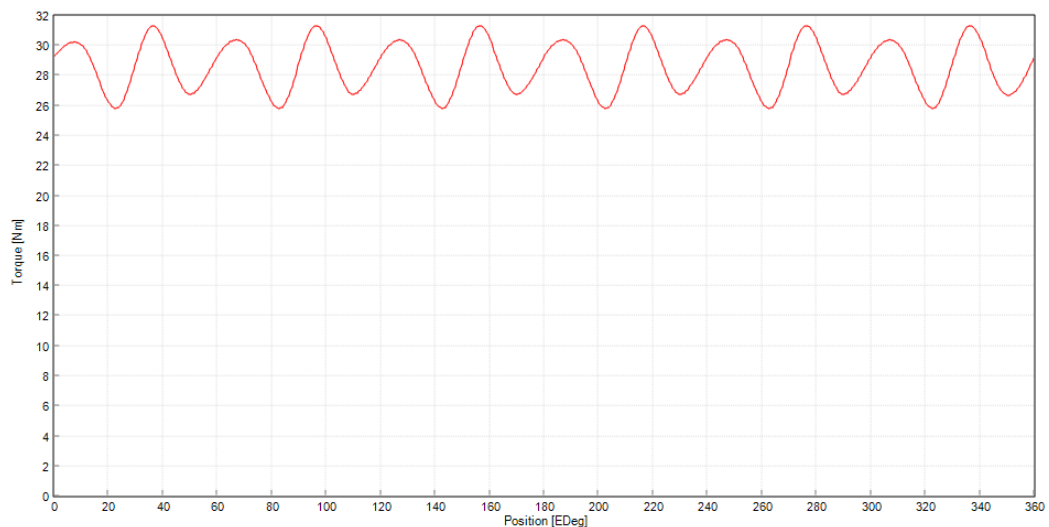


Fonte: Autor, 2025.

4.1.2 Torque no modelo 1

O comportamento do torque resultante na máquina para a velocidade de 1800 rpm é ilustrado no gráfico 4.6. Todavia, esse torque pode ser avaliado para diferentes velocidades e diferentes ângulos de avanço da corrente com relação ao fluxo magnético, ilustrado na figura 4.7.

Figura 4.6 – Modelo 1 - Torque x grau elétrico.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 4.7 – Modelo 1 - Torque para diferentes ângulos de avanço x Velocidade.



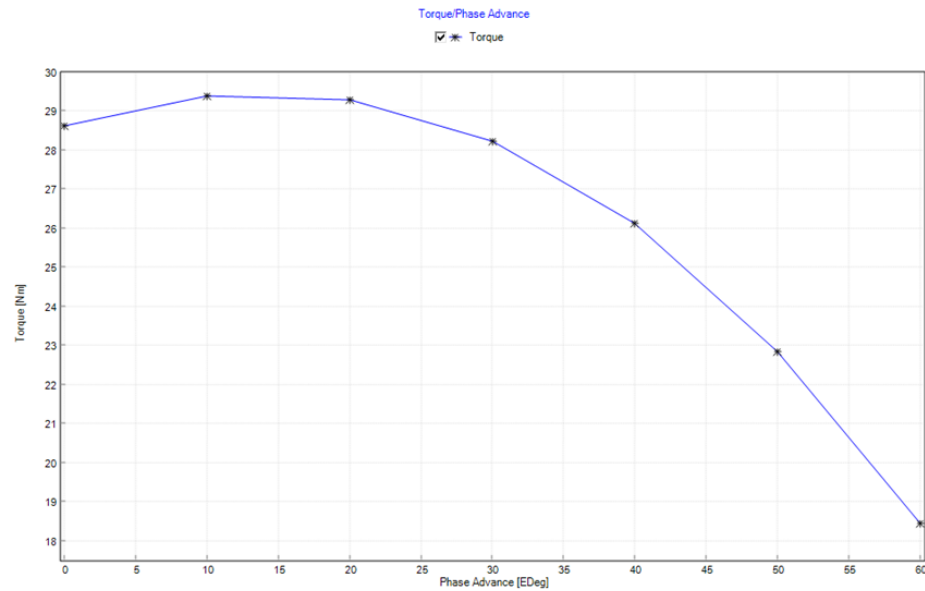
Fonte: Autor, 2025.

Na figura 4.7, a curva rosa entre os pontos de 28 e 29 Nm representa a simulação do modelo 1 sob carga, com ângulo de avanço de corrente igual a 0° , conforme legenda. Verifica-se que esse torque permanece constante até a velocidade de 2043 rpm. Para que essa velocidade seja atingida, é necessária a alteração da frequência de operação do motor, o que pode ser realizado por meio de um inversor de frequência.

Ainda na figura 4.7, observa-se também o ângulo de avanço no qual o motor apresenta a maior disponibilidade de torque. No gráfico, essa condição é representada pela curva de avanço de 10° , sendo que, mais precisamente, esse ângulo corresponde a $12,83^\circ$, resultando em um torque de 29,424 Nm.

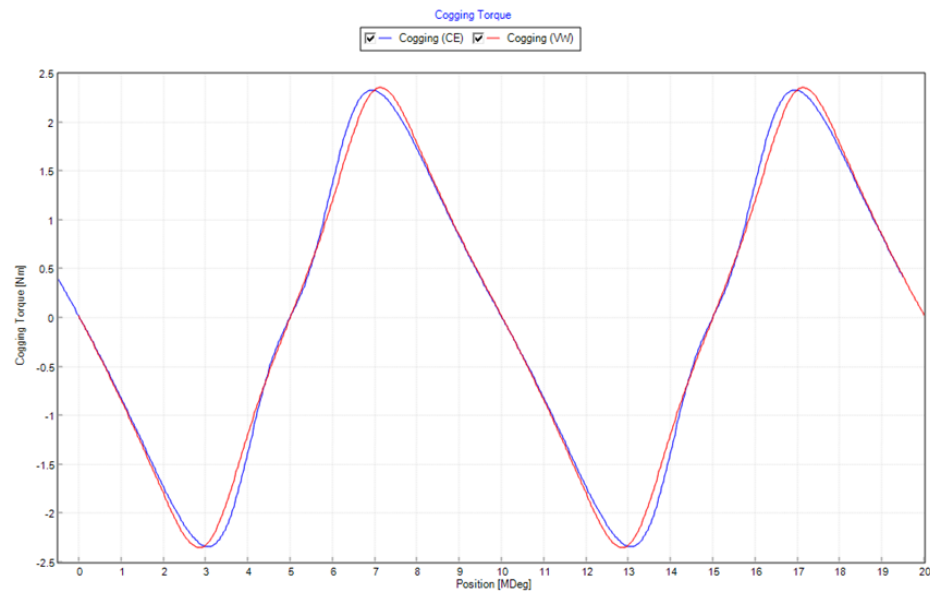
Para melhor ilustração, a figura 4.8 apresenta a relação entre torque e ângulo de avanço.

Figura 4.8 – Modelo 1 - Torque x Ângulos de avanço da corrente.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 4.9 – Modelo 1 - Torque de *cogging* x grau mecânico.



Fonte: Autor, 2025.

Na figura 4.9, observa-se duas curvas muito parecidas, uma intitulada por *Cogging (CE)* e a outra por *Cogging (VW)*, essas siglas significam, respectivamente, *Co-energy* e *Virtual Works*, que são dois métodos de análises distintos utilizados pelo *software*. Este tem foco

em sistemas rígidos e aquele em sistemas dinâmicos e eletromagnéticos, mas é notório que ambos apresentam resultados muito semelhantes.

Por fim, percebe-se que o gráfico da figura 4.9, referente ao torque de *cogging*, apresenta no eixo x apenas o ângulo mecânico de 0° a 20° . Esse intervalo é resultado do arco de comprimento dos ímãs permanentes, que correspondem a 140° elétricos, conforme indicado na Tabela 4.2, esse valor equivale a 70° mecânicos, podendo ser obtido por meio da Equação 2.11. Ou seja, cada polo de ímã permanente abrange 70° do rotor. Dessa maneira, o torque de *cogging* exerce sua influência apenas em um intervalo de 20° mecânicos, onde nenhum dos ímãs permanentes cobre.

$$\alpha = \frac{ED}{p} \quad (4.1)$$

$$\alpha = \frac{140}{2} \quad (4.2)$$

$$\alpha = 70^\circ \quad (4.3)$$

Outra característica relevante dessa curva é que, em determinados momentos, o torque de *cogging* atua a favor da rotação do sistema, enquanto em outros momentos ele se opõe ao movimento rotacional.

4.1.3 Perdas no modelo 1

As perdas totais de $487,5 \text{ W}$ obtidas na tabela 4.4, podem ser subdivididas a seguir, em 4.5.

Tabela 4.5 – Modelo 1 - Resultados de perdas da simulação de operação do motor

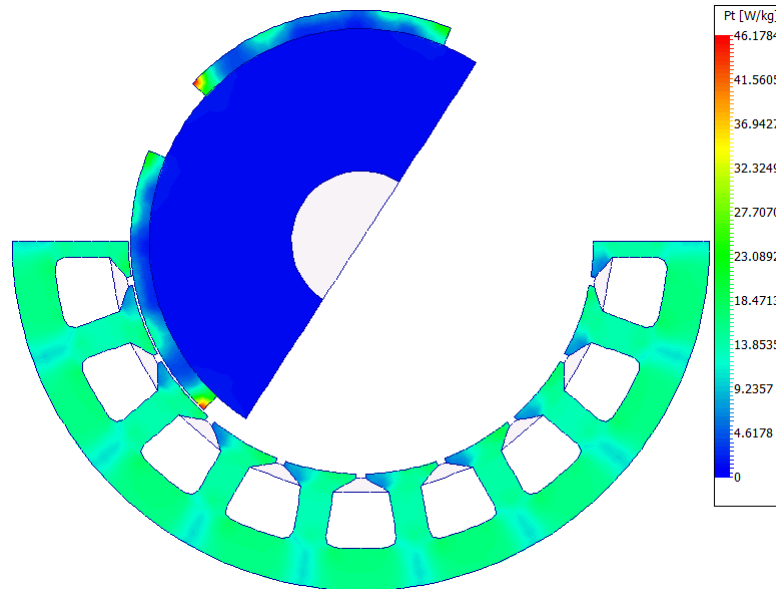
Parâmetros	Valores	Unidade de medida
Perdas no cobre	399	watt
Perdas no ímã	5,196	watt
Perdas no estator	77,24	watt
Perdas no rotor	0,679	watt
Perdas pela resistência do ar	0,1291	watt
Perdas por atrito	5,28	watt
Perdas no eixo	0	watt

Fonte: Autor, 2025.

Na figura 4.10, verifica-se a densidade de perdas por histerese e correntes de Foucault. Nota-se que, embora as perdas totais no estator sejam maiores do que nos ímãs, em alguns pontos específicos, os ímãs apresentam maior densidade de perdas. Isso ocorre porque a medida é realizada em W/kg , o que faz com que, em suas extremidades, os ímãs não

segmentados apresentem maiores densidades de perdas quando comparados aos estatores laminados.

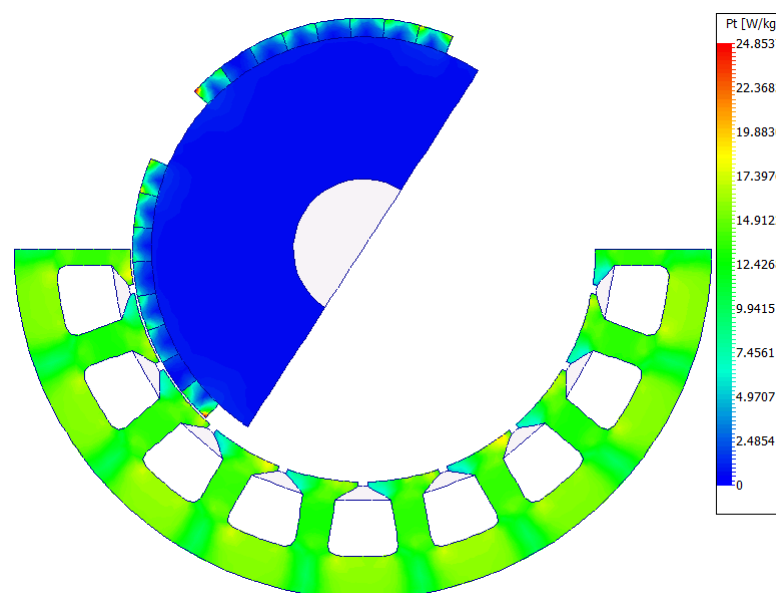
Figura 4.10 – Modelo 1 - Densidade de perdas por histerese e correntes de Foucault.



Fonte: Autor, 2025.

Para melhor entendimento a respeito das perdas por corrente de Foucault, o mesmo motor foi simulado, porém com seus ímãs segmentados em 8 partes iguais, figura 4.11. as perdas nos ímãs reduziram de 5,196 W para 2,356 W.

