

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS LANGENDYK PROENÇA

MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

CURITIBA

2019

MATHEUS LANGENDYK PROENÇA

MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia Elétrica, Área de Eletrotécnica, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^a. Dra. Juliana Luísa Müller lamamura

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Akihiro Tanno lamamura

CURITIBA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

MATHEUS LANGENDYK PROENÇA

MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Trabalho de Conclusão de Curso Aprovado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Eletricista do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Prof^a. Dra. Juliana Luísa Müller lamamura
(Orientadora)

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Prof. Dr. João Américo Vilela Junior
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Prof. M.Sc. Carlos Alexandre Gouvêa da Silva
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Curitiba, 14 de junho de 2019.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por nunca me abandonar e me proporcionar a saúde, força e sabedoria necessárias para seguir meu caminho focado nos meus objetivos.

À Prof^a. Dra. Juliana L. M. lamamura, por ter aceitado me orientar, ter dedicado tempo e esforço para o melhor resultado possível, e ter sido uma verdadeira amiga nesse tempo todo.

Ao Prof. Dr. Bruno A. T. lamamura, por toda a dedicação, auxílio e aprendizado ao longo do projeto.

À empresa WEG S.A., pela doação do motor estudado, bem como pelo fornecimento de seus dados, sem os quais não seria possível a realização desse projeto.

Aos meus pais, Mauricio Proença e Kathia Langendyk Proença, e a minha irmã, Marjory Langendyk Proença, por serem a melhor família que eu poderia ter, sempre me apoiando em meus passos.

Aos meus amigos, por todos os momentos de diversão e descontração, mas também pelos de frustração, onde nunca me abandonaram, sempre me motivando para que essa etapa fosse concluída.

RESUMO

Com o avanço da tecnologia, é imprescindível que os motores de indução trifásicos sejam cada vez mais eficientes, ao mesmo tempo em que um custo padrão é mantido. Com a modelagem eletromagnética, um estudo aprofundado das máquinas pode ser realizado, levando em conta diversos aspectos. O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma modelagem eletromagnética desse tipo motor, a partir de um *software* 2D gratuito, conhecido como FEMM, que utiliza o método dos elementos finitos para resolução de problemas eletromagnéticos em baixas frequências. O fato de o motor apresentar uma geometria complexa e um material com característica não-linear, juntos à falta de ferramentas do próprio programa, foram desafios para se conseguir os melhores resultados. Para uma máxima aproximação da realidade, três fatores foram considerados simultaneamente: as correntes induzidas nas barras do rotor, inseridas na velocidade do escorregamento; o movimento do rotor, na velocidade de rotação; e as correntes trifásicas instantâneas das bobinas do estator, em velocidade síncrona. Duas técnicas de movimento diferentes foram simuladas: um método clássico, manual; e um método mais recente, chamado de *Sliding Band*. Seus resultados foram, então, comparados com os dados de placa do motor de base, doado pela empresa WEG S.A.. Com a primeira técnica, tanto o torque, quanto as tensões induzidas nos enrolamentos do estator tiveram resultados próximos aos esperados, validando a modelagem realizada, entretanto, para o método mais recente, os resultados não foram tão precisos, demandando estudos mais aprofundados para a sua aplicação.

Palavras-chave: Motor de indução trifásico; Modelagem eletromagnética; Método dos elementos finitos; Correntes induzidas; Movimento; Torque

ABSTRACT

With the advancement of technology, three-phase induction motors must be more and more efficient, at the same time as a standard cost is maintained. With electromagnetic modeling, a detailed study of the machines can be carried out, taking account of diverse aspects. The main objective of this work is to present an electromagnetic modeling of this type of motor, using a free 2D software, known as FEMM, which uses the finite element method to solve low-frequency electromagnetic problems. The fact that the motor presents a complex geometry and a material with non-linear characteristic, together with the lack of tools of the software itself, were challenges to obtain the best results. Also, for a maximum approximation of the reality, three factors were considered simultaneously: the induced currents in the rotor bars, inserted in the slip speed; the motion of the rotor, in the rotation speed; and the three-phase instantaneous currents of the stator coils, in synchronous speed. Two different movement simulation techniques were used: a classical, manual method; and a more recent one, called Sliding Band. With the first technique, both the torque and the induced voltages on the stator windings had results close to expected, validating the performed model, however, with the more recent method, the results were not so precise, which requires more thorough studies for its employment.

Key words: Three-phase induction motor; Electromagnetic modeling; Finite element method; Induced currents; Movement; Torque

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de rotor em gaiola de esquilo.....	17
Figura 2 – Malha de elementos finitos com vértices definidos.....	19
Figura 3 – Técnicas de simulação de movimento	21
Figura 4 – Método conforme (Banda de Movimento) com entreferro discretizado.....	22
Figura 5 – Método conforme com entreferro não-discretizado	23
Figura 6 – Exemplo para método não conforme	24
Figura 7 – Implementação do <i>Sliding Band</i> em máquinas	25
Figura 8 – Motor estudado para o projeto	27
Figura 9 – Dados de placa do motor estudado.....	27
Figura 10 – Geometria do motor desenhado no FEMM	30
Figura 11 – Condição de contorno periódica caracterizando o <i>Sliding Band</i>	31
Figura 12 – Malha de elementos finitos do motor de indução trifásico	33
Figura 13 – Correntes trifásicas complexas defasadas	34
Figura 14 – Barra nas correntes trifásicas que se deslocará conforme o movimento ..	36
Figura 15 – Módulo da indução magnética para simulação magnetodinâmica.....	39
Figura 16 – Componentes real e imaginária, e módulo das correntes induzidas.....	40
Figura 17 – Análise do movimento através de simulação manual	44
Figura 18 – Gráfico do torque em relação ao tempo para simulação manual.....	45
Figura 19 – Gráfico das tensões trifásicas em relação ao tempo para simulação manual.....	45
Figura 20 – Análise do movimento através do <i>Sliding Band</i>	47
Figura 21 – Gráfico do torque em relação ao tempo para simulação com o <i>Sliding Band</i>	48
Figura 22 – Gráfico das tensões trifásicas em relação ao tempo para simulação com o <i>Sliding Band</i>	48
Figura 23 – Parâmetros analisados para um ponto na simulação manual	49
Figura 24 – Parâmetros analisados para um ponto na simulação do <i>Sliding Band</i>	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais utilizados na modelagem	31
Tabela 2 – Valores das correntes para os circuitos das bobinas do estator	35
Tabela 3 – Dados da corrente induzida para as dez primeiras barras.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D – Bidimensional

3D – Tridimensional

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

FEM – Método dos Elementos Finitos (do inglês *Finite Element Method*)

