

## **Análise e Simulações Eletrônicas do Motor PMSM**

### **Ulisses Galvão Romão**

Especialista em Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Cubatão, São Paulo, Brasil.

### **Gustavo Ferreira Vicentine**

Discente de Engenharia e Automação, Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Cubatão, São Paulo, Brasil.

### **Davi da Silva Barbosa**

Discente de Engenharia e Automação, Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Cubatão, São Paulo, Brasil.

**Resumo:** A busca pela eficiência energética em todos os setores industriais e automotivos está levando à tendência mundial para desenvolver e utilizar novos motores elétricos que trabalham em sincronismos, como os atuais motores de ímãs permanente PMSM, que em conjunto com os novos controladores de velocidade microprocessados estão levando esse seguimento ao um novo patamar de evolução. Como método de facilitar o desenvolvimento e aprimoramento desses novos motores, foi desenvolvida a ferramenta de projeto de máquina elétrica RMxprrt, parte do software de simulação eletrônica ANSYS Maxwell, que através de parâmetros iniciais atribuídos do motor desejado, geram modelos 2D e 3D. Resultam dessa simulação especificações, diagrama eletrônico do controle e gráficos em função do tempo de performance em plena carga, torque no eixo e corrente elétrica de consumo. Neste artigo, com base em parâmetros inicialmente atribuídos, será utilizado o software Ansys RMxprrt para gerar um exemplo genérico de um motor PMSM para fins de estudo, de acordo com os parâmetros definidos pelo cálculo analítico da ferramenta e analisando o funcionamento e fenômenos eletromagnéticos que ocorrem no motor por meio do software Ansys Maxwell usando modelos 2D e 3D.

**Palavras-chave:** Motor Elétrico Síncrono. ANSYS Maxwell. RMxprrt

**Abstract:** The quest for energy efficiency in all industrial and automotive sectors is driving the worldwide trend to develop and use new electric motors that work in synchronicity, such as the current PMSM permanent magnet motors, which, together with the new microprocessor speed controllers, are leading this follow-up to a new level of evolution. As a method of facilitating the development and improvement of these new motors, the RMXprt electrical machine design tool was developed, part of the ANSYS Maxwell electronic simulation software, which, through initial parameters assigned to the desired motor, generates 2D and 3D models. As a result of this simulation, specifications, electronic diagram of the control and graphs as a function of performance time at full load, torque on the shaft and electric current consumption. In this article, based on initially assigned parameters, the Ansys RMXprt software will be used to generate a generic example of a PMSM engine for study purposes, according to the parameters defined by the analytical calculation of the tool and analyzing the operation and electromagnetic phenomena that occur in the engine. through Ansys Maxwell software using 2D and 3D models.

**Keywords:** Synchronous Electric Motors. ANSYS Maxwell. RMXprt.

## INTRODUÇÃO

A tendência global por eletrificação de veículos automotores e diversas demandas industriais de novos motores elétricos necessitam de máquinas que trabalhem em sincronismo. Os motores síncronos de ímã permanente (PMSM - sigla em inglês de Permanent Magnet Synchronous Motor) estão sendo amplamente utilizados e desenvolvidos em aplicações síncronas, devido ao campo magnético girante do estator e do rotor atuarem na mesma velocidade angular.

Os motores PMSM são empregados em diversos ramos da indústria como o aeroespacial, veículos elétricos, eletrodomésticos e aplicações médicas. Seu amplo uso é devido à sua alta eficiência energética, alta densidade de potência, baixo índice de manutenção e baixo custo, assim se tornando ótima escolha nas aplicações de motores síncronos (FITOURI, 2016).

Os motores PMSM, conhecidos também como motores sem escova (Brushless), apresentam enrolamentos no estator (armadura) e um ímã permanente (PM) ou ferro doce de pólo saliente no seu rotor. Os enrolamentos do estator podem ser colocados em um núcleo ferromagnético ou ar. O rotor PM consiste em um único ou padrões de pólos múltiplos (KUSKO, 1988). Um importante aspecto desse motor é o seu sincronismo, visto que o campo magnético do estator e do rotor giram mecanicamente na mesma velocidade angular do rotor (VEINOTT, 1970).

Em sua construção, a conexão à alimentação elétrica é executada através do estator (armadura) que é formado por bobinas em um sistema de indução trifásico clássico, sendo que o rotor é composto por ímãs permanentes com polos pré-magnetizados devido à utilização de materiais com alta coercividade, ou seja, que requer uma maior energia para magnetização tornando-os ímãs permanentes com características de desmagnetização com maior durabilidade e confiabilidade (TEIXEIRA, 2006).

Quando o controlador eletrônico alimenta eletricamente o estator do motor PMSM, com seus enrolamentos geometricamente defasados mecanicamente entre si, induz um campo magnético girante que interage com o campo magnético constante dos ímãs permanentes do rotor, gerando forças de atração e repulsão, que provocam a rotação do rotor com a mesma velocidade do campo magnético rotativo e produzindo torque no eixo.