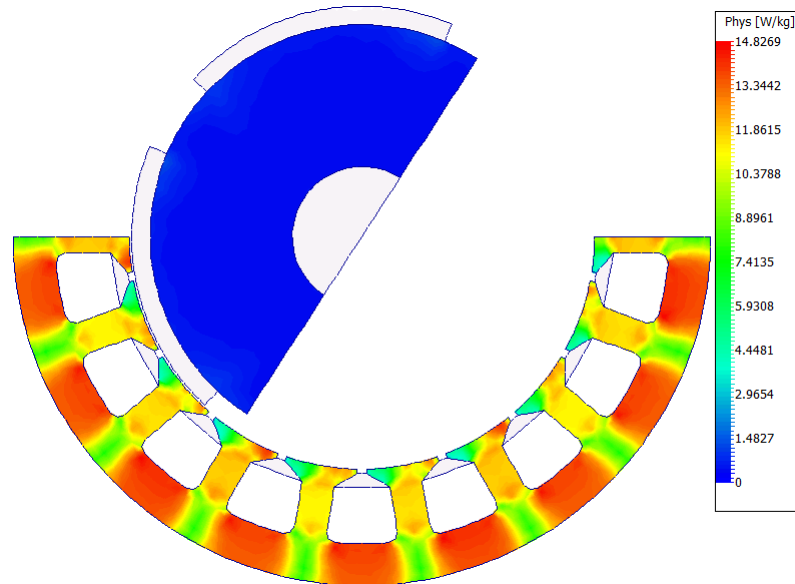
Figura 4.11 – Modelo 1 - Densidade de perdas por histerese e correntes de Foucault, ímãs segmentados.



Fonte: Autor, 2025.

Separando as perdas por histerese, obtém-se a figura 4.12. Essas perdas se concentram no núcleo do estator, onde a quantidade de material ferromagnético é maior em comparação aos dentes do estator. Dessa forma, o constante processo de magnetização e desmagnetização provoca essas perdas.

Figura 4.12 – Modelo 1 - Densidade de perdas por histerese.

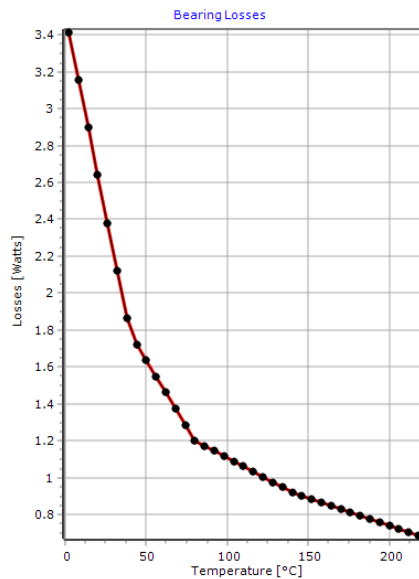


Fonte: Autor, 2025.

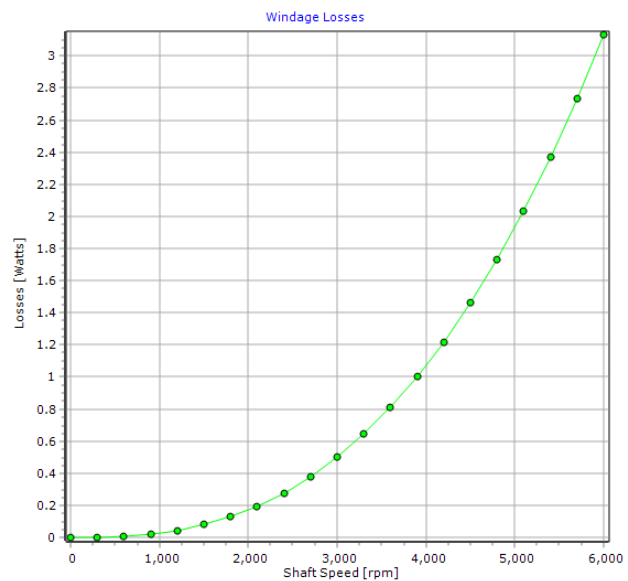
A respeito das perdas mecânicas, as perdas no rolamento, que compõem as perdas por atrito, variam de acordo com a temperatura do sistema. Para a velocidade de 1800 rpm, esse comportamento pode ser observado na curva 4.13a. Todavia, as perdas devido à resistência do ar variam conforme a velocidade de rotação da máquina, como ilustrado na figura 4.13b.

Figura 4.13 – Modelo 1 - Perdas mecânicas

(a) Perdas no rolamento x Temperatura do sistema.



(b) Perdas pela resistência do ar x Velocidade



Fonte: Autor, 2025.

4.1.4 Temperatura no modelo 1

Na simulação de temperatura é necessário escolher uma carcaça que irá envolver o motor, ela tem a função de proteger o motor contra choque mecânicos, como quedas e batidas, além de serem os principais auxiliares para resfriamento dessas máquinas. Primeiramente, foi escolhida a carcaça de modelo *Housing Fins*, ou aletas de resfriamento.

Para prosseguir com a simulação da carcaça, alguns parâmetros são necessários; os utilizados estão descritos na tabela 4.6.

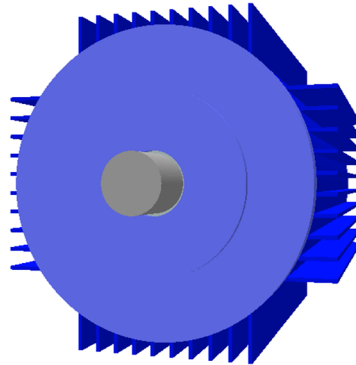
Tabela 4.6 – Modelo 1 - Parâmetros físicos de entrada da carcaça

Parâmetros da carcaça	Entradas	Unidade de medida
Comprimento da aleta	10	Milímetro
Largura da aleta	2	Milímetro
Quantidade de aletas por extremidade	10	Não há

Fonte: Autor, 2025.

A visualização 3D do motor envolto pela carcaça pode ser vista na figura 4.14.

Figura 4.14 – Modelo 1 - Motor com carcaça *Housing Fins*.



Fonte: Autor, 2025.

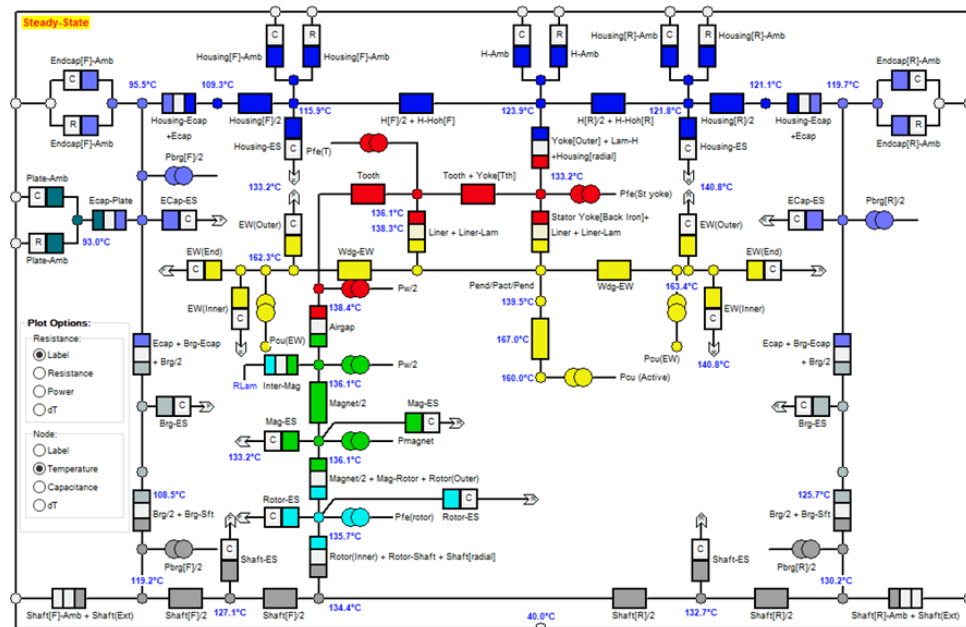
A temperatura de cada componente do sistema em estado estacionário durante uma operação sob carga foi simulada, e o respectivo esquema encontra-se nas figuras 4.15 e 4.16. Cada cor corresponde a uma parte do motor: vermelho refere-se ao estator, azul-claro ao rotor, verde aos ímãs permanentes, amarelo aos enrolamentos, azul-escuro à carcaça, lilás à tampa de extremidade que suporta os rolamentos, cinza-azulado à placa frontal do motor, cinza-claro aos rolamentos e cinza-escuro ao eixo.

A figura 4.15 apresenta um esquemático mais detalhado, mas apenas da metade superior da máquina, da metade do eixo para cima. As nomenclaturas em inglês se referem a partes específicas da máquina. Por exemplo, ao visualizar as formas em amarelo, teremos as temperaturas nos enrolamentos de forma detalhada. Na parte esquerda, sinalizada com um “F” de *fore*, do inglês, dianteira, referem-se aos componentes do enrolamento localizados na parte dianteira do motor, assim como a sigla “EW” de *End Winding*, do inglês, extremidade dos enrolamentos.

Os enrolamentos apresentam a temperatura mais elevada, o que já era esperado devido à dissipação de calor pelo efeito Joule. Observa-se também que a temperatura na parte traseira do motor é ligeiramente superior à da parte dianteira. Isso ocorre devido à presença da placa cinza-azulada na parte dianteira, que auxilia, ainda que de forma sutil, na dissipação de calor.

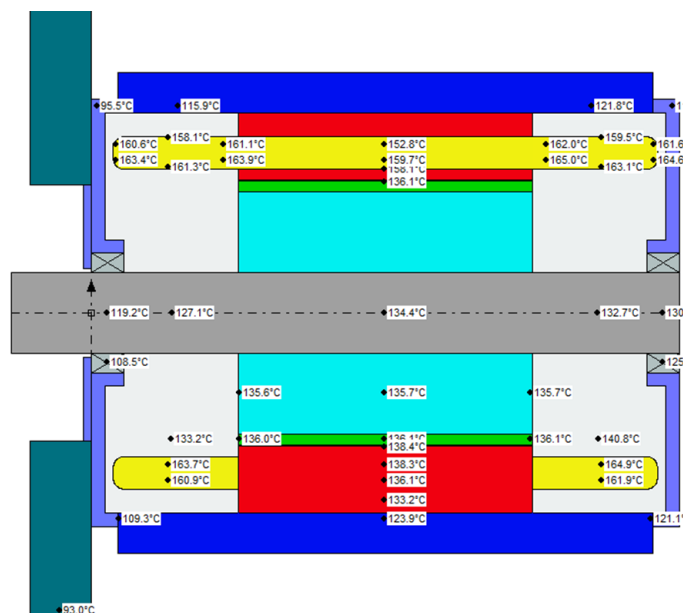
Por fim, conclui-se o estudo térmico visualizando a variação de temperatura em um pequeno segmento do estator envolvendo a ranhura e os enrolamentos. Na figura 4.17, é visto que, quanto mais próximos os enrolamentos, maior a temperatura.

Figura 4.15 – Modelo 1 - Esquemático superior simulado em estado estacionário com respectivas temperaturas.



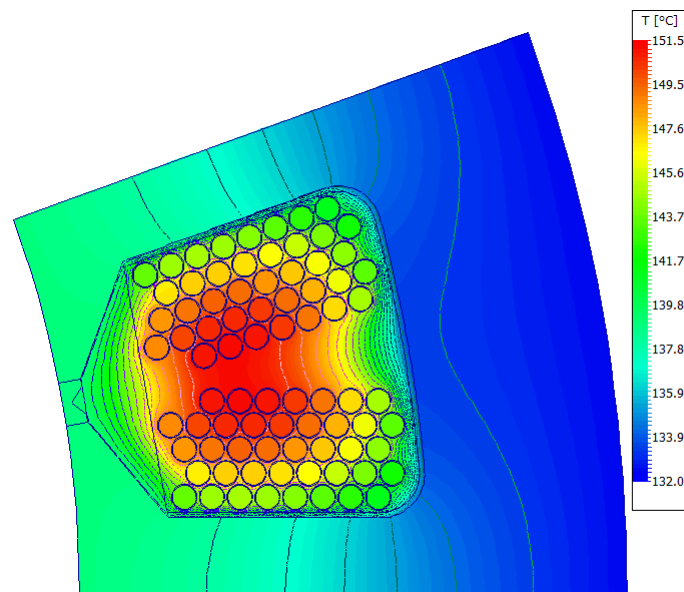
Fonte: Autor, 2025.

Figura 4.16 – Modelo 1 - Visão axial do motor com carcaça e respectivas temperaturas.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 4.17 – Modelo 1 - Temperatura em um pequeno segmento do estator.