FEMM – *Finite Element Method Magnetics*

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE VARIÁVEIS DE EQUAÇÕES

Φ – Fluxo

φ – Defasagem angular

\cos – Cosseno

f_s – Frequência do escorregamento

I – Corrente nominal

I_0 – Média do módulo das correntes

I_a – Corrente do circuito A

I_b – Corrente do circuito B

I_{bn} - Corrente induzida nas barras

I_c – Corrente do circuito C

j – Unidade imaginária

P – Potência nominal

n – Velocidade nominal

n_s – Velocidade síncrona

s – Escorregamento

\sen – Seno

t – Tempo

T – Torque

V – Tensão nominal

ω – Frequência angular

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	CONTEXTO	15
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.....	17
2.2	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	18
2.2.1	Condições de Contorno e de Periodicidade.....	20
2.3	TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO DE MOVIMENTO.....	21
2.3.1	Métodos Conformes	21
2.3.2	Métodos Não Conformes.....	23
2.3.3	Sliding Band	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	MATERIAIS.....	26
3.1.1	Motor de Base	26
3.1.2	Softwares	28
3.2	MÉTODOS	29
3.2.1	Pré-Processamento.....	29
3.2.2	Simulação Magnetodinâmica.....	33
3.2.3	Simulação Magnetostática.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	SIMULAÇÃO MAGNETODINÂMICA	38
4.2	SIMULAÇÃO MAGNETOSTÁTICA	42
4.2.1	Simulação de Movimento Manual.....	43
4.2.2	Simulação de Movimento com <i>Sliding Band</i>	46

5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	51
5.1	CONCLUSÃO	51
5.2	TRABALHOS FUTUROS	52
6	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

A simplicidade de construção dos motores de indução, bem como sua robustez, fácil manuseio e o fato de serem financeiramente mais viáveis são características que explicam o porquê de serem tão utilizados no ramo industrial. Porém, com o avanço da tecnologia, é imprescindível que dispositivos como esses se tornem cada vez melhores e mais eficientes, mantendo um valor acessível ao mercado.

A modelagem eletromagnética, acompanhando esse avanço tecnológico, vem permitindo análises cada vez mais precisas de sistemas eletromagnéticos complexos, que são o caso das máquinas elétricas. Cabreira (1996) destaca que o método dos elementos finitos (FEM) é capaz de analisar problemas envolvendo campos magnéticos e geometrias complexas, ficando assim mais fácil de descrever o funcionamento desses dispositivos e seus fenômenos, como as correntes induzidas e seu movimento.

O projeto desenvolvido neste trabalho propõe utilizar um *software* 2D gratuito conhecido como FEMM para fazer uma modelagem eletromagnética de um motor de indução trifásico a partir do método dos elementos finitos. Seu desenvolvimento é dividido em cinco capítulos:

Neste primeiro capítulo, são apresentados os desafios ligados à utilização do *software* escolhido, além da complexidade de modelagem de uma máquina elétrica.

No capítulo 2 são revisados conceitos fundamentais para o desenvolvimento do projeto, como o princípio de funcionamento de um motor de indução trifásico e a aplicação do método dos elementos finitos. Nesse capítulo também são apresentadas as técnicas de simulação de movimento de rotor empregadas em modelagem eletromagnética.

No capítulo 3 são apresentados o motor escolhido para o desenvolvimento deste projeto e os *softwares* utilizados no trabalho. Além do FEMM, é utilizado o programa Scilab, que possibilita a criação de um código para simular o movimento do dispositivo. Nesse capítulo também é mostrada a metodologia usada para realizar essa simulação.

No capítulo 4 são mostrados alguns resultados de simulações, bem como um comparativo com os dados de placa do motor de base.

Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros para complemento deste estudo.

1.1 CONTEXTO

Para conduzir o projeto, a empresa WEG S.A., responsável pelo motor que será analisado, forneceu dados fundamentais, tais como as dimensões do dispositivo e as características magnéticas do material utilizado em sua fabricação.

A geometria complexa e o fato do material do motor de indução possuir uma característica não linear (curva de saturação) são empecilhos que podem ser facilmente resolvidos pelo *software* FEMM com o método dos elementos finitos (CABREIRA, 1996). Porém, por se tratar de um programa gratuito, há uma falta de ferramentas para deixar a análise mais precisa, como por exemplo, o fato de ele apenas permitir simulações bidimensionais. Pode-se dizer que o motor de indução é intrinsecamente tridimensional, devido ao seu princípio de funcionamento e sua geometria (inclinação das barras que formam a gaiola de esquilo). Portanto, uma simulação tridimensional permitiria um estudo mais minucioso e detalhado, e conseqüentemente, mais correto. Por outro lado, um cálculo em duas dimensões pode fornecer resultados muito mais rapidamente que uma análise tridimensional, que tem um custo computacional mais elevado.

A simulação do movimento também exige revisão, porque dependendo da técnica adotada pode resultar em problemas densos, acarretando em um tempo de resolução computacional bastante longo.

Pode-se dizer que o principal problema apresentado pelo *software* é o fato de não ser possível efetuar cálculos magnetodinâmicos ao mesmo tempo em que se leva em conta o movimento. De fato, não é só a posição do rotor em relação ao estator que varia com o tempo, mas também as correntes que alimentam as bobinas do estator, bem como as correntes induzidas nas barras do rotor. Necessita-se, então, tentar considerar esses três fatores simultaneamente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é fazer a análise eletromagnética de um motor de indução trifásico do fabricante WEG S.A., localizado no Laboratório de Máquinas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Curitiba, através de simulação via *software*. Essa modelagem visa reproduzir seu funcionamento dinâmico, levando em conta fenômenos como o movimento do rotor, as correntes induzidas nas barras da gaiola de esquilo e a saturação do material ferromagnético presente nos núcleos do estator e do rotor. Esse modelo poderá ser futuramente aprimorado e utilizado em outros projetos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Entender como fazer uma modelagem de um motor de indução trifásico em um software 2D gratuito;
- b) Conhecer algumas técnicas de simulação de movimento;
- c) Desenhar o motor no *software* FEMM;
- d) Determinar as correntes induzidas nas barras do rotor;
- e) Elaborar um código no *software* Scilab que permita a simulação de movimento do motor;
- f) Comparar os resultados da modelagem com os dados de placa, a fim de eventualmente aperfeiçoar os cálculos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

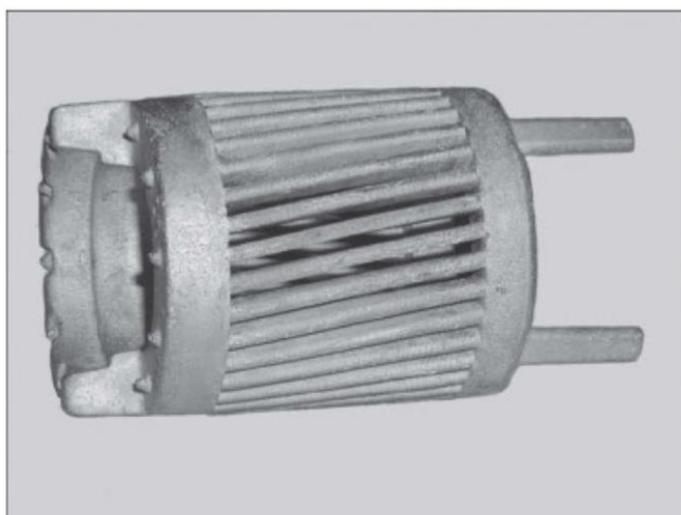
2.1 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

As máquinas elétricas são classificadas em duas categorias: as que são alimentadas por corrente contínua (máquinas CC), e as alimentadas por corrente alternada (máquinas CA). Ambas são formadas por duas partes principais, sendo a parte fixa conhecida como estator, e a móvel, como rotor.