Apesar de suas diferentes estruturas construtivas, os motores de ímã permanente em seu rotor são acionados por uma ponte eletrônica modulada em largura de pulso PWM (sigla em inglês de Pulse Width Modulation), de modo a gerar correntes variáveis nas bobinas do estator através de variações da frequência e amplitude das tensões. Isso ocorre através do valor da largura de pulso de alimentação proporcionada pelo PWM, alterando, assim, a potência elétrica do motor e, conseqüentemente, os resultados gerados.

No desenvolvimento de qualquer projeto de engenharia, deve-se executar diversas análises e verificações para se confirmar se todos os requisitos de projeto e critérios das normas foram atendidos. Para auxiliar nos processos de desenvolvimento, manutenção e certificação de dispositivos na fase de projeto, o uso de simulações eletrônicas CAE (da sigla em inglês Computer Aided Engineering) são ferramentas essenciais.

O software Ansys Maxwell é um CAE para dispositivos multifísicos utilizando análise de elementos finitos (FEA) para análises mecânicas, térmicas, fluídicas, acústicas e magnéticas, propiciando a elaboração de projetos de baixa frequência como motores, geradores, transformadores, atuadores, carregadores wireless, aquecedores por indução, entre outros. (Ansys, 2022)

Integrado ao Ansys Maxwell, a ferramenta RMXprt é centrada em projeto de máquinas elétricas baseado em modelo que fornece cálculos analíticos rápidos de desempenho e criação de geometria e exporta para o software Ansys Maxwell, inserindo as condições de contorno e configurações de simulação para a análise de elementos finitos, que calcula os campos eletromagnéticos e modela o motor em duas ou três dimensões (2D e 3D), analisando os fenômenos eletromagnéticos e seus efeitos secundários como torque (Ansys, 2022).

O trabalho tem como objetivo utilizar o software Ansys RMXprt para gerar um exemplo genérico de um motor PMSM para fins de estudo, de acordo com os parâmetros definidos pelo cálculo analítico da ferramenta, e analisar o funcionamento e fenômenos eletromagnéticos que ocorrem no motor por meio do software Ansys Maxwell usando modelos 2D e 3D.

## **DESENVOLVIMENTO**

Objetivando a demonstração da ferramenta RMXprt no software Ansys Maxwell para elaboração do motor PMSM, o projeto foi gerado a partir do modelo analítico e então, por meio de parâmetros pré-estabelecidos, foi realizada a simulação e análise dos modelos 2D e 3D, comparando suas diferenças e resultados.

Para o projeto foram atribuídos parâmetros construtivos baseados em motor utilizado frequentemente para bicicletas elétricas, máquinas e braços robóticos de pequeno porte, cuja potência solicitada dentro de suas características nominais em regime contínuo exigem até 500W.

Com o intuito de gerar baixos níveis de ruído, vibração, aspereza na rotação e também de uso comum em motores comerciais, foi atribuído um número inteiro de 36 fendas, onde serão enrolados os fios condutores do estator, que serão gerados quando for alimentado pelo controlador eletrônico 6 polos magnéticos rotativos.

O número de fendas e polos magnéticos é limitado devido aos processos produtivos. Quanto maior o número de fendas no estator, mais finos ficam os dentes, o que pode dificultar e travar o enrolamento das bobinas. (VOLARIĆ, 2021).

Em seguida, para se aproximar de um motor comercial, foram atribuídos o restante dos parâmetros de acordo com exemplos da Ansys, sendo eles a rotação do rotor em vazio, método de controle, frequência da portadora PWM, diâmetros internos e externos do estator, comprimento e número de fendas. Todos os parâmetros necessários atribuídos para concretização das simulações são listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros Atribuídos

| PARÂMETROS                  | VALOR    |
|-----------------------------|----------|
| Potência Nominal            | 500 W    |
| Rotação do rotor em vazio   | 1000 rpm |
| Método de Controle          | PWM      |
| Frequência da Portadora     | 100 Hz   |
| Diâmetro Externo do Estator | 340mm    |
| Diâmetro Interno do Estator | 225mm    |
| Comprimento do Estator      | 100mm    |
| Número de Polos Magnéticos  | 6        |
| Número de Fendas            | 36       |

Fonte: Tabela RMxprt

Alimentados os parâmetros atribuídos na ferramenta RMxprt, através de seu solucionador e condições de contorno estipuladas, são geradas as especificações do estator, rotor e dos polos magnéticos e que determinam parâmetros mecânicos construtivos do motor como comprimento, propriedades do material, largura e diâmetro das partes internas, assim como os parâmetros físicos como tensão, rotação do eixo, potência, eficiência e outras propriedades da máquina que são necessários para o modelo de análise. Os parâmetros de projeto, modelo de fendas e o diagrama de enrolamento das bobinas do estator, gerados pela ferramenta são apresentados na Figura 1 e 2.