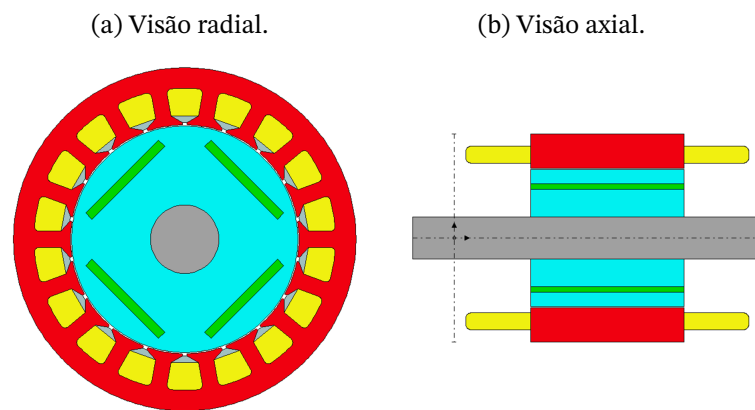


Fonte: Autor, 2025.

4.2 Motor síncrono de fluxo radial de ímãs permanentes embutidos em superfícies - IPM

Para o segundo modelo, manteve-se a maior parte das características físicas do primeiro modelo SPM. Todavia, a topologia adotada foi a de ímãs permanentes embutidos em superfície simples, como pode ser visualizada nas figuras 4.18a e 4.18b.

Figura 4.18 – Modelo 2 - Motor síncrono de fluxo radial de ímãs permanentes embutidos em superfícies.



Fonte: Autor, 2025.

Através da tabela 4.7 percebe-se que os parâmetros físicos do estator do modelo 2 são idênticos aos do modelo 1.

Tabela 4.7 – Modelo 2 - Parâmetros físicos de entrada do estator

Parâmetros do estator	Entradas	Unidade de medida
Número de Ranhuras	18	Não há
Diâmetro externo	150	Milímetro
Diâmetro interno	100	Milímetro
Largura do dente	7	Milímetro
Profundidade da ranhura	16	Milímetro
Angulação de canto da ranhura	2	Radiano
Profundidade da ponta do dente	1	Milímetro
Abertura da ranhura	2	Milímetro
Ângulo da ponta do dente	30	grau
Comprimento	110	Milímetro

Fonte: Autor, 2025.

Já em relação aos parâmetros físicos do rotor, novas características devem ser definidas em função da topologia adotada. Sendo elas o comprimento do ímã e a largura da ponte, cujos valores estão descritos na tabela 4.8.

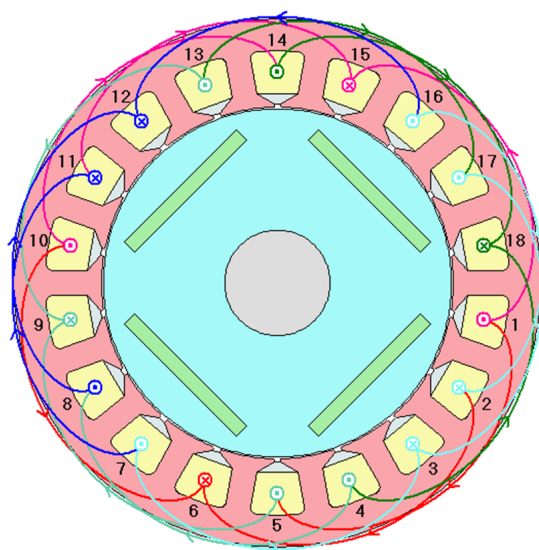
Tabela 4.8 – Modelo 2 - Parâmetros físicos de entrada do rotor

Parâmetros do rotor	Entradas	Unidade de medida
Número de polos	4	Não há
Largura do ímã	4	Milímetro
Comprimento do ímã	45	Milímetro
Segmentos do ímã	1	Não há
Largura da ponte	2	Milímetro
Arco do ímã [ED]	140	grau elétrico
Diâmetro do rotor	99	Milímetro
Comprimento do gap de ar	1	Milímetro
Diâmetro do eixo	30	Milímetro
Comprimento do rotor	110	Milímetro
Comprimento do ímã	110	Milímetro

Fonte: Autor, 2025.

A disposição dos circuitos e enrolamentos segue o mesmo padrão quando comparada ao modelo 1, cada fase é composta por dois conjuntos de enrolamentos conectados em paralelo e suas conexões são orientadas em modo estrela (Y), ilustra-se na figura 4.19. Como as ranhuras não foram alteradas e nem a disposição dos enrolamentos em cada uma delas, as figuras 4.3 e 4.4 do modelo 1 são idênticas ao simulado no modelo 2.

Figura 4.19 – Modelo 2 - Motor síncrono de fluxo radial de ímãs permanentes embutidos em superfícies, disposição dos enrolamentos por circuito de fase.



Fonte: Autor, 2025.

Para iniciar as simulações, alguns ajustes com relação aos parâmetros de entrada foram realizados, conforme tabela 4.9

Tabela 4.9 – Modelo 2 - Parâmetros de entrada da simulação

Parâmetros	Entradas	Unidade de medida
Velocidade de operação	1800	Rotações por minuto
Tensão da alimentação CC	380	volt
Corrente de pico da alimentação	40	ampere

Fonte: Autor, 2025.

4.2.1 Resultados do modelo 2

O seguinte modelo apresentou os resultados descritos na tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Modelo 2 - Resultados da simulação de operação do motor

Parâmetros	Valores	Unidade de medida
Valor médio da corrente de alimentação	14,88	ampere
Corrente de Linha (RMS)	28,28	ampere
Frequência fundamental	60	Hertz
Torque médio	22,251	newton-metro
<i>Ripple</i> de torque de <i>cogging</i>	0,31895	newton-metro
Potência de entrada	5654,1	watt
Perdas totais sob carga	1552,7	watt
Potência de saída	4101,4	watt
Eficiência do sistema	72,538	Porcentagem
Torque no eixo	21,758	newton-metro
Fator de potência indutivo	0,45217	Não há
Ângulo de carga	50,145	grau elétrico

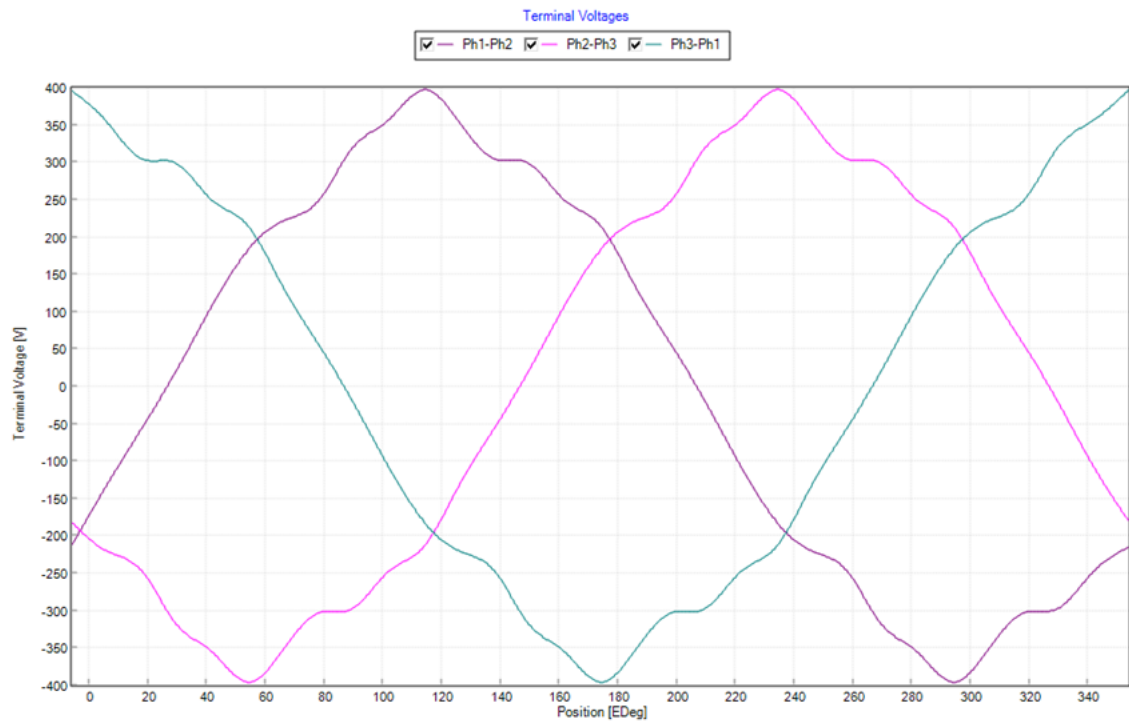
Fonte: Autor, 2025.

Verifica-se que o modelo 2 (72,54%), com essas características físicas, apresenta uma eficiência significativamente inferior à do modelo 1 (91,58%). Todavia, o modelo 2 demonstra menor influência do torque de *cogging*. Embora esse torque já seja reduzido no modelo 1, o modelo 2 apresenta um valor aproximadamente dez vezes menor, o que proporciona uma rotação mais fluida — ou seja, com menos vibrações e ruídos — característica essencial para determinadas aplicações industriais e automobilísticas.

Com relação à frequência, pode-se afirmar que o resultado obtido foi, mais uma vez, o esperado, uma vez que apenas a velocidade de rotação e a quantidade de ímãs permanentes a influenciam nesta.

Para melhor visualização das tensões terminais ao longo de diferentes angulações, têm-se o seguinte gráfico 4.20.

Figura 4.20 – Modelo 2 - Tensão terminal de linha x grau elétrico.

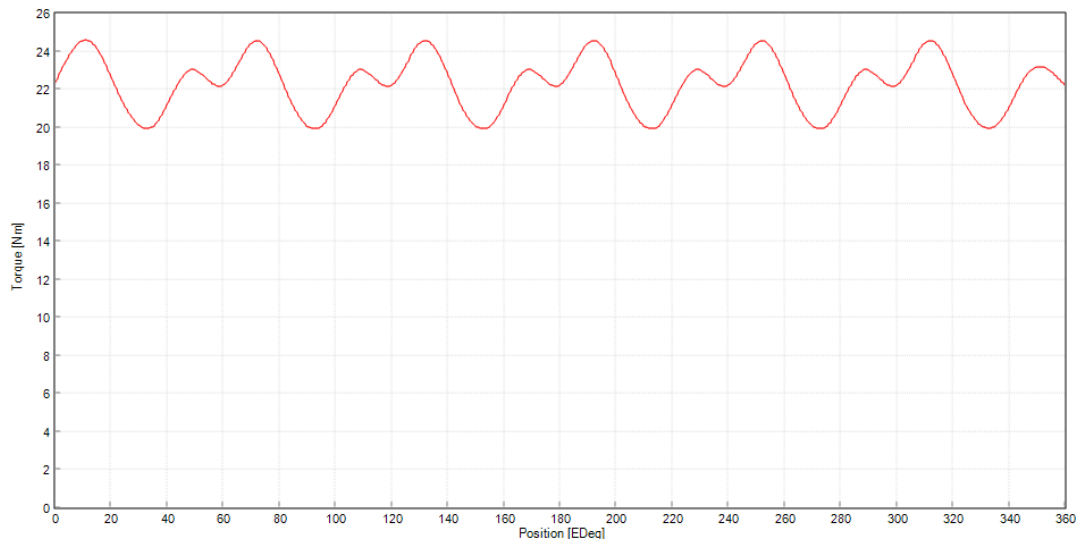


Fonte: Autor, 2025.

4.2.2 Torque no modelo 2

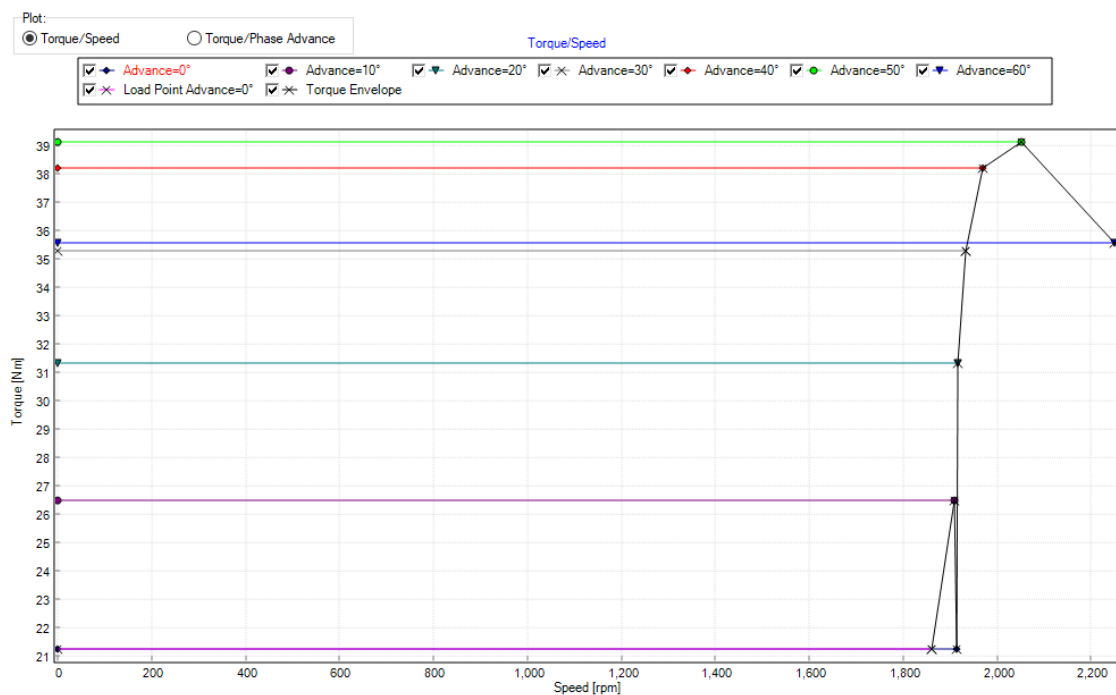
O comportamento do torque resultante na máquina do modelo 2 para a velocidade de 1800 rpm é ilustrado no gráfico 4.21. Todavia, em diferentes velocidades e diferentes ângulos de avanço da corrente com relação ao fluxo obteremos diferentes torques, consoante ao ilustrado na figura 4.22.