O motor de indução trifásico é uma máquina de corrente alternada, a qual deve ser ligada a um sistema de alimentação trifásico. O circuito elétrico do estator, que forma o campo girante, é formado por três bobinas defasadas umas das outras no espaço e alimentadas por correntes defasadas no tempo. Já a parte rotórica pode ser do tipo bobinado ou do tipo gaiola, sendo esse segundo mais utilizado, pois além de apresentar um aspecto construtivo mais simples, é mais viável economicamente e mais robusto (TORO, 1999).

O rotor de gaiola é formado por barras condutoras curto-circuitadas em suas extremidades, como mostrado na Figura 1. As correntes trifásicas da parte fixa geram um campo magnético girante, que induz tensões nessas barras e, por consequência, geram correntes nas mesmas. A interação entre as correntes induzidas e o campo girante produz uma força resultante, que será responsável pelo torque da máquina.

Figura 1 – Estrutura de rotor em gaiola de esquilo



(Fonte: UMANS, 2014)

A máquina é dita assíncrona, pois apenas produz corrente nas barras e, portanto, torque, quando a velocidade do rotor (n) é diferente da velocidade síncrona (n_s). Se as velocidades fossem iguais, as barras do rotor estariam estacionárias em relação ao campo do estator, e não haveria indução de corrente nas barras (UMANS, 2014). Como o campo girante opera na velocidade síncrona quando a máquina é alimentada a uma frequência constante, o rotor, quando está funcionando no modo de operação como motor, deve girar numa velocidade menor que a velocidade síncrona.

A diferença entre essas duas velocidades é conhecida como escorregamento (s) do rotor. Ele pode ser expresso como uma fração da velocidade síncrona como na equação 1:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1)$$

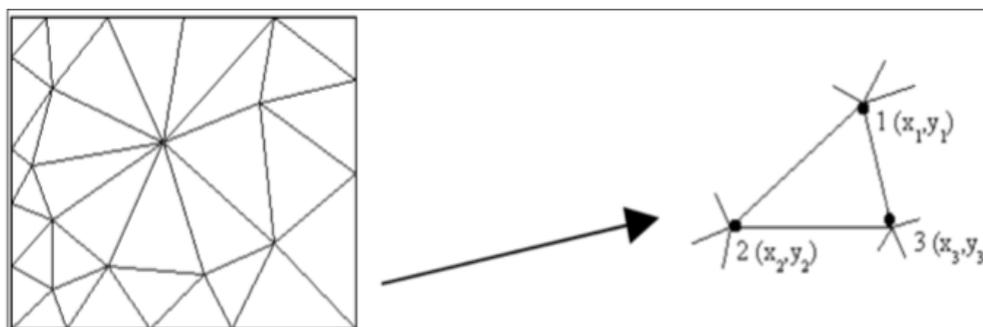
Pelo fato de o campo magnético produzido pelas correntes do rotor girar sempre na mesma velocidade que o campo magnético do estator, o torque é praticamente constante em qualquer velocidade de operação na máquina assíncrona. A velocidade do rotor será a velocidade em que o torque gerado pelo motor se equilibrará com o torque de oposição criado por uma carga conectada ao eixo. Desta forma, essa carga influencia diretamente a operação do motor, visto que quanto maior a carga, menor será a velocidade de rotação do rotor (aumento do escorregamento). Consequentemente, pela lei de Faraday-Lenz, maior será a tensão induzida nas barras do rotor, logo, maior será o valor das correntes induzidas e, consequentemente, do conjugado (UMANS, 2014).

2.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos (FEM) é um método de resolução numérica de um sistema de equações diferenciais parciais de segunda ordem de maneira eficiente e precisa (BASTOS, 2004). Consiste na discretização do domínio de estudo, formando

uma malha onde são definidos vértices e arestas, como mostra a Figura 2, na qual a grandeza de estudo deve ser definida no próprio vértice do elemento finito.

Figura 2 – Malha de elementos finitos com vértices definidos



(Fonte: SOUSA, 2016)

O FEM foi desenvolvido nos anos 50 para estudos mecânicos com aplicações em aeronáutica, mas só a partir dos anos 70 começou a ser usado em eletromagnetismo (BASTOS, 2004), sendo atualmente amplamente difundido entre engenheiros, cientistas e estudantes.

Geralmente, no FEM 2D, a malha é feita com elementos triangulares, e o campo elétrico ou o campo magnético é tipicamente constante no interior de cada elemento (BASTOS; SADOWSKI, 2003). No FEM 3D, comumente são utilizados tetraedros, prismas e/ou hexaedros.

Onde ocorre uma maior variação de campo, como no entreferro de um circuito magnético, é necessário um maior número de elementos finitos, para garantir uma maior precisão de cálculo. Ao mesmo tempo, para reduzir custo computacional, em regiões onde não ocorre muita variação, como a parte externa da coroa de uma máquina, por exemplo, a densidade de elementos pode ser diminuída.

De acordo com Ida e Bastos (1997), o método dos elementos finitos é constituído por três etapas principais: pré-processamento, processamento e pós-processamento.

- Pré-processamento: nesse passo é definido o domínio de estudo. Isso consiste na descrição geométrica do problema, bem como a sua formulação analítica, onde são definidos parâmetros como unidade de comprimento, frequência, profundidade (tratando-se de um *software* 2D), precisão, materiais e as

condições de contorno. A etapa é finalizada com a geração da malha de elementos finitos;

- **Processamento:** é nesse passo que ocorre a resolução das equações pertinentes no domínio discretizado, conforme o caso (eletrostático, magnetostático ou magnetodinâmico) e a formulação correspondente (no caso do FEMM, é utilizada a formulação em potencial vetor magnético nos cálculos magnetostáticos e magnetodinâmicos);
- **Pós-processamento:** no estágio final ocorre a análise da distribuição de campos e de outras grandezas que podem ser calculadas rapidamente a partir do potencial vetor elétrico ou magnético pelo *software* com base nas equações de Maxwell. Essas grandezas podem ser elétricas, magnéticas ou mecânicas, como por exemplo, força e torque (calculadas *a posteriori*), indução magnética e densidade de corrente (calculadas na etapa de processamento).

2.2.1 Condições de Contorno e de Periodicidade

Condições de contorno são condições que devem ser impostas nas fronteiras do domínio de estudo para que a resolução da formulação seja correta e forneça uma solução única. São considerados dois tipos de condições de contorno:

- **Condição de Dirichlet:** nas fronteiras às quais é aplicada uma condição de Dirichlet, o valor do potencial vetor magnético é especificado. Logo, o campo magnético e a indução são tangenciais à fronteira, enquanto o campo elétrico \mathbf{H} é perpendicular.
- **Condição de Neumann:** no FEMM, nenhuma condição é imposta a essa fronteira. Consequentemente, o campo elétrico deve ser paralelo a ela, e a indução e o campo magnético, perpendiculares.

Além das condições de contorno, aplicadas às fronteiras externas do domínio de estudo, podemos aplicar condições a regiões internas ou externas. As condições de periodicidade e antiperiodicidade são tipicamente utilizadas quando se efetua a modelagem de uma fração da máquina apenas.

A condição de periodicidade deve ser aplicada quando a geometria da estrutura e a dos campos se repetem de maneira periódica.