Figura 1 – Parâmetros Gerados

| Machine         |             |      |                |                          | Stator         |         |      |                |                          |                          |
|-----------------|-------------|------|----------------|--------------------------|----------------|---------|------|----------------|--------------------------|--------------------------|
| Name            | Value       | Unit | Evaluated V... | Description              | Name           | Value   | Unit | Evaluated V... | Description              | Read-only                |
| Machine Type    | Adjust-S... |      |                |                          | Outer Diam...  | 340     | mm   | 340mm          | Outer diameter of t...   | <input type="checkbox"/> |
| Number of Poles | 6           |      |                | Number of poles o...     | Inner Diam...  | 225     | mm   | 225mm          | Inner diameter of t...   | <input type="checkbox"/> |
| Rotor Position  | Inner Ro... |      |                | Inner rotor or outer ... | Length         | 100     | mm   | 100mm          | Length of the stator...  | <input type="checkbox"/> |
| Frictional Loss | 12          | W    | 12W            | The frictional loss ...  | Stacking Fa... | 0.95    |      |                | Stacking factor of t...  | <input type="checkbox"/> |
| Windage Loss    | 0           | W    | 0W             | The windage loss ...     | Steel Type     | M19_24G |      |                | Steel type of the st...  | <input type="checkbox"/> |
| Reference Speed | 1000        | rpm  |                | The reference spe...     | Number of ...  | 36      |      |                | Number of slots of ...   | <input type="checkbox"/> |
| Control Type    | PWM         |      |                | Control Type: DC, ...    | Slot Type      | 2       |      |                | Slot type of the stat... | <input type="checkbox"/> |
| Circuit Type    | Y3          |      |                | Drive circuit type       | Skew Width     | 0       |      | 0              | Skew width measu...      | <input type="checkbox"/> |

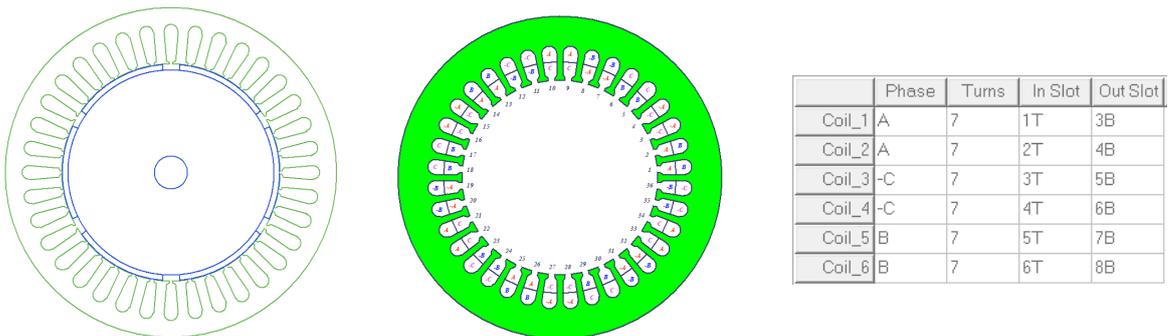
| Rotor          |         |      |                |                         | General            |                                     |      |                |                        |
|----------------|---------|------|----------------|-------------------------|--------------------|-------------------------------------|------|----------------|------------------------|
| Name           | Value   | Unit | Evaluated V... | Description             | Name               | Value                               | Unit | Evaluated V... | Description            |
| Outer Diam...  | 224     | mm   | 224mm          | Outer diameter of t...  | Name               | Setup1                              |      |                |                        |
| Inner Diam...  | 35      | mm   | 35mm           | Inner diameter of t...  | Enabled            | <input checked="" type="checkbox"/> |      |                |                        |
| Length         | 100     | mm   | 100mm          | Length of the rotor ... | Operation Type     | Motor                               |      |                | Motor or generator     |
| Steel Type     | M19_24G |      |                | Steel type of the ro... | Load Type          | Const P...                          |      |                | Mechanical load t...   |
| Stacking Fa... | 0.95    |      |                | Stacking factor of t... | Rated Output Power | 20000                               | W    | 20000W         | Rated mechanical...    |
| Pole Type      | 1       |      |                | Pole type of the rot... | Rated Voltage      | 138                                 | V    | 138V           | Applied or output r... |

| Circuit                 |       |      |                |                          |
|-------------------------|-------|------|----------------|--------------------------|
| Name                    | Value | Unit | Evaluated V... | Description              |
| Transistor Drop         | 2     | V    |                | Voltage drop of on...    |
| Diode Drop              | 2     | V    |                | Voltage drop of on...    |
| Modulation Index        | 0.8   |      | 0.8            | The ratio of the sin...  |
| Carrier Frequency Ti... | 100   |      | 100            | The ratio of the tria... |