Figura 4.21 – Modelo 2 - Torque x grau elétrico.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 4.22 – Modelo 2 - Torque para diferentes ângulos de avanço x Velocidade.



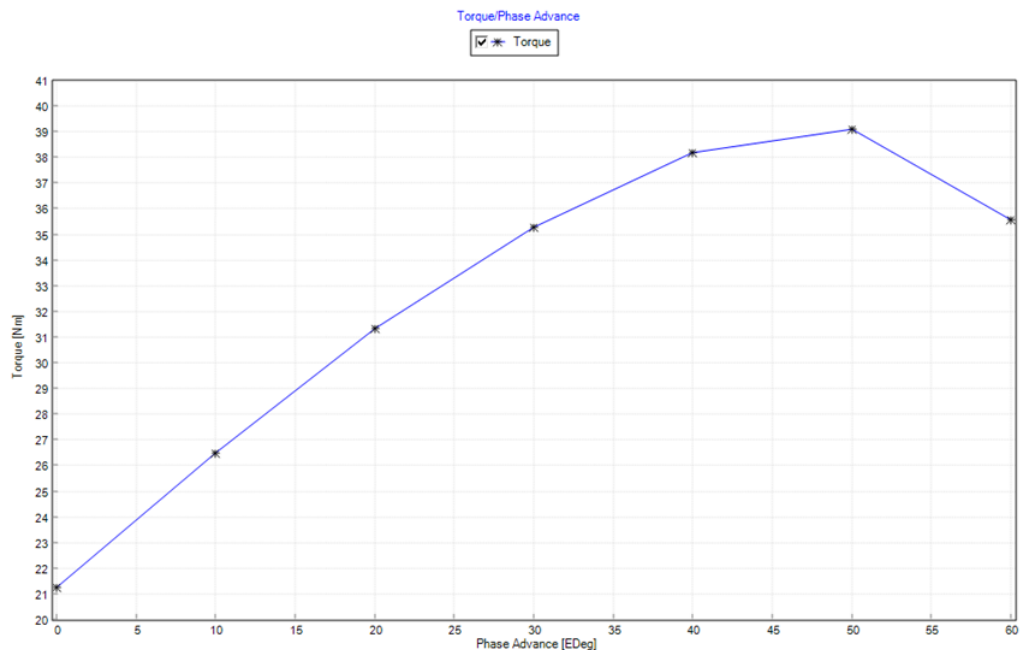
Fonte: Autor, 2025.

Na figura 4.22, a curva rosa entre os pontos de 21 e 22 Nm representa a simulação do modelo 2 sob carga, com ângulo de avanço de corrente igual a 0° , conforme legenda, esse resultado equivale somente a 77,3% do torque resultante no modelo 1. Ademais, verifica-se que aquele torque permanece constante até a velocidade de 1913 rpm, diferentemente do modelo 1 que permanecia até 2043 rpm. Mais uma vez, para que essa velocidade seja atingida, é necessária a alteração da frequência de operação do motor, o que pode ser realizado por meio de um inversor de frequência. Observa-se ainda, na comparação entre a figura 4.22 e a figura 4.7, que os *torque envelopes* estão praticamente espelhados. Isso indica que o comportamento do torque em função da velocidade e do ângulo de avanço apresenta tendência inversa nos modelos 1 e 2.

Na figura 4.7, o torque tende a aumentar de 0° a 20° e, em seguida, a diminuir de 20° a 60° . Já na figura 4.22, o torque aumenta de 0° a 50° e decresce de 50° a 60° . Ainda na figura 4.7, observa-se que para o ângulo correspondente de 50° tem-se o torque máximo de 39,093 Nm, aproximadamente 10 Nm maior que o máximo do modelo 1.

Para melhor ilustração, a figura 4.23 apresenta a relação entre torque e ângulo de avanço apenas.

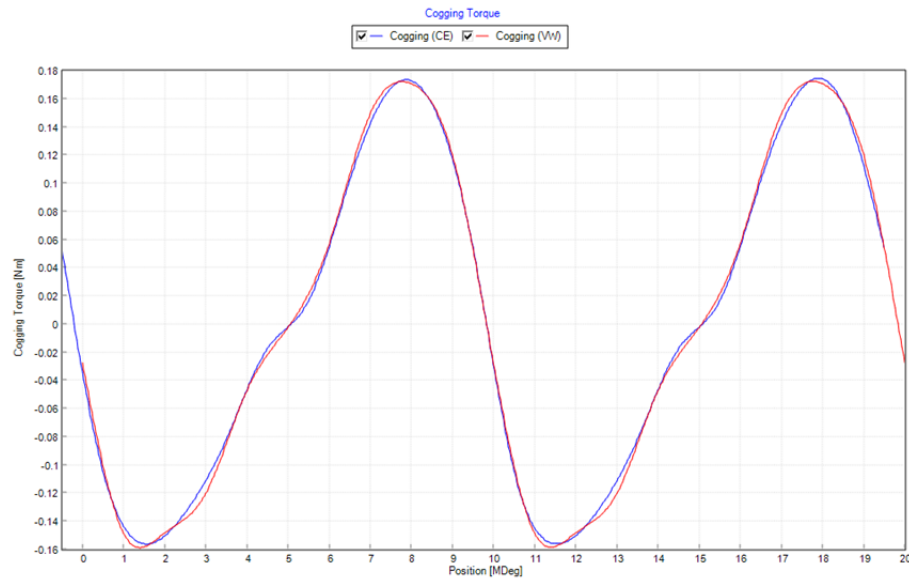
Figura 4.23 – Modelo 2 - Torque x Ângulos de avanço da corrente.



Fonte: Autor, 2025.

Por fim, tem-se a figura 4.24, referente ao torque de *cogging*, que, mais uma vez, apresenta no eixo x apenas o ângulo mecânico de 0° a 20° . Esse intervalo resulta do arco de comprimento dos ímãs permanentes, que correspondem a 140° elétricos, conforme indicado na tabela 4.8, uma vez que esse parâmetro não foi alterado em relação ao modelo 1.

Figura 4.24 – Modelo 2 - Torque de *cogging* x grau mecânico.



Fonte: Autor, 2025.

Outra característica relevante dessa curva é seu comportamento bastante semelhante ao da figura 4.9, referente ao modelo 1, porém com valores significativamente menores em termos de magnitude de torque.

4.2.3 Perdas no modelo 2

As perdas em operação sob carga do modelo 2 totalizaram 1553 W, conforme descrito na tabela 4.10, valor 3,18 vezes maior do que as perdas totais no modelo 1. Essas perdas estão subdivididas a seguir, na tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Modelo 2 - Resultados de perdas da simulação de operação do motor

Parâmetros	Valores	Unidade de medida
Perdas no cobre	1448	watt
Perdas no ímã	2,382	watt
Perdas no estator	87,86	watt
Perdas no rotor	9,568	watt
Perdas pela resistência do ar	0,1291	watt
Perdas por atrito	5,28	watt
Perdas no eixo	0	watt

Fonte: Autor, 2025.

Na figura 4.25, ilustra-se a densidade de perdas por histerese e correntes de Foucault em uma seção do motor. Nota-se que as perdas no rotor são mais significativas quando comparadas ao modelo anterior, pois o rotor agora está mais próximo dos enrolamentos de armadura. Outro ponto a ser observado são as perdas nos ímãs, que são menores, mesmo não estando segmentados, pois agora estão embutidos no rotor e mais distantes dos enrolamentos.

Com essas duas alterações, observamos uma densidade de perdas aparentemente maior no estator. Todavia, a unidade de medida se aproxima muito quando comparada à figura 4.10 do modelo 1.

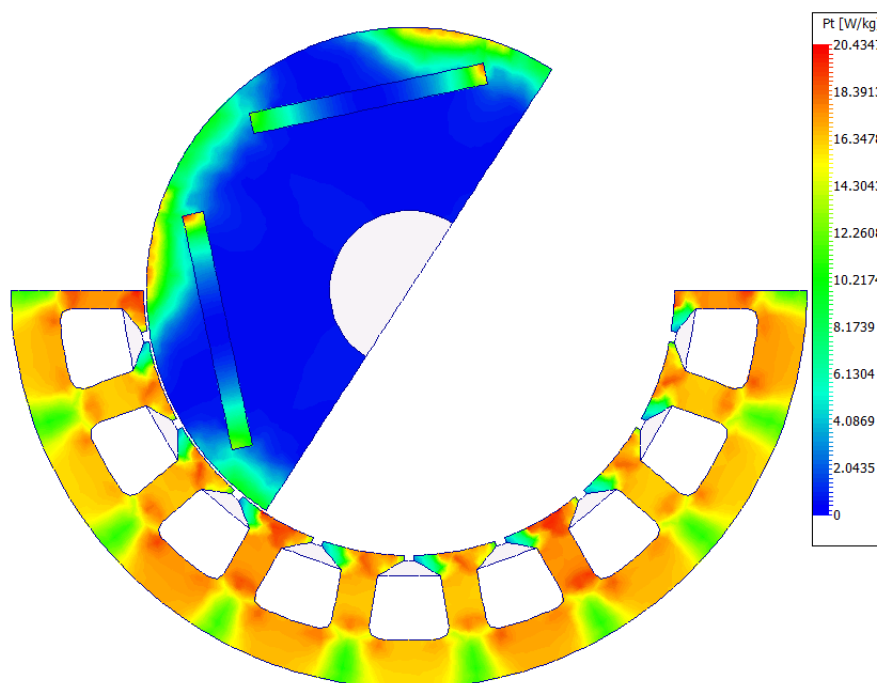
Simulando as perdas por histerese, obtém-se a figura 4.26. Essas perdas se concentram no núcleo do estator; no entanto, no modelo de ímãs embutidos, a extremidade externa do rotor se aproxima consideravelmente dos enrolamentos de armadura, resultando também na presença de perdas por histerese nele.

Outro ponto importante a ser citado é que tanto o rotor quanto o estator são formados pelo material *M350-50A*, conforme o modelo 1, caracterizado pela sua estrutura laminada que auxilia na redução das perdas por histerese e correntes parasitas.

Para uma melhor fundamentação a respeito dos materiais, alterou-se o material do estator de *M350-50A* para *M1000-65A*, figura 4.27, a fim de analisar suas propriedades, como eficiência e adequação em relação ao sistema simulado.

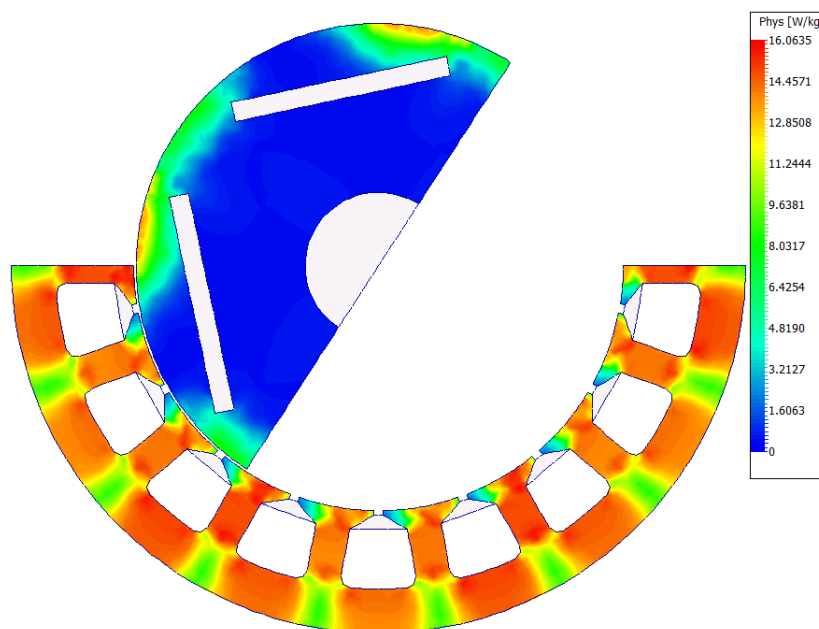
Ao comparar as figuras 4.26 e 4.27, percebe-se uma maior concentração de perdas por histerese no estator da figura correspondente ao material *M1000-65A*. Todavia, o rotor, em ambas as situações, manteve as mesmas perdas, pois é composto pelo mesmo material.