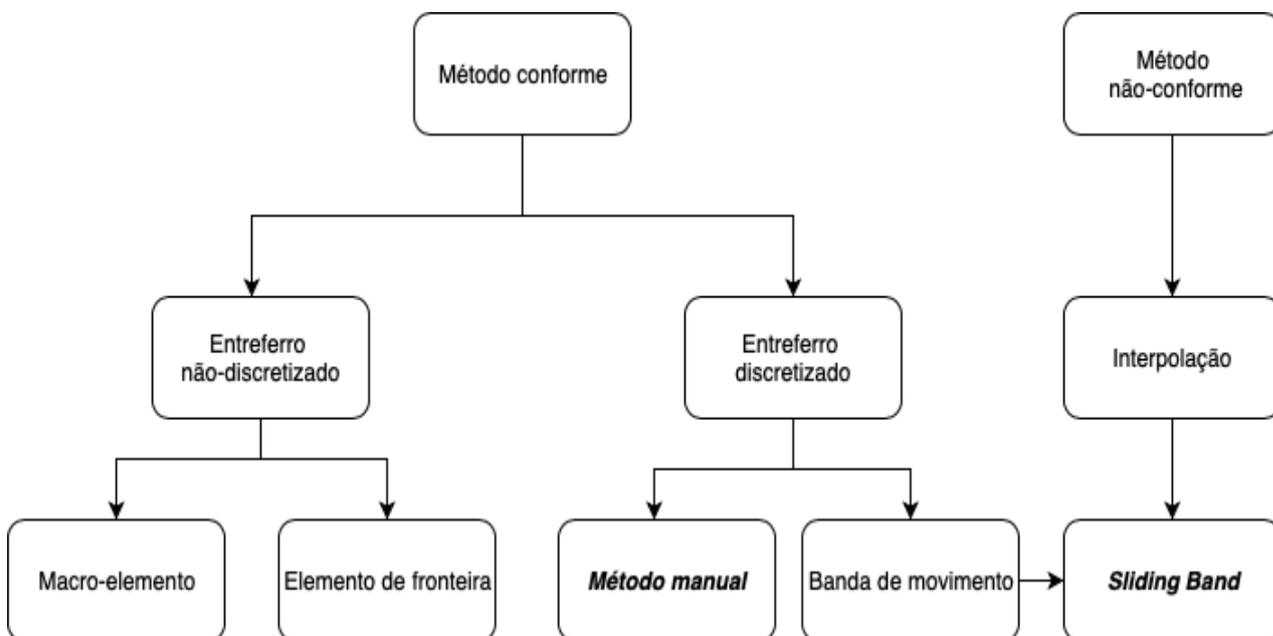
Já a condição de antiperiodicidade deve ser utilizada quando ocorre a repetição da geometria dos componentes, porém a das fontes, como por exemplo, o sentido

das correntes nos enrolamentos, ocorre de forma alternada, espelhada em relação a essa fronteira. (IDA; BASTOS, 1997)

2.3 TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO DE MOVIMENTO

A fim de se obter os melhores resultados da modelagem de um motor, é necessário simular seu movimento. Para isso, diversas técnicas têm sido desenvolvidas, como ilustra a Figura 3.

Figura 3 – Técnicas de simulação de movimento



(Fonte: O autor)

2.3.1 Métodos Conformes

Entende-se por métodos conformes quando as arestas dos elementos vizinhos, onde o movimento é considerado, são coincidentes, garantindo dessa maneira uma continuidade do potencial vetor (ANTUNES, 2005). Para esse tipo de técnica o movimento é considerado na região do entreferro, pois o mesmo apresenta vantagens por ser uma zona amagnética, não condutora e sem fontes (BASTOS; SADOWSKI, 2003). Como apresentado na Figura 3, os procedimentos podem ser subdivididos em métodos com entreferro discretizado, e com entreferro não-discretizado.

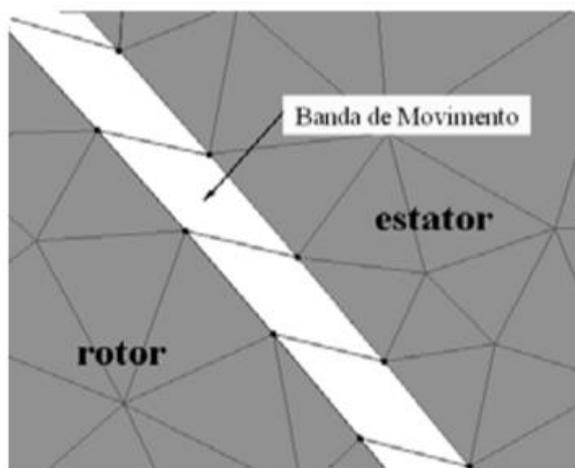
2.3.1.1 Entreferro Discretizado

Neste método destacam-se duas técnicas conhecidas como Banda de Movimento e o método clássico. Ambas consistem na subdivisão do entreferro em elementos finitos, que serão sempre modificados para cada posição do rotor.

O método que chamamos de clássico é uma técnica precisa e eficiente, porém de elevado custo computacional. Para o caso da modelagem de máquinas no FEMM, são definidos dois grupos, um que abrange toda a geometria da parte fixa, e outro que contém todos os elementos geométricos da parte móvel. A cada passo, a parte móvel é rotacionada de acordo com o passo definido. Em seguida, a malha de toda essa região (ou de todo o domínio de estudo) deve ser reconstruída.

Para a técnica da Banda de movimento, como pode ser analisado na Figura 4, a discretização do entreferro une as duas regiões da máquina, permitindo o movimento de passo em passo. Um problema apresentado é a deformação ocasionada nos elementos. Antunes (2005) apresenta que o ruído numérico provocado pode ser evitado adequando-se o passo de cálculo. Cabreira (1996) expõe que a utilização de elementos quadriláteros apresenta vantagens com relação aos triangulares para essa técnica de movimento, visto que esses últimos podem levar a imprecisões dos resultados, porém Antunes (2005) comprovou em sua tese que os resultados foram melhores com os elementos triangulares.

Figura 4 – Método conforme (Banda de Movimento) com entreferro discretizado

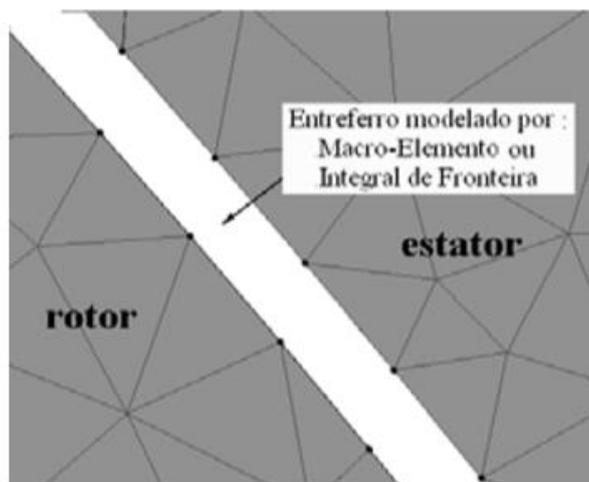


(Fonte: Adaptado - ANTUNES, 2005)

2.3.1.2 Entreferro Não-Discretizado

Nesses métodos, Antunes (2005) expõe que o entreferro não é discretizado da maneira tradicional, ou seja, não serão criados elementos finitos visíveis na região, apenas nós demarcando-os na fronteira do mesmo, assim garantindo que haja uma aresta no lado do rotor correspondente a cada aresta no lado do estator, como ilustrado na Figura 5. Então, conforme o rotor se mova, não há a necessidade de ficar remalhando o entreferro (CABREIRA, 1996).