Fonte: Ferramenta RMxprrt

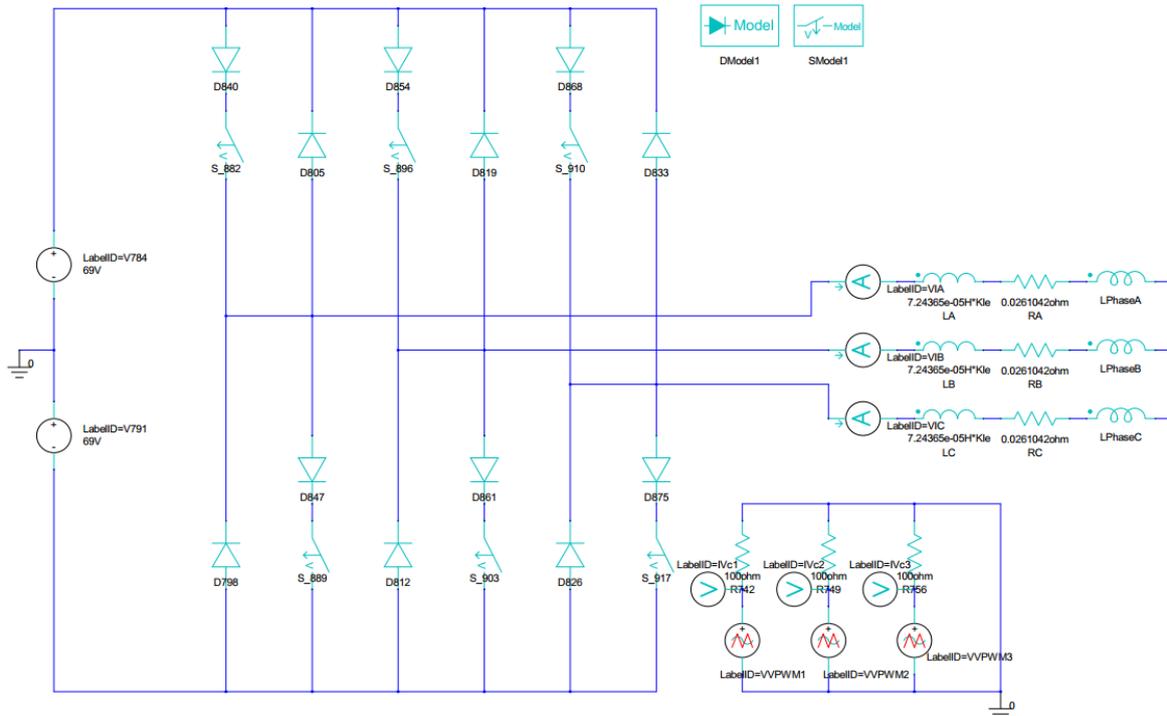
Figura 2 – Modelo de fendas e diagrama de enrolamento das bobinas do estator



Fonte: Ferramenta RMxprrt

Também de forma automática, a ferramenta gera o diagrama eletrônico de acionamento do motor, mostrado na Figura 3, onde encontramos o inversor de fases que converte CC/CA (corrente contínua para alternada), o controle PWM que é gerado por fontes ideais defasadas em 120° com índice de modulação de 80% e deslocamento de fase de 46°, resistência e indutância de fase que são empregados nos modelos 2D e 3D.

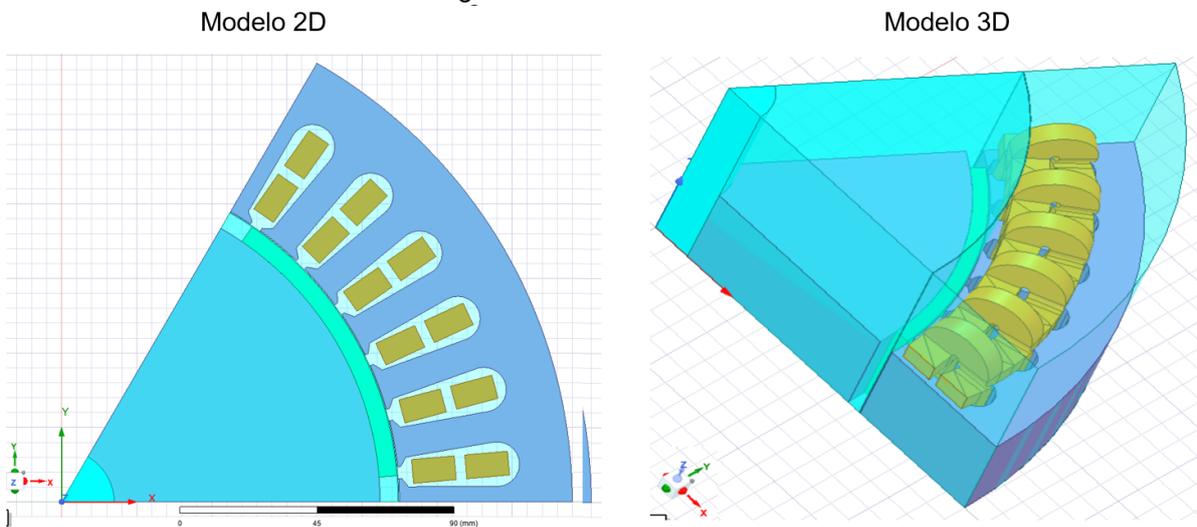
Figura 3 – Diagrama Eletrônico de Acionamento do Motor



Fonte: Ferramenta RMxprrt

Através dos parâmetros gerados da ferramenta RMxprrt, são exportados para os modelos 2D e 3D do software ANSYS Maxwell, assim possibilitando a análise do dispositivo. Os modelos 2D e 3D são mostrados na Figura 4. Para a simulação dos modelos 2D e 3D foi utilizado o solver transiente, com o tempo de simulação igual a 125ms, passo de 500ns e resíduo não-linear de 1e-06.