Figura 4.25 – Modelo 2 - Densidade de perdas por histerese e correntes de Foucault.



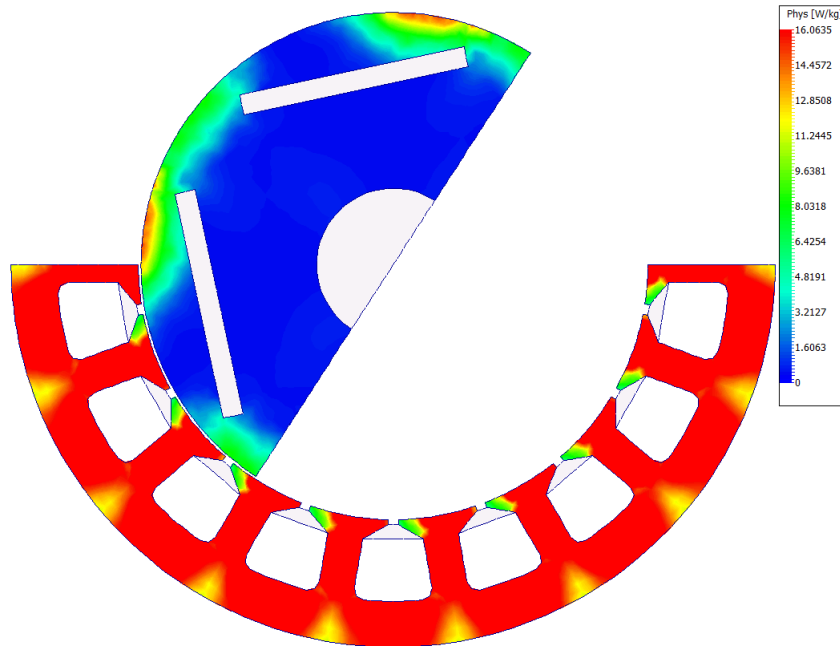
Fonte: Autor, 2025.

Figura 4.26 – Modelo 2 - Densidade de perdas por histerese.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 4.27 – Modelo 2 - Densidade de perdas por histerese, estator composto pelo material *M1000-65A*.



Fonte: Autor, 2025.

A máquina com o material *M1000-65A* apresentou perdas totais no estator de 122,2 W, valor 139% superior ao da máquina com *M350-50A*, conforme apresentado na tabela 4.11. Embora a maior diferença de perdas se destaque nas perdas por histerese, também há um aumento nas perdas por correntes de Foucault, devido à menor resistividade desse material. Isso resulta em correntes parasitas mais elevadas para a mesma diferença de potencial a que o estator está submetido em ambas as simulações.

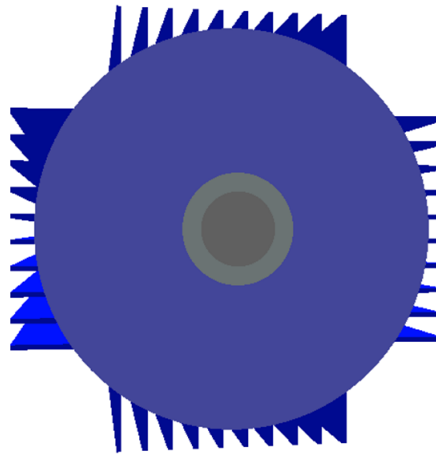
Apesar disso, a utilização do *M1000-65A* é mais adequada para máquinas de potência mais elevada, pois esse material apresenta uma maior polarização magnética mínima, ou seja, exige maior força magnética para sua magnetização e desmagnetização. Por fim, a respeito das perdas mecânicas, elas se mantiveram as mesmas quando comparadas ao modelo 1, conforme as tabelas 4.5 e 4.11, e figuras 4.13a e 4.13b.

4.2.4 Temperatura no modelo 2

Como visto na tabela 4.9, a corrente de pico utilizada no modelo 2 é de 40 A, resultando em uma corrente RMS de linha e fase equivalente a 28,28 A, valor significativamente mais elevado do que no modelo 1. Espera-se, portanto, uma temperatura muito maior na simulação desse modelo.

Primeiro foi feita a avaliação da temperatura com a mesma carcaça do modelo 1, tabela 4.6. A visualização 3D do motor envolto pela carcaça pode ser vista na figura 4.28.

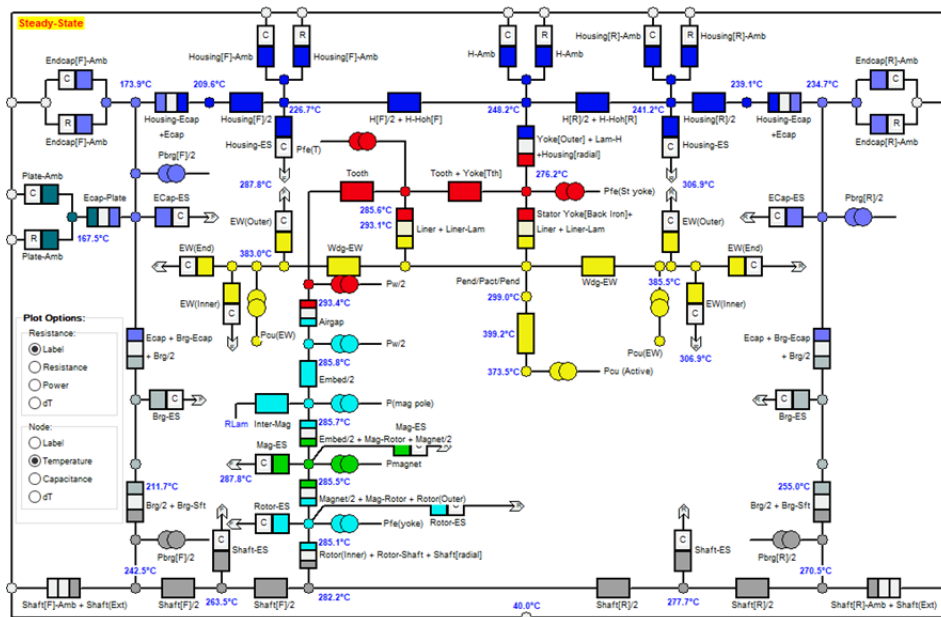
Figura 4.28 – Modelo 2 - Motor com carcaça *Housing Fins*.



Fonte: Autor, 2025.

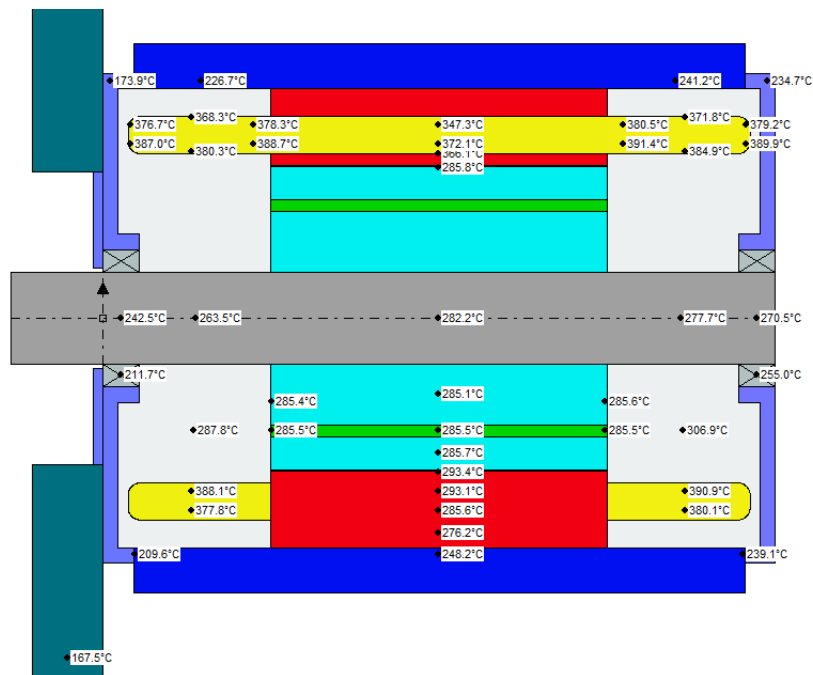
A temperatura de cada componente do sistema em estado estacionário durante uma operação sob carga é ilustrada nas figuras 4.29 e 4.30. Cada cor corresponde a uma parte do motor: vermelho refere-se ao estator, azul-claro ao rotor, verde aos ímãs permanentes, amarelo aos enrolamentos, azul-escuro à carcaça, lilás à tampa de extremidade que suporta os rolamentos, cinza-azulado à placa frontal do motor, cinza-claro aos rolamentos e cinza-escuro ao eixo. Nota-se que a figura 4.29 representa apenas a metade superior da máquina.

Figura 4.29 – Modelo 2 - Esquemático simulado em estado estacionário com respectivas temperaturas.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 4.30 – Modelo 2 - Visão axial do motor com carcaça *Housing Fins*.

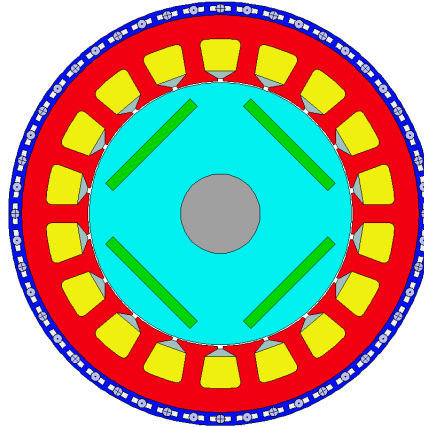


Fonte: Autor, 2025.

Verifica-se em ambas figuras 4.29 e 4.30, que a temperatura dessa máquina, para esses parâmetros físicos e elétricos, é muito elevada. Logo, essa carcaça simples não seria suficiente para resfriar o motor durante sua operação, tornando inviável seu funcionamento.

Em decorrência desse resultado, foi avaliada uma possibilidade alternativa de carcaça para auxiliar no resfriamento, a *Water Jacket*. Essa carcaça é composta por uma ‘jaqueta’ externa, ilustrada na figura 4.31, que é um compartimento que circunda o motor, permitindo a circulação de água ou outro fluido refrigerante. O fluido circula por canais ou tubos na carcaça, retirando o calor do motor e transferindo-o para o sistema de resfriamento externo. A água ou fluido refrigerante absorve o calor do motor, com o intuito de manter a temperatura do equipamento dentro de limites seguros.

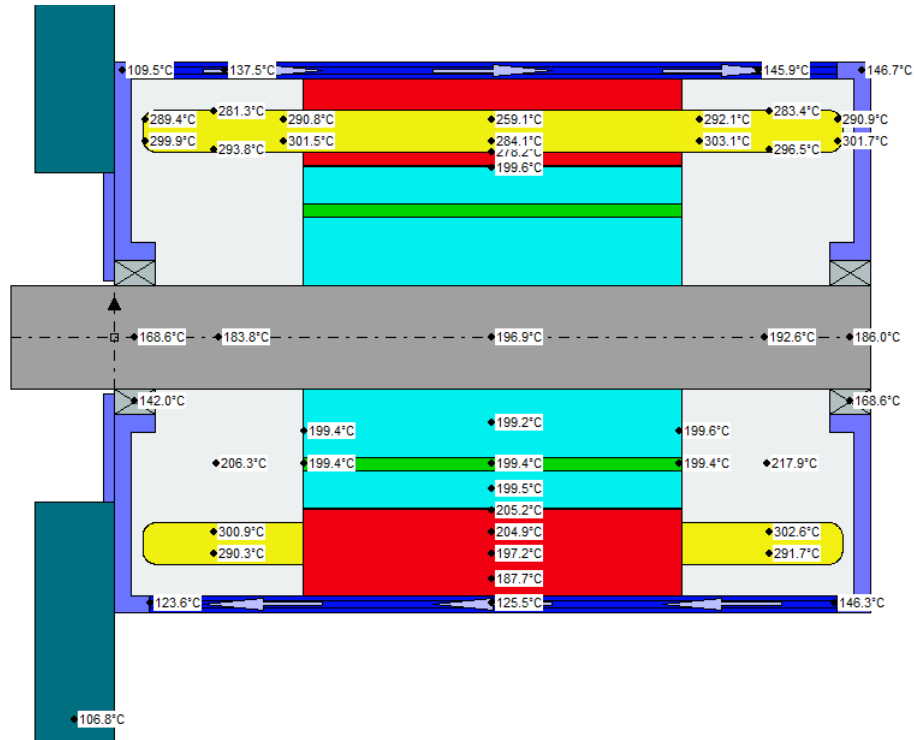
Figura 4.31 – Modelo 2 - Visão radial do motor com carcaça *Water Jacket*.



Fonte: Autor, 2025.

Conclui-se que o resultado obtido na figura 4.32, com essa nova carcaça, ainda não é suficiente para a operação dessa máquina sob esse nível de corrente, tornando necessária a redução desse valor ou a alteração dos fios de cobre presentes no enrolamento para fios de maior diâmetro. Todavia, é perceptível a eficiência dessa nova carcaça quando comparada com a anterior, reduzindo, por exemplo, a temperatura média nos enrolamentos de $371,1^{\circ}\text{C}$ para $284,1^{\circ}\text{C}$, uma diferença de 87°C .