Figura 5 – Método conforme com entreferro não-discretizado



(Fonte: Adaptado - ANTUNES, 2005)

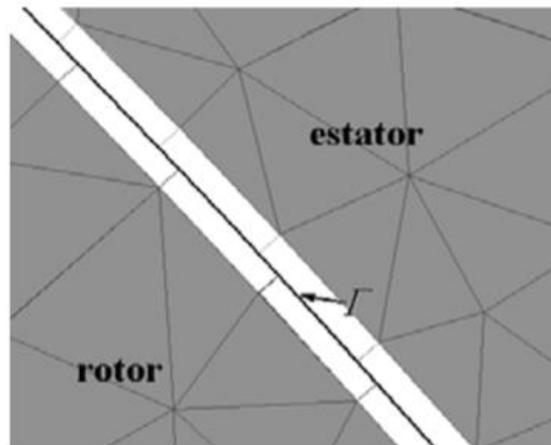
Na técnica conhecida como elemento de fronteira, apesar de ser permitida a livre rotação do rotor, são apresentados como resultados, matrizes densas e não simétricas, comprometendo a solução do problema (CABREIRA, 1996). Já na do Macro elemento são utilizadas condições de antiperiodicidade para sua solução, desenvolvendo uma série de Fourier do potencial vetor, possibilitando também o livre movimento (ANTUNES, 2005). Ao contrário do elemento de fronteira, sua matriz resultante é simétrica, porém os nós do entreferro ainda a tornam densa, resultando em um grande custo computacional (CABREIRA, 1996).

2.3.2 Métodos Não Conformes

Nesses métodos, as arestas dos elementos vizinhos não coincidem, conseqüentemente, a continuidade do potencial vetor não é garantida, ou é imposta de forma fraca (ANTUNES, 2005). Um exemplo é o método da interpolação.

Na Figura 6 tem-se a ilustração de um exemplo de método não conforme.

Figura 6 – Exemplo para método não conforme



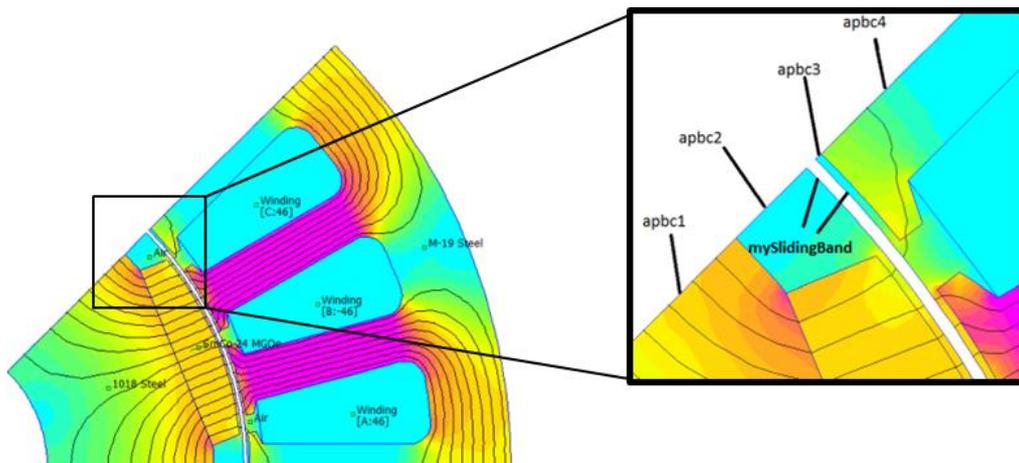
(Fonte: Adaptado - ANTUNES, 2005)

2.3.3 Sliding Band

O método *Sliding Band* é uma técnica de simulação nova, desenvolvida em 2018 pelo próprio autor do *software* utilizado no desenvolvimento deste projeto. Esse procedimento é um cruzamento entre a Interpolação e a Banda de Movimento.

Meeker (2018b) impõe sobre o entreferro uma condição de contorno periódica (caso seja feita a simulação da máquina inteira), ou antiperiódica (se for simulada apenas uma parte da máquina).

Para sua aplicação, como mostrado na Figura 7, cria-se um espaço no entreferro, o qual não será discretizado (ou seja, não possuirá malha de elementos finitos), e a condição de contorno é imposta às arestas de suas bordas (“mySlidingBand”).

Figura 7 – Implementação do *Sliding Band* em máquinas

(Fonte: Adaptado – MEEKER, 2018)

Inicialmente, devem ser definidos os ângulos interno e externo, demarcando as posições iniciais do rotor e do estator. O programa é responsável por produzir uma malha estacionária na região do movimento. Uma interpolação cúbica é realizada para mapear os nós na superfície da condição de contorno.

Seguindo os conceitos de métodos conformes, o rotor e o estator estarão ligados através de uma mesma malha, independente da posição angular entre eles, permitindo o livre movimento sem que seja necessário reconstruir a malha a cada passo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O motor de indução trifásico em estudo está no Laboratório de Máquinas de UTFPR - Campus Curitiba, e foi uma doação da empresa WEG S.A., que além dele, doou outros motores idênticos, fabricados já com defeitos, para diferentes estudos.

Para fazer sua modelagem eletromagnética são utilizados dois *softwares* em conjunto. O primeiro, FEMM, é um código de elementos finitos para formulações geométricas em duas dimensões usado para problemas magnetostáticos, magnetodinâmicos, eletrostáticos, de fluxo de calor e de fluxo de corrente (FEMM, 2018). O outro, Scilab, tem o propósito de servir de suporte para o código computacional no qual é aplicada a metodologia proposta neste trabalho, além de permitir uma comunicação com o *software* no qual é efetuada a modelagem.

Este capítulo descreve as especificações do motor estudado. Nele também é discutida a metodologia aplicada para a realização dos testes abordados no próximo capítulo.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Motor de Base

O motor analisado é um motor de indução trifásico do fabricante WEG S.A., modelo W22, como apresentado na Figura 8. Possui 36 ranhuras em seu estator e 44 barras de alumínio em seu rotor.

O núcleo de aço utilizado no estator e no rotor da máquina apresenta uma curva de saturação ($\mathbf{B \times H}$), fornecida pela empresa.