Figura 4 - Modelos Maxwell



Fonte: Software ANSYS Maxwell

## RESULTADOS

O modelo RMxprt criado possibilita a visualização dos principais parâmetros do projeto como a potência de saída, potência de entrada, eficiência energética, torque e performance do motor no modo de operação a plena carga. Tais características são apresentadas em forma de tabela, mostrada na Figura 5.

Figura 5 – Análise da performance RMxprt

|    | Name                        | Value    | Units                           |
|----|-----------------------------|----------|---------------------------------|
| 1  | Peak Line Induced Voltage   | 139629   | mV                              |
| 2  | Input DC Current            | 165371   | mA                              |
| 3  | RMS Phase Current           | 222528   | mA                              |
| 4  | Armature Thermal Load       | 1541.97  | A <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> |
| 5  | Specific Electric Loading   | 158666   | A_per_meter                     |
| 6  | Armature Current Density    | 9718380  | A_per_m2                        |
| 7  | Frictional and Windage Loss | 12000    | mW                              |
| 8  | Iron-Core Loss              | 114228   | mW                              |
| 9  | Armature Copper Loss        | 3877950  | mW                              |
| 10 | Transistor Loss             | 930660   | mW                              |
| 11 | Diode Loss                  | 270225   | mW                              |
| 12 | Total Loss                  | 5205060  | mW                              |
| 13 | Output Power                | 17616100 | mW                              |
| 14 | Input Power                 | 22821200 | mW                              |
| 15 | Efficiency                  | 77.192   | %                               |
| 16 | Synchronous Speed           | 1000     | rpm                             |
| 17 | Rated Torque                | 168.222  | NewtonMeter                     |
| 18 | Torque Angle                | 78       | deg                             |
| 19 | Maximum Output Power        | 17616100 | mW                              |

Fonte: Relatórios Ferramenta RMxprt

Além dos resultados apresentados anteriormente, as simulações de software Ansys Maxwell possibilitam analisar o funcionamento do motor em função do tempo, como por exemplo a corrente elétrica de consumo por fase e do torque no eixo, que facilitam e agilizam a análise da performance do projeto desenvolvido. As Figuras 6 e 7 apresentam as variações destes parâmetros através de gráficos referentes ao modelo 2D e as Figuras 8 e 9 referentes ao modelo 3D.