Figura 4.32 – Modelo 2 - Visão axial do motor com carcaça *Water Jacket* e suas temperaturas.



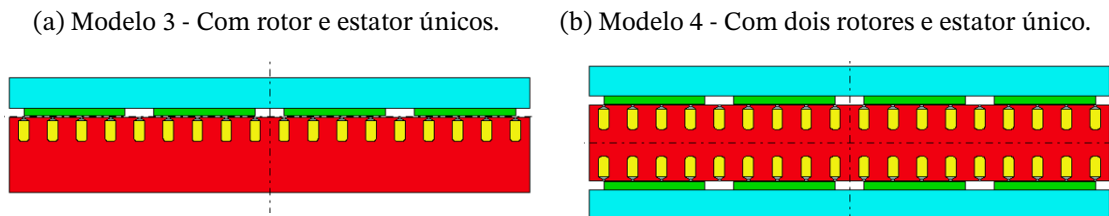
Fonte: Autor, 2025.

4.3 Motores síncronos de fluxo axial: rotor e estator únicos; e dois rotores com magnetos NN e estator único do tipo S (Torus-S com magnetos NN) - AFPM

A seguinte seção do capítulo apresentará duas topologias distintas, totalizando dois modelos: um motor síncrono de fluxo axial com rotor e estator únicos; e um motor síncrono de fluxo axial com dois rotores e estator único.

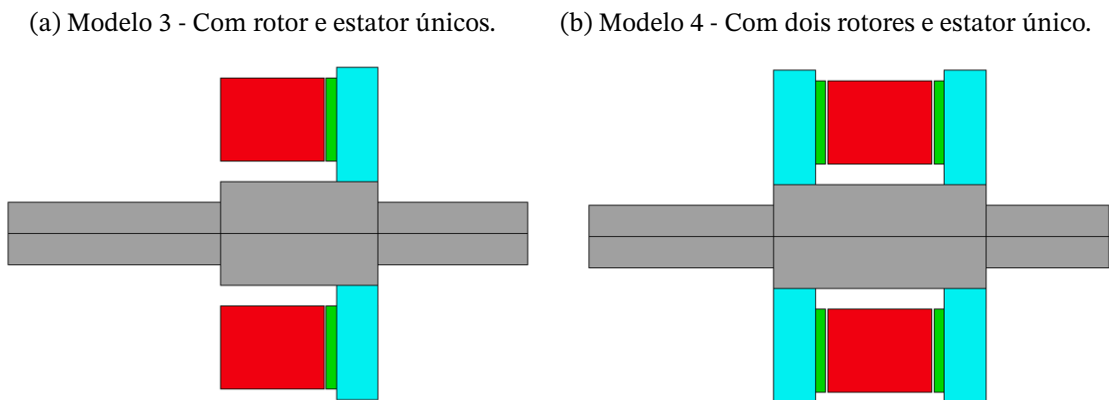
O modelo de número 3 é o de rotor e estator únicos, a visualização linear desse motor é ilustrada na figura 4.33a. Já o modelo 4 é o de dois rotores e estator único, ilustrado na figura 4.33b. As ilustrações axiais desses motores encontram-se nas figuras 4.34a e 4.34b respectivamente.

Figura 4.33 – Modelos 3 e 4 - Motores síncronos de fluxo axial, visão linear.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 4.34 – Modelos 3 e 4 - Motores síncronos de fluxo axial, visão axial.



Fonte: Autor, 2025.

Parte das características físicas dos modelos 1 e 2 foram mantidas. Entretanto, por serem topologias muito diferentes, houve a necessidade de mudanças em algumas características, enquanto outras foram acrescentadas. Essas alterações podem ser verificadas nas tabelas 4.12 e 4.13.

Observa-se que as características físicas do modelo 4, em relação ao modelo 3, projetam-se para ambos os lados. Assim, o rotor adicional presente no modelo 4 é apenas o espelhamento do rotor único presente no modelo 3, mantendo todos os parâmetros físicos, com a única alteração nos lados de referência, como ocorre também com as ranhuras e dentes do estator. Ou seja, será considerado um total de quatro polos de ímãs permanentes nas características físicas do modelo 4, mas, conforme ilustrado na figura 4.33b, verifica-se a presença de oito polos, sendo quatro em cada rotor. Para as simulações seguintes, deve-se compreender cada lado de maneira independente.

Tabela 4.12 – Modelos 3 e 4 - Parâmetros físicos de entrada do estator

Parâmetros do estator	Entradas	Unidade de medida
Número de Ranhuras	18	Não há
Diâmetro externo	150	Milímetro
Diâmetro interno	70	Milímetro
Largura do dente	7	Milímetro
Profundidade da ranhura	16	Milímetro
Angulação de canto da ranhura	2	Radiano
Profundidade da ponta do dente	1	Milímetro
Abertura da ranhura	2	Milímetro
Ângulo da ponta do dente	30	grau
Comprimento	50	Milímetro

Fonte: Autor, 2025.

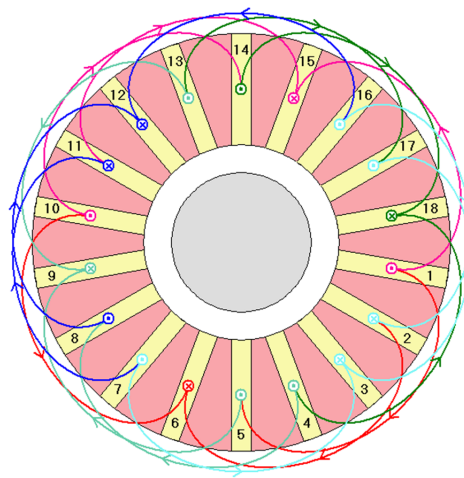
Tabela 4.13 – Modelos 3 e 4 - Parâmetros físicos de entrada do rotor

Parâmetros do rotor	Entradas	Unidade de medida
Número de polos	4	Não há
Comprimento do gap de ar	1	Milímetro
Comprimento do ímã	5	Milímetro
Comprimento do rotor	20	Milímetro
Comprimento do motor	220	Milímetro
Segmentos do ímã	1	Não há
Arco do ímã [ED]	140	grau elétrico
Diâmetro do rotor	160	Milímetro
Deslocamento da profundidade do ímã	5	Milímetro
Profundidade do ímã	40	Milímetro

Fonte: Autor, 2025.

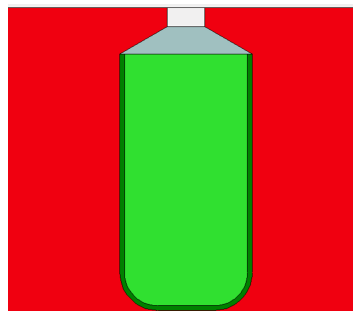
Mais uma vez, a disposição dos circuitos e enrolamentos em ambos os modelos 3 e 4 segue o mesmo padrão quando comparada ao modelo 1 e 2. 80 voltas por ranhura, sendo metade das voltas pertencentes a um circuito distinto da outra metade (podem ser da mesma fase, mas devem ser circuitos distintos), dois circuitos por fase, figura 4.35. Todavia, os diâmetros dos fios de cobre foram necessariamente reduzidos para $0,8 \text{ mm}^2$, devido ao estreitamento das ranhuras graças à topologia, verá-se adiante o impacto disso nas perdas. Ilustra-se na figura 4.36, uma ranhura dos modelos 3 e 4.

Figura 4.35 – Modelos 3 e 4 - Motores síncronos de fluxo axial de ímãs permanentes, disposição dos enrolamentos por circuito de fase.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 4.36 – Modelos 3 e 4 - Motores síncronos de fluxo axial de ímãs permanentes, representação de uma ranhura.



Fonte: Autor, 2025.

Para dar prosseguimento com as simulações, mantiveram-se os parâmetros de entrada idênticos ao modelo 1, conforme tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Modelos 3 e 4 - Parâmetros de entrada da simulação idênticos ao Modelo 1

Parâmetros	Entradas	Unidade de medida
Velocidade de operação	1800	Rotações por minuto
Tensão da alimentação CC	380	volt
Corrente de pico da alimentação	21	ampere

Fonte: Autor, 2025.

4.3.1 Resultados dos modelos 3 e 4

Os motores síncronos de fluxo axial apresentaram os resultados descritos na tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Modelo 3 e 4 - Resultados da simulação de operação do motor

Parâmetros	Modelo 3	Modelo 4	Unidade de medida
Valor médio da corrente de alimentação	9,63	19,27	ampere
Corrente de Linha (RMS)	14,85	29,7	ampere
Frequência fundamental	60	60	Hertz
Torque médio	16,885	33,781	newton-metro
Torque máximo	16,901	33,833	newton-metro
<i>Ripple</i> de torque de <i>cogging</i>	0,60314	1,2151	newton-metro
Potência de entrada	3659,7	7321,4	watt
Perdas totais sob carga	504,47	989,27	watt
Potência de saída	3155,2	6332,1	watt
Eficiência do sistema	86,216	86,488	Porcentagem
Torque no eixo	16,739	33,593	newton-metro
Fator de potência indutivo	0,96465	0,96631	Não há
Ângulo de carga	15,233	16,674	grau elétrico

Fonte: Autor, 2025.

Ao comparar os resultados de ambos os modelos, nota-se que o modelo 4, em relação às unidades físicas e elétricas, apresenta resultados muito próximos ao dobro dos resultados do modelo 3. Consoante a isso, interpreta-se que a máquina com dois rotores e estator único pode ser considerada como duas máquinas de rotor e estator únicos que compartilham o mesmo estator. Percebe-se que, ao somar os trabalhos dessas duas máquinas, obter-se-ia o trabalho da máquina de dois rotores e estator único.

Observa-se também um sutil aumento de eficiência do modelo 3 para o modelo 4, de 86,216% para 86,488%. Embora esse valor pareça insignificante para uma máquina elétrica

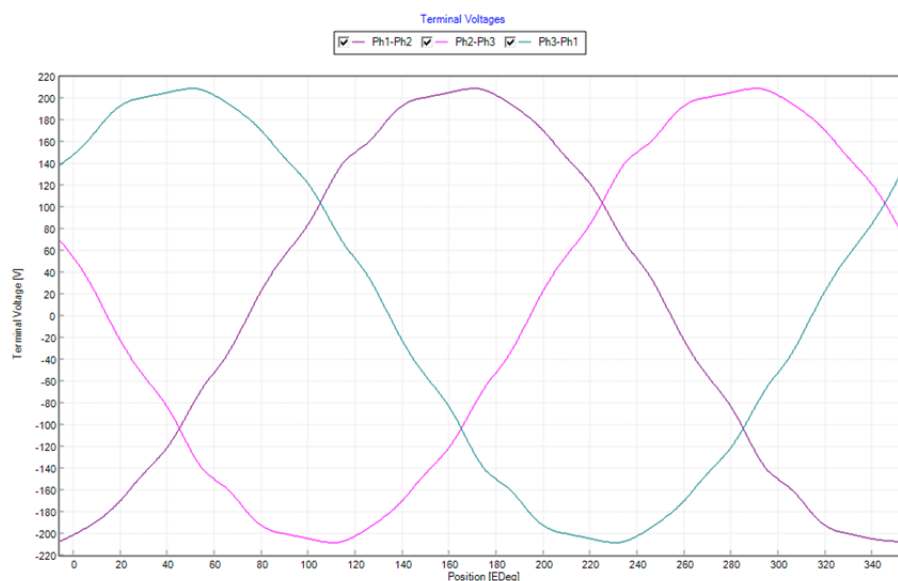
com essas especificações, ele representa um grande diferencial em máquinas elétricas de mais elevadas potências. O torque máximo das máquinas de fluxo axial é muito próximo ao torque médio de operação. Conclui-se que, apesar de apresentarem um torque eficiente, essas máquinas não conseguem estender sua operação tanto quanto as máquinas de fluxo radial (modelos 1 e 2).

Pelos valores apresentados nas tabelas, é nítido que as perdas totais sob carga no modelo 4 foram menores que o dobro das perdas no modelo 3. Por outro lado, a potência de entrada do modelo 4 é levemente maior que o dobro da potência de entrada do modelo 3. Essas pequenas diferenças resultaram no aumento da eficiência.

Com relação à frequência, pode-se afirmar novamente que o resultado obtido foi o esperado, uma vez que apenas a velocidade de rotação e a quantidade de ímãs permanentes a influenciam. Portanto, mesmo para máquinas de rotor duplo, deve-se considerar cada rotor de maneira independente, sendo necessário que possuam os mesmos parâmetros físicos (devem ser espelhados) para o funcionamento adequado da máquina. Por exemplo, a alteração na quantidade de polos de ímãs permanentes de um dos rotores da máquina no modelo 4 até pode ser realizada. Todavia, seria necessária a alteração da frequência de alimentação no estator deste mesmo lado, para que ela esteja em completa sincronia com a operação do outro rotor, visto que ambos devem operar na mesma velocidade para o funcionamento adequado da máquina. Esse tipo de alteração não é comum.