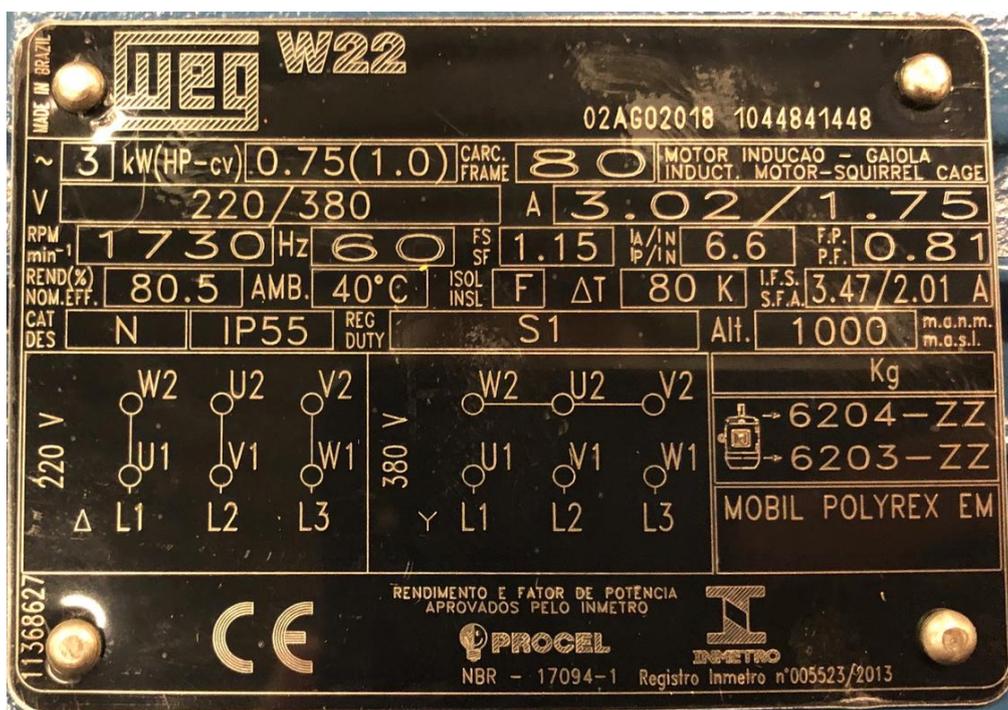
Figura 8 – Motor estudado para o projeto



(Fonte: O autor)

A partir dos seus dados de placa, mostrados na Figura 9, podem-se determinar valores utilizados na simulação.

Figura 9 – Dados de placa do motor estudado



(Fonte: O autor)

O motor pode ser conectado em duas configurações diferentes: estrela (Y) e triângulo (Δ). Para esta modelagem, considera-se a primeira. Logo, alguns valores da Figura 9 podem ser destacados:

- Potência nominal: $P = 0,75$ kW;
- Tensão de alimentação: $V = 380$ V;
- Corrente de alimentação: $I = 1,75$ A;
- Velocidade nominal de rotação: $n = 1730$ rpm;
- Frequência: $f = 60$ Hz.

A partir da folha de dados do motor, também podem ser extraídos outros dados fundamentais para o estudo: o número de polos (p) da máquina e, conseqüentemente, sua velocidade síncrona; e o torque nominal (T).

- Número de polos: $p = 4$;
- Velocidade síncrona: $n_s = 1800$ rpm;
- Torque nominal: $T = 4,14$ N.m.

3.1.2 Softwares

Como mencionado anteriormente, para fazer a modelagem eletromagnética são utilizados dois *softwares* que se comunicam entre si.

O FEMM é um programa gratuito disponível para sistema operacional Windows. É aplicado para a solução do método de elementos finitos para problemas eletromagnéticos em baixa frequência em um plano bidimensional. São quatro os casos que ele pode resolver:

- Problemas magnetostáticos lineares e não lineares;
- Problemas magnéticos harmônicos lineares e não lineares;
- Problemas eletrostáticos lineares;
- Problemas de fluxo de calor em estado estacionário.

O programa apresenta uma região interativa, a qual contém uma interface para a descrição da geometria do problema a ser resolvido e para a definição das propriedades dos materiais e das condições de contorno. Uma vantagem é que ele permite a importação de documentos de desenho do *software* Autocad, assim facilitando a representação geométrica. Na resolução do problema, é gerada uma malha de elementos triangulares, e dependendo do caso escolhido, é acionado um

solucionador que, ao analisá-lo, resolve as equações diferenciais parciais relevantes (MEEKER, 2018a).

A fim de se permitir simulações que seriam inviáveis utilizando inserção manual de dados, o FEMM possui, integrada à sua interface, a linguagem computacional Lua. Como o *software* realiza apenas simulações frequenciais, *scripts* em Lua possibilitam a realização de várias simulações consecutivas, a frequência nula, passo a passo, de maneira a tentar emular um comportamento temporal.

É utilizado então o *software* Scilab que, além de possuir sua própria linguagem computacional de alto nível, permite a integração de outras linguagens, como a Lua, em sua interface, gerando assim uma solução dinâmica (SCILAB, 2019). Trata-se, também, de um programa gratuito, além de ser disponibilizado para outros sistemas operacionais além do Windows, como Linux e Mac Os.

3.2 MÉTODOS

Para iniciar a simulação, primeiramente deve ser elaborada a etapa do pré-processamento, como descrita no tópico 2.2. Então, a simulação do motor de indução trifásico foi dividida em duas etapas:

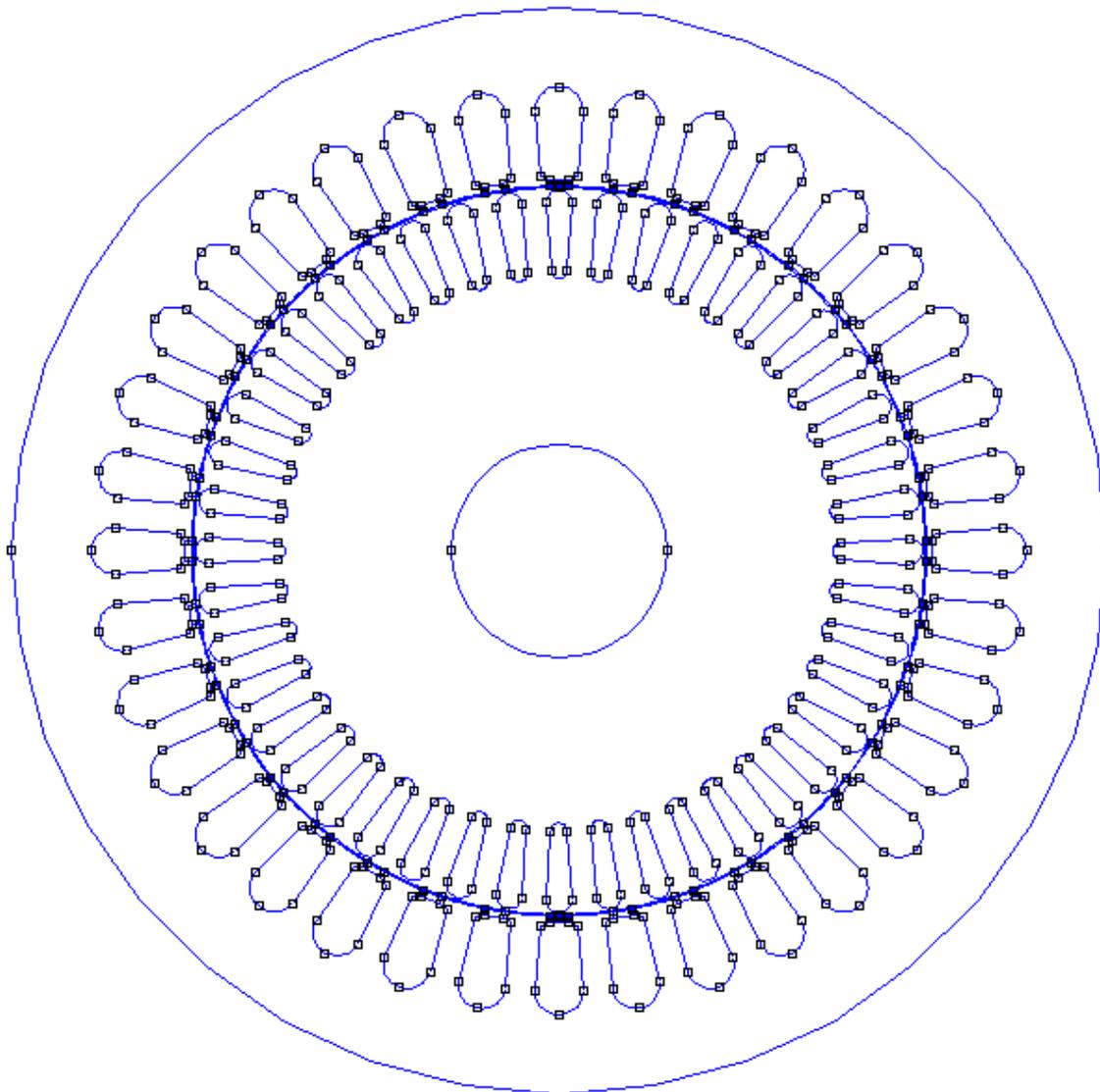
1. Simulação magnetodinâmica: foi feita uma análise prévia aplicando a frequência de escorregamento da máquina, com o objetivo de se determinarem as correntes induzidas nas barras do rotor;
2. Simulação magnetostática: foi feita a análise completa, com imposição das correntes trifásicas instantâneas nos enrolamentos do estator em velocidade síncrona e das correntes induzidas nas barras do rotor, determinadas na etapa anterior, na frequência do escorregamento. Também foi simulado o movimento do rotor, considerando duas técnicas diferentes: o método manual e o *Sliding Band*.