Figura 6 – Curva da corrente elétrica de consumo em função do tempo no modelo 2D

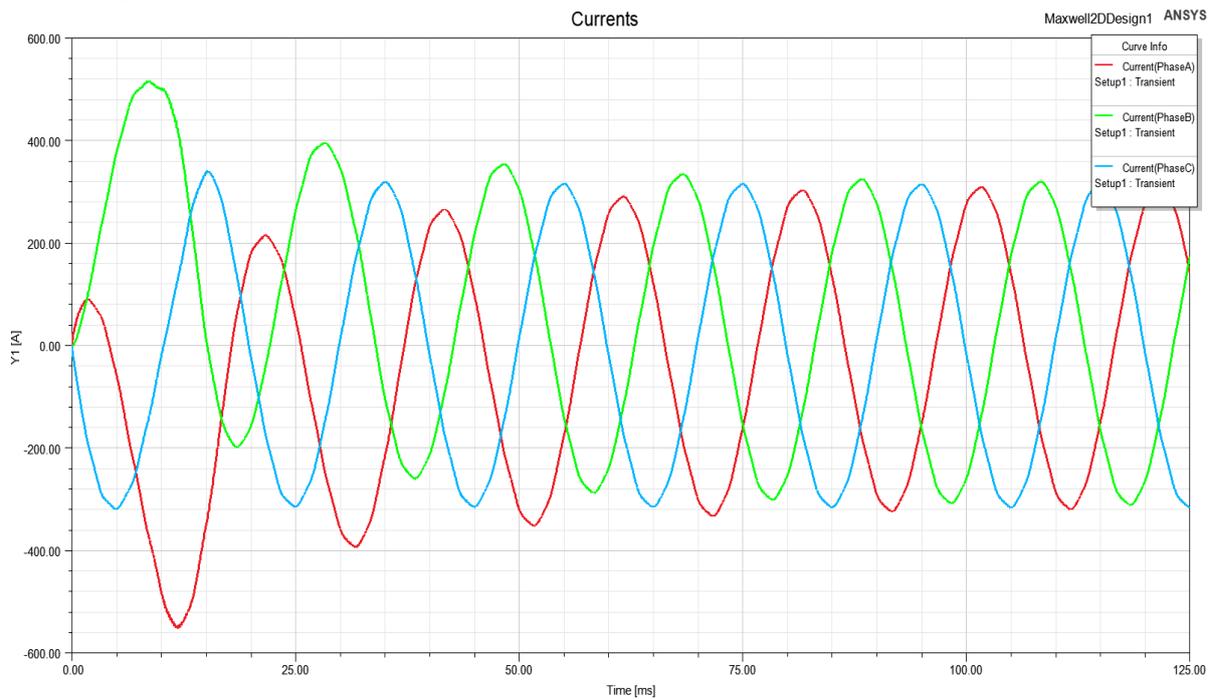
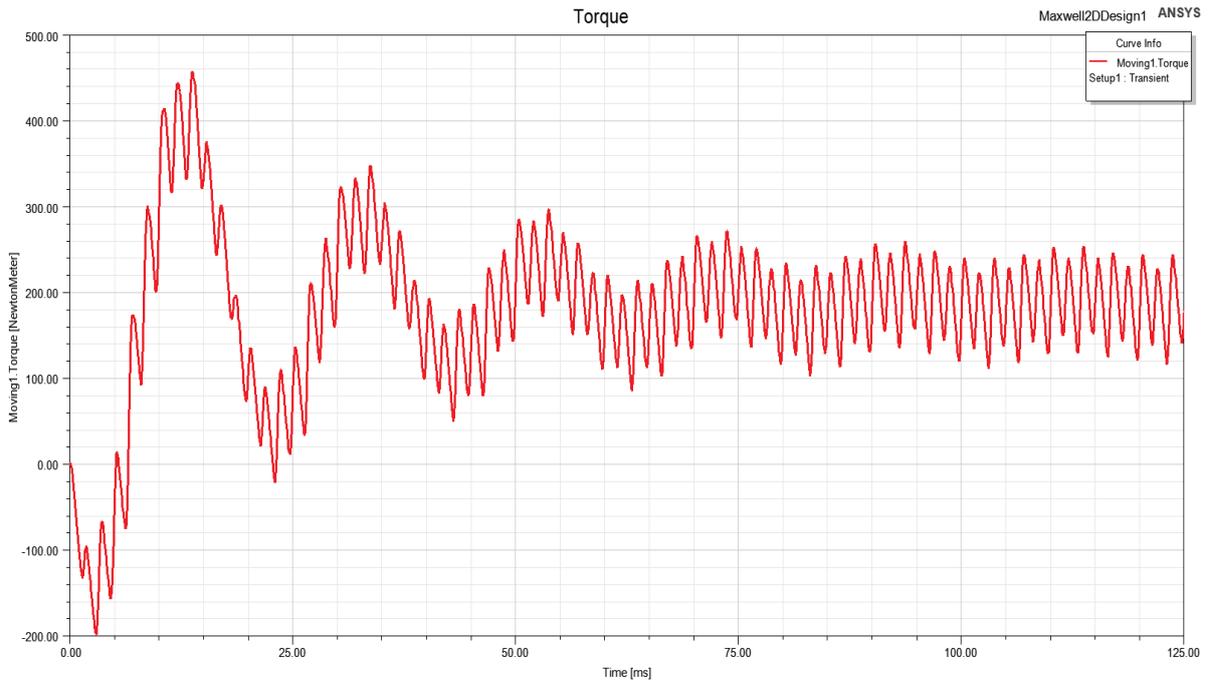
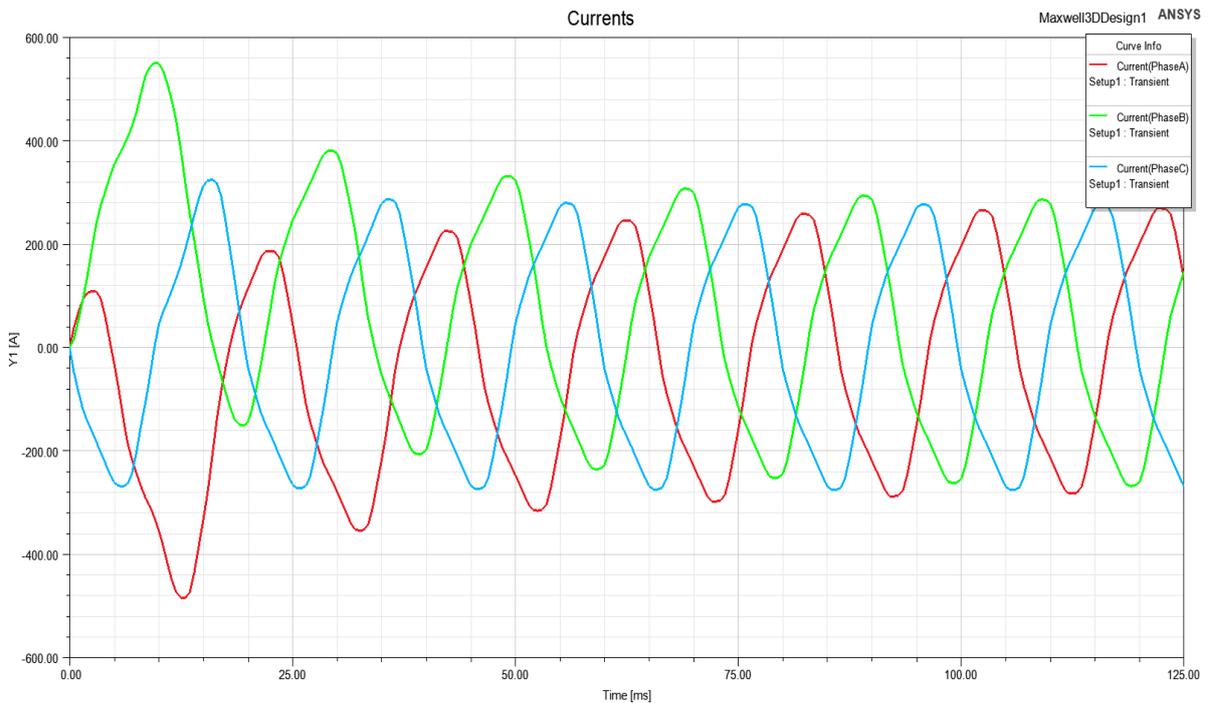