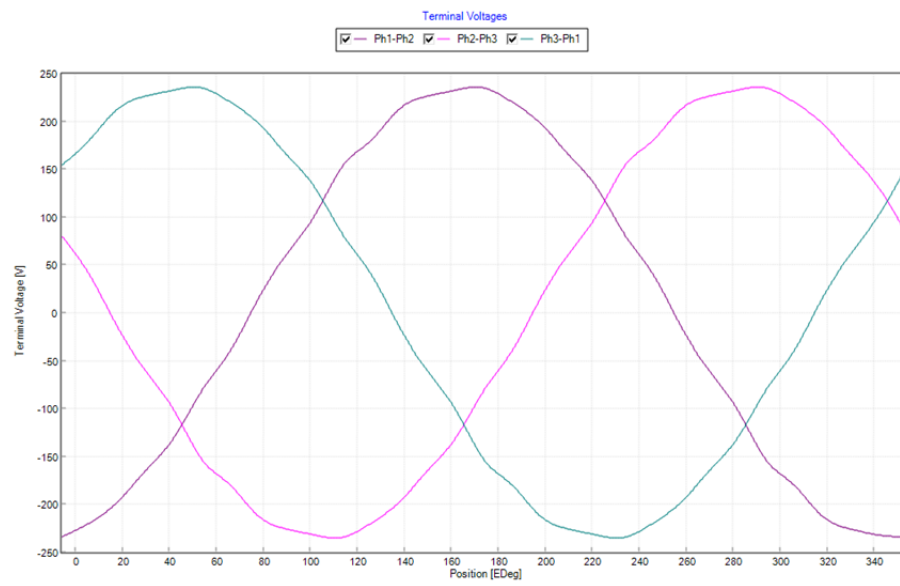
Para melhor compreensão e visualização das tensões terminais ao longo de diferentes angulações de ambos os modelos, apresentam-se os seguintes gráficos: 4.37 e 4.38.

Figura 4.37 – Modelo 3 - Tensão terminal de linha x grau elétrico.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 4.38 – Modelo 4 - Tensão terminal de linha x grau elétrico.

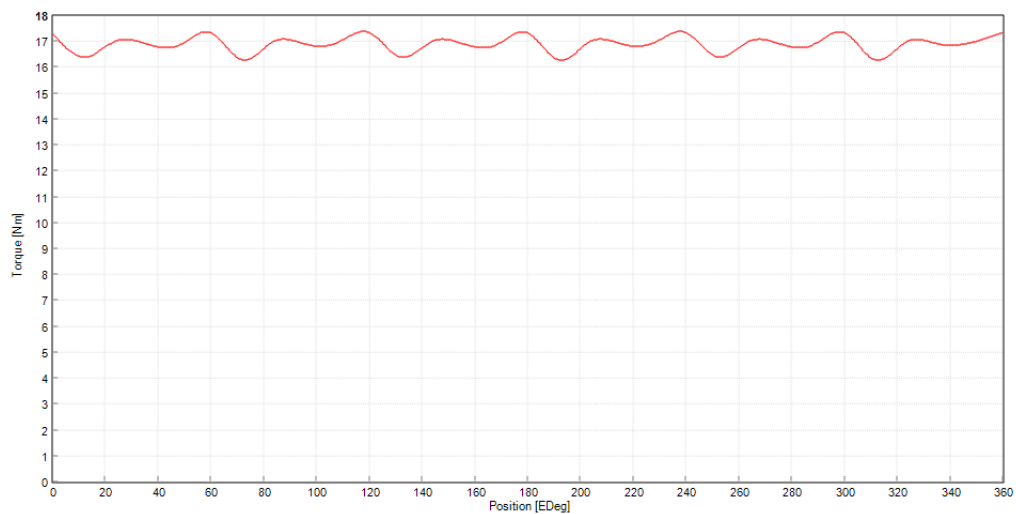


Fonte: Autor, 2025.

4.3.2 Torque nos modelos 3 e 4

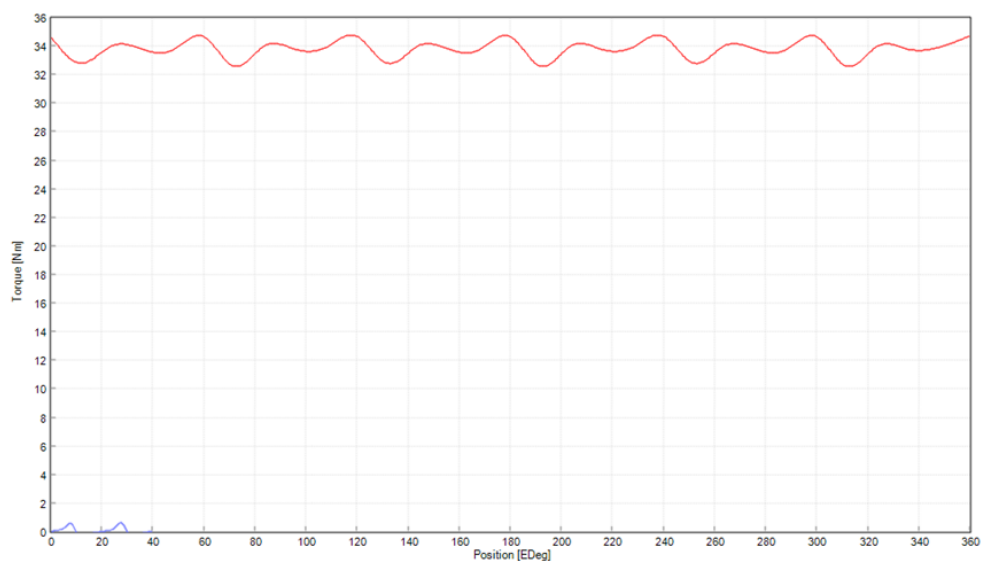
O comportamento do torque resultante nas máquinas dos modelos 3 e 4 para a velocidade de 1800 rpm é semelhante, conforme mostrado nas figuras 4.39 e 4.40. Isso ocorre porque, como já citado, ambos possuem características físicas idênticas, com a única diferença sendo a adição de um rotor e uma nova seção de ranhuras e enrolamentos no estator. A única distinção entre eles é a magnitude do torque, que no modelo 4 é sempre o dobro do valor do modelo 3.

Figura 4.39 – Modelo 3 - Torque x grau elétrico.



Fonte: Autor, 2025.

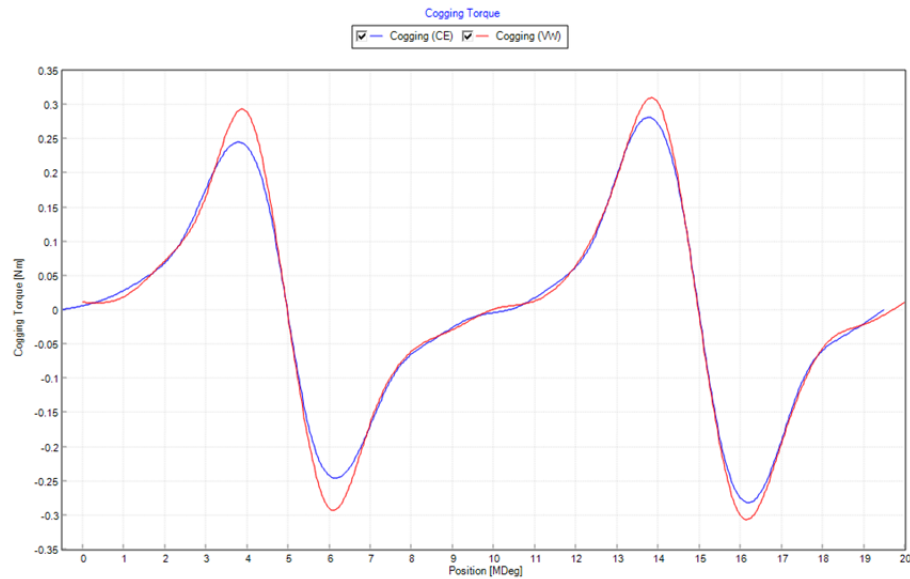
Figura 4.40 – Modelo 4 - Torque x grau elétrico.



Fonte: Autor, 2025.

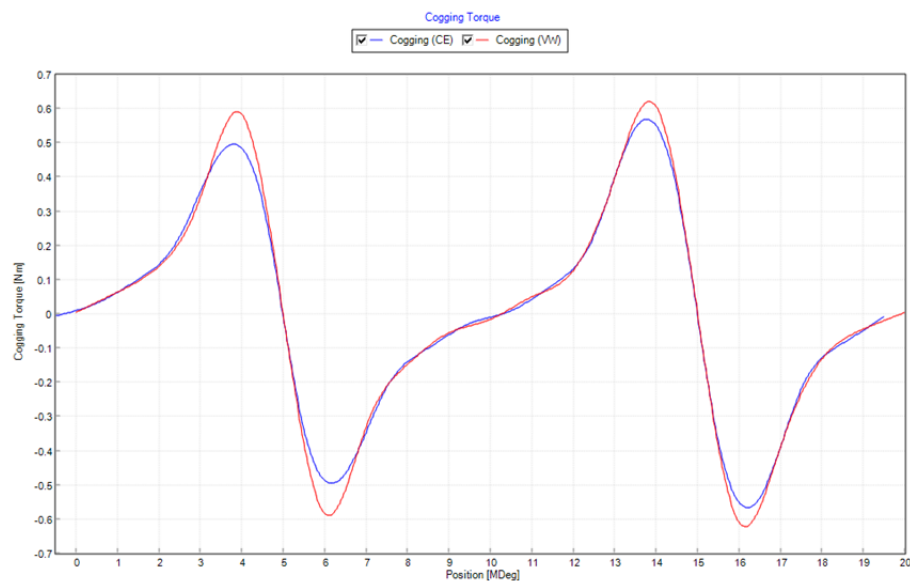
Para encerrar a análise de torque com os recursos do *software*, apresentam-se as figuras 4.41 e 4.42, referentes ao torque de *cogging*, que, novamente, apresentam no eixo *x* apenas o ângulo mecânico de 0° a 20°. Esse intervalo resulta do arco de comprimento dos ímãs permanentes, que correspondem a 140° elétricos, conforme indicado na tabela 4.13, uma vez que esse parâmetro não foi alterado em relação aos modelos 1 e 2.

Figura 4.41 – Modelo 3 - Torque de *cogging* x grau mecânico.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 4.42 – Modelo 4 - Torque de *cogging* x grau mecânico.



Fonte: Autor, 2025.

Como esperado, o comportamento das curvas de torque de *cogging* é semelhante, diferenciando-se apenas pela magnitude do torque. Infelizmente, para as máquinas elétricas de fluxo axial, o *software* Ansys Motor-CAD, em sua versão 2025.1.1, ainda não apresenta a análise de torque para diferentes avanços de corrente de alimentação e velocidades, como observado nos modelos 1 e 2 nas respectivas figuras 4.8, 4.7, 4.23 e 4.22. As simulações das topologias de fluxo axial ainda se encontram em versão *beta*, o que explica algumas limitações.

4.3.3 Perdas nos modelo 3 e 4

As perdas em operação sob carga do modelo 3 totalizaram 504,47 W, já no modelo 4 totalizaram 989,27 W, consoante ao descrito na tabela 4.15. As perdas deste modelo são 1,961 vezes maiores do que as perdas totais no modelo 3. Os valores estão subdivididas a seguir, na tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Modelos 3 e 4 - Resultados de perdas da simulação de operação do motor

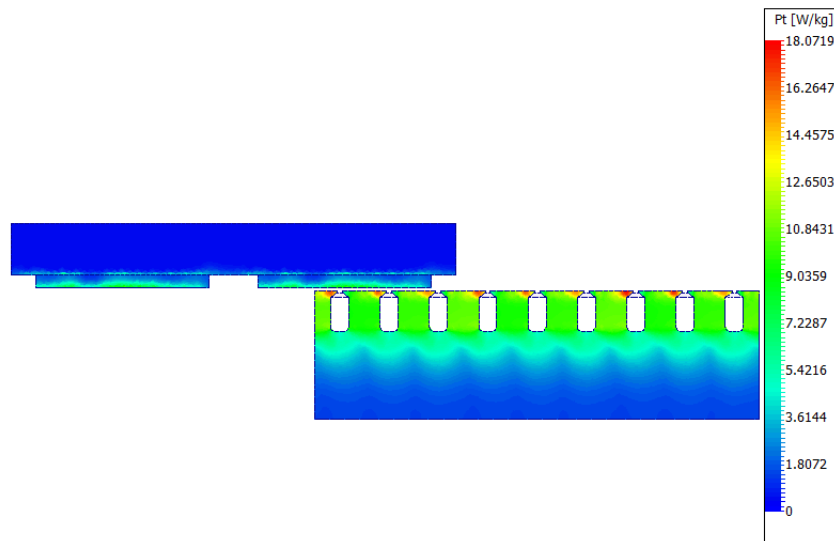
Parâmetros	Modelo 3	Modelo 4	Unidade de medida
Perdas no cobre	475,1	950,3	watt
Perdas no ímã	1,295	2,593	watt
Perdas no estator	22,24	30,06	watt
Perdas no rotor	0,5083	1,0410	watt
Perdas pela resistência do ar	0	0	watt
Perdas por atrito	5,28	5,28	watt
Perdas no eixo	0	0	watt

Fonte: Autor, 2025.