3.2.1 Pré-Processamento

Com as cotas fornecidas pela empresa WEG S.A., a seção transversal do motor pôde ser desenhada no *software* FEMM. Alguns detalhes do eixo e da carcaça externa, por não influenciarem na modelagem eletromagnética, foram retirados, simplificando o problema e diminuindo o custo computacional. A Figura 10 apresenta a

descrição geométrica finalizada, já deixando um vão no entreferro, no qual poderá ser aplicada a técnica do *Sliding Band*.

Figura 10 – Geometria do motor desenhado no FEMM



(Fonte: O autor)

O FEMM disponibiliza uma vasta biblioteca de materiais, porém tanto o material do rotor, quanto do estator, são caracterizados por um aço magnético cuja curva de saturação foi fornecida pela empresa parceira. A criação de um novo material com característica não-linear foi necessária, aplicando os pontos do gráfico disponibilizado. Todos os materiais utilizados na modelagem estão especificados na Tabela 1.

Tabela 1 – Materiais utilizados na modelagem

Região da máquina	Material utilizado
Estator	Aço magnético (curva de saturação)
Rotor	Aço magnético (curva de saturação)
Eixo	Ar
Entreferro	Ar
Bobinas do estator	Cobre
Barras do rotor	Alumínio

(Fonte: O autor)

Nas fronteiras externas do estator foi aplicada uma condição de contorno de Dirichlet. Para o primeiro movimento simulado, o clássico, essa é a única condição imposta. O entreferro é malhado normalmente.

Já para caracterizar o *Sliding Band*, também foi aplicada uma condição de periodicidade nas bordas do entreferro. Os dados desta última são apresentados na Figura 11, destacando também os ângulos interno (*inner angle*) e externo (*outer angle*).

Figura 11 – Condição de contorno periódica caracterizando o *Sliding Band*

The image shows a software dialog box titled "Boundary Property" with a close button (X) in the top right corner. The dialog contains the following fields and sections:

- Name:** A text input field containing "mySlidingBand".
- BC Type:** A dropdown menu set to "Periodic Air Gap".
- Small skin depth parameters:**
 - μ , relative: Input field with value 0.
 - σ , MS/m: Input field with value 0.
- Mixed BC parameters:**
 - c_0 coefficient: Input field with value 0.
 - c_1 coefficient: Input field with value 0.
- Prescribed A parameters:**
 - A_0 : Input field with value 0.
 - A_1 : Input field with value 0.
 - A_2 : Input field with value 0.
 - ϕ , deg: Input field with value 0.
- Air Gap parameters:**
 - Inner Angle, Deg: Input field with value 0.
 - Outer Angle, Deg: Input field with value 0.

Buttons for "OK" and "Cancel" are located to the right of the "Name" and "BC Type" fields, respectively.

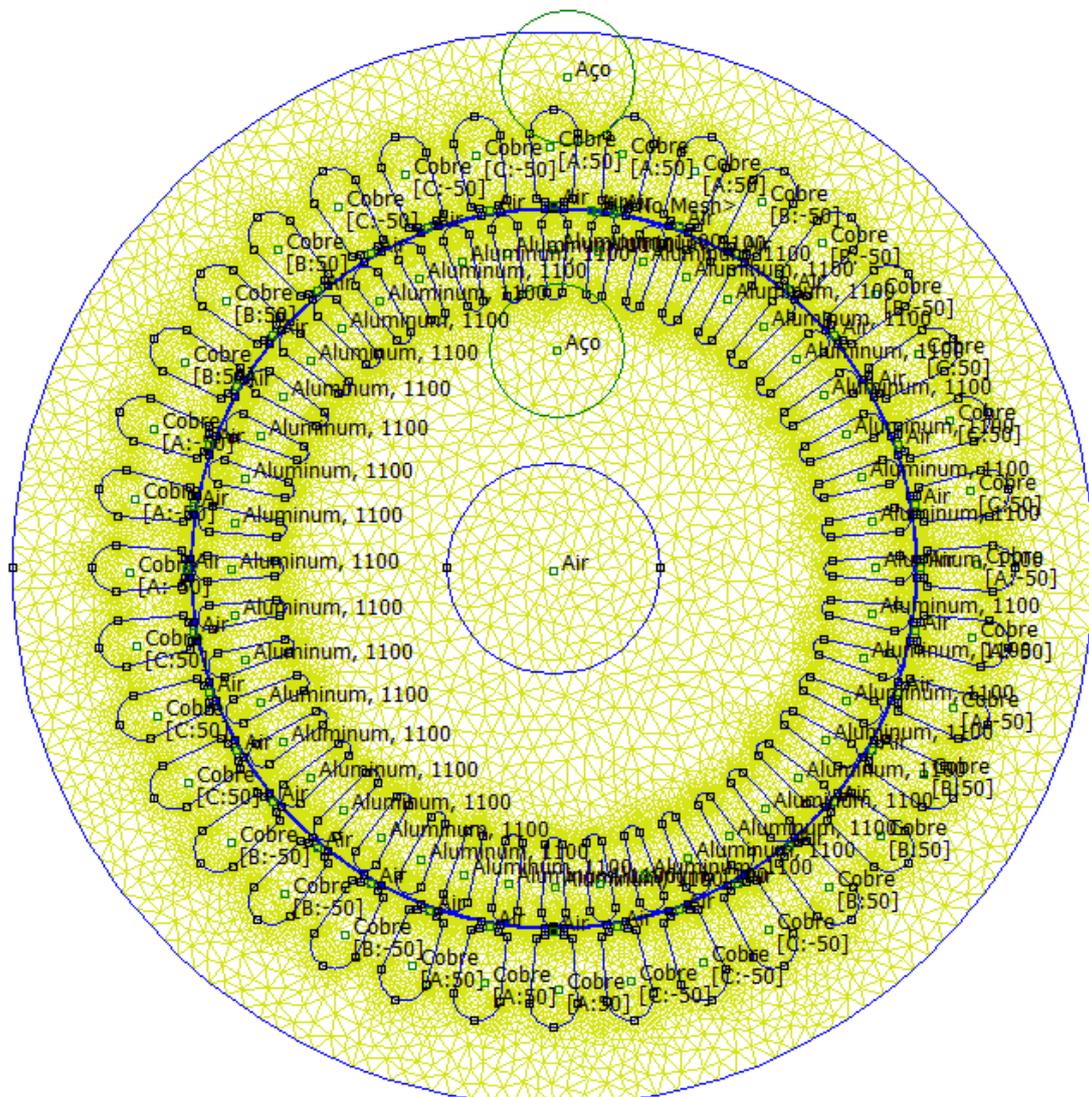
(Fonte: O autor)