Figura 7 – Torque no eixo em função do tempo no modelo 2D



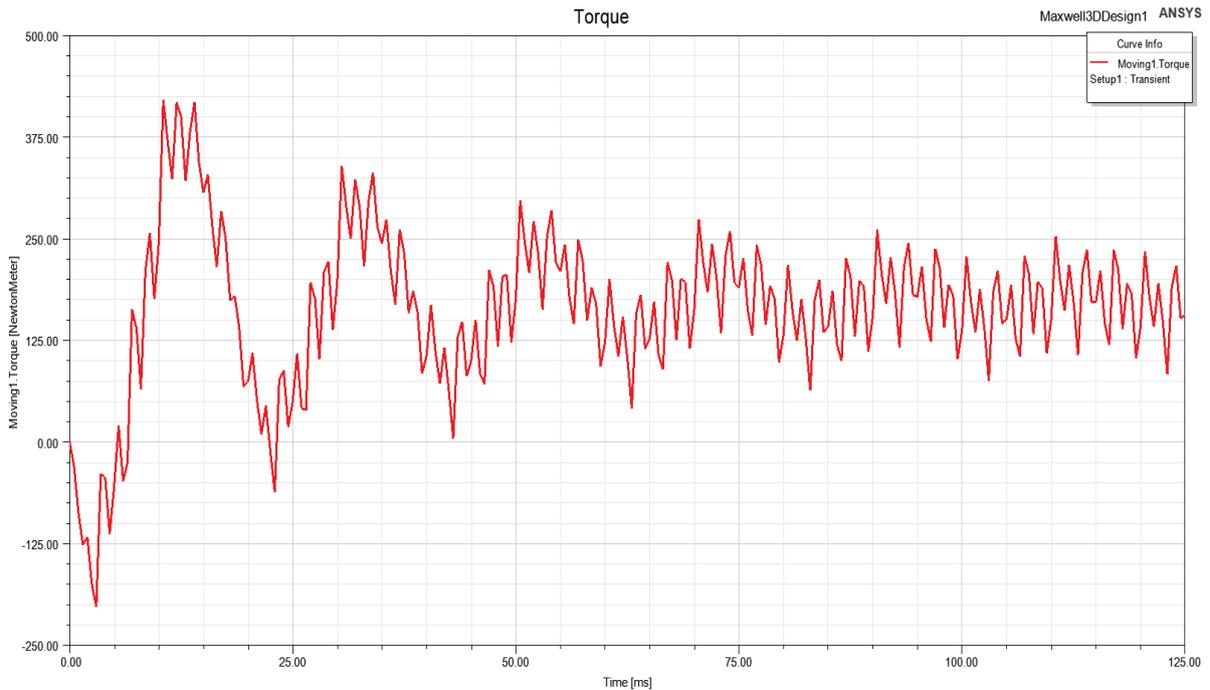
Fonte: Relatórios do Software ANSYS Maxwell

Figura 8 – Curva da corrente elétrica de consumo em função do tempo no modelo 3D



Fonte: Relatórios do Software ANSYS Maxwell

Figura 9 – Torque no eixo no modelo 3D



Fonte: Relatórios do Software ANSYS Maxwell

As curvas em função do tempo das correntes elétricas descrevem seu valor de partida e consumo nominal. Tais parâmetros são de grande importância para a tomada de decisão de projeto e no dimensionamento dos componentes e uso do motor, avaliando o custo benefício, de acordo com os requisitos de projeto. Além disso, por meio das correntes em cada fase, é possível verificar o torque gerado (força de rotação gerada no motor) na partida e em operação a plena carga. Para efeito de comparação, são apresentados os valores obtidos a partir das curvas das simulações 2D e 3D, mostradas nas Tabelas 2 e 3

Tabela 2 – Valor do torque

| <b>Torque</b> | <b>Valor (N.m)</b> |
|---------------|--------------------|
| máximo 2D     | 457,8              |
| máximo 3D     | 420,1              |
| médio 2D      | 181,6              |
| médio 3D      | 164,5              |

Fonte: Autoria própria

Tabela 3 – Valor das correntes

| Corrente de Pico | Valor (A) |
|------------------|-----------|
| máxima 2D        | 516,0     |
| máxima 3D        | 549,8     |
| mínima 2D        | 551,5     |
| mínima 3D        | 484,4     |

Fonte: Autoria própria

É possível observar que os valores resultantes da simulação a partir do modelo 2D e 3D apresentam curvas semelhantes, mas valores diferentes, isso é devido à diferença entre os dois modelos e a malha 2D e 3D gerada. Enquanto o modelo 3D gera a malha em todo o motor, calculando o erro de energia e refinando os pontos necessários, o modelo 2D gera uma malha superficial e a assume para todo o motor.