O modelo 4 teve o acréscimo de um rotor e uma seção do estator com a mesma quantidade de enrolamentos e a mesma alimentação, o que provocou o aumento das perdas no cobre, ímãs e rotor, de maneira que seus valores se igualaram ao dobro dos valores do modelo 3. No entanto, as perdas no estator não dobraram como as demais, devido ao aumento das ranhuras, o que resultou na diminuição do volume preenchido pelo material laminado M350-50A.

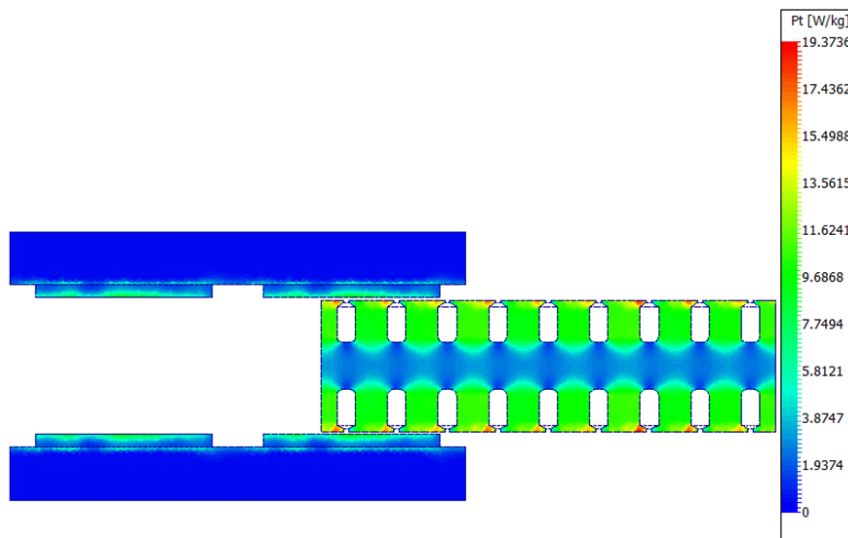
Nas figuras 4.43 e 4.44, ilustram-se as densidades de perdas por histerese e correntes de Foucault em ambos os modelos. Nota-se que as densidades são muito similares, sendo que a única diferenciação ocorre no estator.

Figura 4.43 – Modelo 3 - Densidade de perdas por histerese e correntes de Foucault.



Fonte: Autor, 2025.

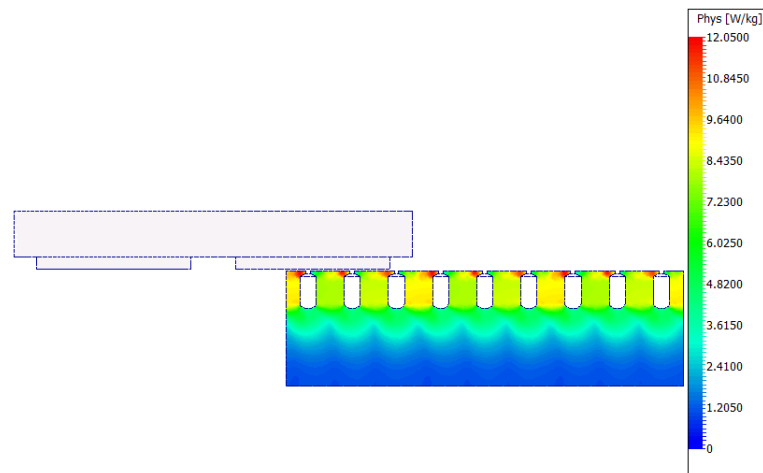
Figura 4.44 – Modelo 4 - Densidade de perdas por histerese e correntes de Foucault.



Fonte: Autor, 2025.

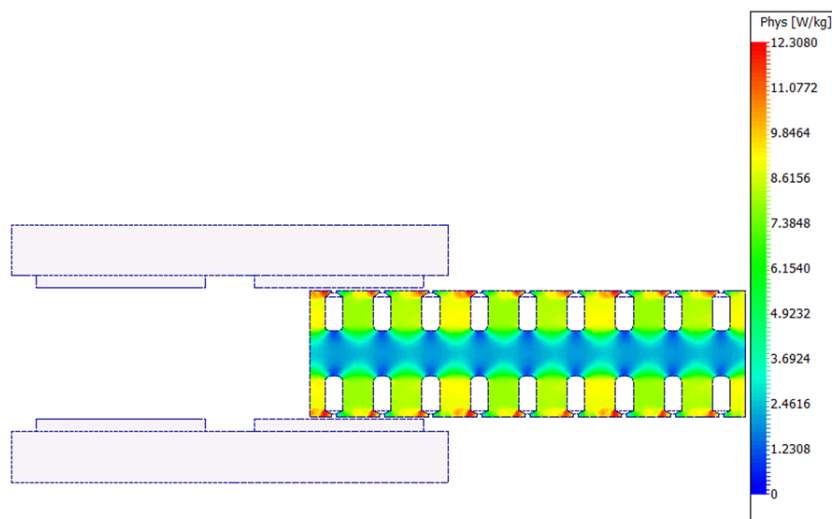
Isolando as perdas por histerese, obtêm-se as figuras 4.45 e 4.45. Essas perdas concentram-se no núcleo do estator, embora também possam estar presentes no rotor, mas de forma muito reduzida. O *software* considera que, para as máquinas de fluxo axial, essas perdas são nulas, o que é mais adequado para núcleos compostos por materiais não ferromagnéticos (Gieras; Wang; Kamper, 2004).

Figura 4.45 – Modelo 3 - Densidade de perdas por histerese.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 4.46 – Modelo 4 - Densidade de perdas por histerese.



Fonte: Autor, 2025.

Por fim, no que se refere às perdas mecânicas, o *software* possui recursos apenas para o cálculo das perdas por atrito. Até a versão 2025.1.1 utilizada, as outras perdas não são avaliadas, razão pela qual os valores de perdas pela resistência do ar aparecem como nulos na tabela 4.16.

4.3.4 Temperatura nos modelos 3 e 4

Como citado anteriormente, as simulações das topologias de fluxo axial ainda estão em versão *beta*, e os recursos para análises térmicas ainda não estão disponíveis. Dessa forma, neste trabalho, a avaliação térmica dos modelos 3 e 4 não foram possíveis de serem realizadas.

5 Conclusões

Este trabalho apresentou diversas análises comparativas de diferentes topologias de motores síncronos de ímãs permanentes (PMSM), utilizando o método dos elementos finitos (FEM) no *software* Ansys Motor-CAD. O estudo abordou motores de fluxo radial com ímãs montados na superfície (SPM), ímãs embutidos (IPM) e motores de fluxo axial, incluindo as configurações com rotor e estator únicos, bem como os modelos mais avançados, como o Torus-S, com dois rotores e estator único.

A análise detalhada das diversas topologias permitiu abordar a teoria de forma aplicada nessas diferentes máquinas e também identificar as vantagens e limitações empíricas de cada configuração em termos de torque, eficiência, temperatura, perdas elétricas, magnéticas e mecânicas. A pesquisa ressaltou a importância do uso de ferramentas como o Ansys Motor-CAD, que possibilitam a simulação precisa de parâmetros físicos e operacionais, oferecendo uma base robusta para o desenvolvimento de novos projetos de motores elétricos.

Diante da crescente demanda por soluções mais eficientes e sustentáveis, especialmente no contexto da mobilidade elétrica e da geração de energia, os motores de fluxo axial com dois rotores e estator único se destacaram por sua maior compactação e otimização do torque. Embora apresentem um custo de fabricação mais elevado e uma estrutura mais complexa, suas vantagens em termos de desempenho e aplicação em áreas de alta performance, como veículos elétricos e sistemas industriais, justificam sua adoção. Todavia, o estudo também expressa as limitações quanto à avaliação desses motores, uma vez que a versão mais atualizada do *software* Ansys Motor-CAD ainda não apresenta todas as funcionalidades necessárias para o estudo dessas topologias de fluxo axial.

Este trabalho contribui para o avanço do conhecimento sobre motores de ímãs permanentes, além disso compôs um guia de utilização a respeito do *software* Ansys Motor-CAD. Dessa forma, para trabalhos e pesquisas futuras, sugere-se:

- Simulações de topologias de fluxo radial com rotor externo através do Ansys Motor-CAD a fim de explorar mais essa estrutura física pouco utilizada.
- Simulações das topologias apresentadas neste trabalho, contudo alterando-se as propriedades dos ímãs permanentes, avaliando assim a performance de diferentes materiais magnéticos.
- Avaliar a aplicação dos modelos estudados neste trabalho como geradores síncronos.
- Avaliar a aplicação dos modelos estudados neste trabalho no âmbito de eletrificação de veículos.
- Aprimorar os estudos realizados com análises mecânicas, por exemplo: força centrífuga, tensão mecânica, peso da máquina e avaliação de vida útil do ímã sob operação.

Referências

- ANSYS. **Discover Ansys**. 2025. Disponível em: <https://www.ansys.com/company-information/the-ansys-story>. Citado na p. 44.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17094-1: Máquinas elétricas girantes parte 1: Motores de indução trifásicos — requisitos**. Rio de Janeiro, 2018. Citado na p. 17.
- BENDER, B. Eficiência energética em motores elétricos. **Gebras: Grupo de Energia do Brasil**, 2022. Citado na p. 17.
- COMPANY, M. I. **Global Permanent Magnet Motor Market (2024 – 2029)**. Hyderabad, India, 2022. Citado na p. 17.
- DEMIR, U. Im to ipm design transformation using neural network and doe approach considering the efficiency and range extension of an electric vehicle. **Springer Nature**, v. 104, n. 1, p. 1141–1152, 2022. Citado na p. 28.
- FILHO, G. F. Gestão da energia para sistemas eletromotrizes. **Eletricidade Moderna**, 2021. Citado na p. 17.
- GIERAS, J. F.; WANG, R.-J.; KAMPER, M. J. **Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines**. 1st. ed. Holanda: KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2004. Citado nas pp. 31, 35 e 91.
- GRIFFITHS, D. J. **Introduction To Electrodynamics**. 1st. ed. Nova Jersey, EUA: Prentice Hall, 1999. 346–348 p. Citado nas pp. 42 e 43.
- GUEDES, M. V. Motores síncronos trifásicos - modelização, análise do funcionamento e utilização. **Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**, v. 1, n. 1, p. 27–28, 1992. Citado na p. 38.
- HANSELMAN, D. C. **Brushless permanent magnet motor design**. 2nd. ed. Ohio, EUA: Magna Physics Publishing, 2011. 23 p. Citado nas pp. 33, 35, 37 e 39.
- LENZ, A. L. Máquinas elétricas de ímãs permanentes (máquina elétrica de fluxo radial vs máquina elétrica de fluxo axial). **Veículos Elétricos - Os Carros Verdes**, p. 1–2, 2013. Citado nas pp. 21, 22, 26, 27, 28, 29, 30 e 31.
- STOEV, B.; TODOROV, G.; RIZOV, P.; PAGIATAKIS, G.; DRITSAS, L. Finite element analysis of rotating electrical machines - an educational approach. **IEEE Global Engineering Education Conference**, p. 1–8, 2017. Citado nas pp. 42 e 43.
- UNIVERSITY, I. S. **Physics of Nondestructive Evaluation**. Iowa, EUA, 2015. Disponível em: <https://www.nde-ed.org/Physics/index.xhtml>. Citado na p. 24.

- WEG. **Motores Síncronos**. Jaraguá do Sul, SC, 2010. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hf2/h3b/WEG-motores-sincronos-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>. Citado na p. 25.
- WEG. **Uso Eficiente de Energia Elétrica**. Jaraguá do Sul, SC, 2021. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h7c/h92/WEG-gestao-eficiente-da-energia-eletrica-50030292-brochure-portuguese-web.pdf>. Citado na p. 17.
- WILDI, T. **Electrical Machines, Drives, And Power Systems**. 5th. ed. Nova Jersey, EUA: Pearson Education, 2002. 376-385 p. Citado na p. 36.
- YILMAZ, M. Limitations/capabilities of electric machine technologies and modeling approaches for electric motor design and analysis in plug-in electric vehicle applications. *In*: KALOGIROU, S. (Ed.). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 1st. ed. Illinois: Science Direct, 2015. v. 52, p. 80–99. Citado na p. 33.
- ZIENKIEWICZ, O.; TAYLOR, R.; ZHU, J. **The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals**. 6th. ed. Oxford, Inglaterra: CIMNE, the International Centre for Numerical Methods in Engineering, 2005. Disponível em: [pendente](#). Citado na p. 40.