Outra diferença entre os modelos observada são as características do deslizamento das correntes e torque, pois no modelo 3D é visto com mais facilidade tal deslizamento, comprovando que é um modelo mais preciso pois capta fenômenos que no 2D não foram tão evidentes.

Além disso, a alimentação das fases do motor, onde o modelo 3D usa a resistência e indutância de fase estabelecidos pelo usuário e o modelo 2D utiliza parâmetros do RMxprt, atribui parâmetros distintos no tratamento das bobinas e folgas cilíndricas entre os dois modelos.

Tendo em vista que a malha de análise, resolução e tempo de simulação foram atribuídas de forma igual para os modelos, mesmo que sejam baseados no mesmo motor e com as mesmas características construtivas, o modelo 3D apresenta uma análise mais detalhada e leva em consideração fenômenos e efeitos que não são considerados no modelo 2D.

## CONCLUSÕES

Como evidenciado neste artigo, foram realizados o estudo e uso de simulações eletromagnéticas para a análise de modelos de um motor PMSM, através das simulações eletrônicas no software ANSYS Maxwell e a ferramenta de design RMxprt. Foram encontradas dificuldades na definição dos parâmetros iniciais compatíveis com a funcionalidade e eficiência desejada do motor.

Para facilitar o projeto inicial do motor para simulação é indicado utilizar como referência os dados de equipamentos existentes e que apresentem ótimos fatores de funcionalidade e eficiência. A partir desses dados aplicados à simulação, é possível comprovar sua autenticidade e se confirmar se realmente são compatíveis com características desejadas iniciais ao projeto definitivo. O ponto positivo em simulações eletrônicas é poder modificar os parâmetros anteriormente simulados e poder analisar o que esta modificação causou no projeto, sem custos de materiais ou longo tempo de espera para confirmar o resultado no protótipo físico.

Logicamente a simulação eletrônica não substitui os passos normais da evolução do projeto, ainda se torna necessário a confirmação dos resultados obtidos através da construção do protótipo físico, mas com mais probabilidades de se ter sucesso em menor tempo e menor desprendimento de capital.

Em referência à comparação dos resultados dos modelos 2D e 3D gerados no projeto a partir dos dados atribuídos, esta apresentou pequena diferença nos valores e em análise constatou-se que tais diferenças são relativas à utilização pelo modelo 3D de parâmetros mais precisos para sua elaboração. Nos casos de não necessidade de alta precisão nos cálculos, pode-se basear inicialmente no modelo 2D, facilitando a otimização prévia dos parâmetros. Mas para a configuração final, redução das faixas de valores das variáveis e aproximação dos resultados a serem constatados no protótipo deverá ser utilizado o modelo 3D, apesar de ter maior custo computacional em relação ao 2D.

## **REFERÊNCIAS**

ANSYS, disponível em <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>, 13/12/2022.

MAXWELL, Ansys. Versão 2021 R1. Low Frequency Electromagnetic Simulation. Software de Simulação Eletromagnética de baixa frequência. Canonsburg, PA 15317 USA.



RMxpirt, Ansys. Versão 2021 R1. Low-Frequency Electromagnetic Simulation for Electric Machines. Ferramenta de Simulação Eletromagnética de baixa frequência para Máquinas Elétricas. Canonsburg, PA 15317 USA.

FITOURI, Manel; BENSALÉM, Yemna; ABDELKRIM, Mohamed Naceur. Analysis and cosimulation of permanent magnet synchronous motor with short-circuit fault by finite element method. In: 2016 13th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). IEEE, 2016. p. 472-477.

KUSKO, A.; PEERAN, S. M. Definition of the brushless DC motor. In: Conference Record of the 1988 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. IEEE, 1988. p. 20-22.

TEIXEIRA, Fernando Henrique Pisani. Metodologia para projeto, construção e ensaios em máquina síncrona de ímã permanente-MSIP. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo, 2006. p. 26

VEINOTT, C. G e MARTIN, J. "Fractional and Subfractional Horsepower Electric Motors", New York, USA, Editora McGraw Hill, 1970. p. 215-216

VOLARIĆ, Mario; MIKULIĆ, Ivan; STIPETIĆ, Stjepan. Design of Permanent Magnet Synchronous Motor for Formula Student competition. In: 2020 International Symposium on Industrial Electronics and Applications (INDEL). IEEE, 2020. p. 1-7.