Com o intuito de simular a alimentação, foram criados três circuitos diferentes no *software*, chamados de A, B e C, para os enrolamentos percorridos por corrente trifásica. Esses circuitos foram, então, inseridos nas ranhuras do estator, considerando o número de espiras dos enrolamentos e o esquema de bobinagem.

Por se tratar de uma simulação em um software 2D gratuito, a falta de ferramentas impossibilita a simulação da máquina considerando o rotor em gaiola, com barras inclinadas. Algumas alternativas foram apresentadas por Lai e Rodger (1997) e também por Oliveira e Donsión (2017), visto que se trata de um problema já enfrentado por pesquisadores e profissionais da área, mas para fins deste trabalho, por simplicidade, optou-se por desconsiderar a torção do rotor num primeiro tempo.

A etapa do pré-processamento é finalizada com a geração da malha de elementos finitos. A Figura 12 apresenta o desenho final da máquina, discretizado para iniciar a análise magnetodinâmica, com todos os materiais, condições de contorno e circuitos inseridos.

Figura 12 – Malha de elementos finitos do motor de indução trifásico



(Fonte: O autor)

3.2.2 Simulação Magnetodinâmica

A simulação é dita magnetodinâmica, pois foi realizada em uma frequência baixa, referente ao escorregamento da máquina, com o intuito de se determinar as correntes induzidas nas barras do rotor.

O escorregamento foi determinado com base nos dados de placa do motor da Figura 9 e utilizando a equação 1.

$$s = \frac{1800 - 1730}{1800}$$

$$s = 0,0389$$

A frequência do escorregamento (f_s) foi calculada através da equação 2:

$$f_s = s * f \quad (2)$$

$$f_s = 0,0389 * 60$$

$$f_s = 2,334 \text{ Hz}$$

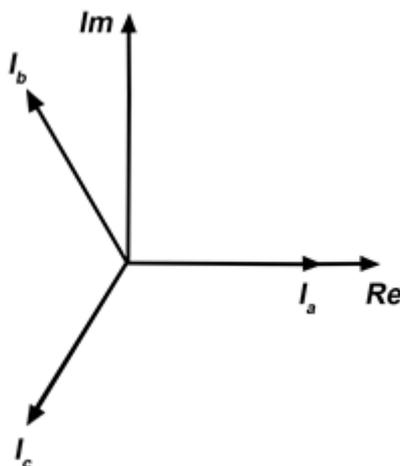
Foram inseridos valores para as correntes trifásicas que alimentam o circuito do estator. Para esse tipo de simulação, deve ser considerada a defasagem entre as correntes, que são impostas de maneira fasorial.

O valor máximo da corrente do circuito A (I_a) foi calculado a partir da corrente nominal (I), considerando uma alimentação sinusoidal:

$$I_a = I * \sqrt{2} \quad (3)$$

Considerando a defasagem de 120° entre as correntes e com o auxílio da Figura 13, na qual o eixo horizontal corresponde à componente real da corrente e o eixo vertical, à componente imaginária, foi possível deduzir as expressões 4 e 5, que definem as correntes dos circuitos B e C, respectivamente.

Figura 13 – Correntes trifásicas complexas defasadas



(Fonte: O autor)

$$I_b = -I * \sqrt{2} * [\cos(60^\circ) - j * \text{sen}(60^\circ)] \quad (4)$$

$$I_c = -I * \sqrt{2} * [\cos(60^\circ) + j * \text{sen}(60^\circ)] \quad (5)$$

A Tabela 2 contém os valores das três correntes, calculados para serem aplicados à simulação.

Tabela 2 – Valores das correntes para os circuitos das bobinas do estator

Circuito	Corrente de alimentação [A]
A	2,4749
B	-1,2374 + j*2,1433
C	-1,2374 – j*2,1433

(Fonte: O autor)

Com a frequência referente ao escorregamento e as correntes dos circuitos inseridas no problema, foram determinadas as correntes induzidas em cada uma das barras do rotor, finalizando a simulação magnetodinâmica.

3.2.3 Simulação Magnetostática

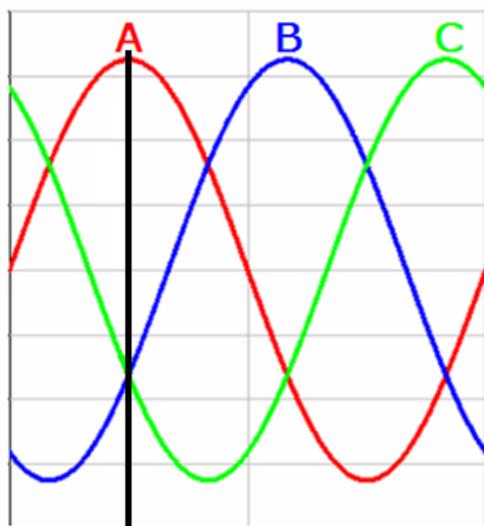
A simulação é dita magnetostática, pois foi realizada em uma frequência nula, considerando-se que serão realizados cálculos sucessivos para os diferentes passos de tempo que compõem o período de cálculo discretizado.

Para esta aplicação, foi elaborado um código em linguagem Lua no Scilab. Com o auxílio de suas funções, foi possível a determinação de gráficos para analisar a variação do torque e das tensões nas três fases, levando em conta o movimento do rotor.

O movimento foi simulado inicialmente de maneira manual, com a rotação imposta à geometria do rotor e posterior remalhagem. Este caso servirá de referência para os cálculos posteriores. Em seguida, também foi simulado o movimento do rotor com a técnica *Sliding Band*, já descrita no tópico 2.3.3, e caracterizada para este projeto na Figura 11.

Como o FEMM realiza apenas cálculo frequencial e as correntes no estator variam com o tempo, foi criada no código uma simulação para tentar aproximar seu comportamento do real. Considerando um ponto inicial, representado por uma barra preta na Figura 14, os valores das correntes foram determinados para cada passo do período discretizado e para cada fase. Assim, para cada grau que o rotor se movimenta, a barra na figura se desloca nessa mesma proporção, e os valores correspondentes de corrente são atribuídos para as três fases. Portanto, nessa fase a corrente não é mais vista como um fasor, mas como uma forma de onda variante no tempo.

Figura 14 – Barra nas correntes trifásicas que se deslocará conforme o movimento



(Fonte: O autor)

Para a inserção das correntes induzidas determinadas a partir do tópico anterior, foram criados 44 circuitos diferentes, intitulados de b1 a b44, que foram inseridos nas diferentes barras do rotor, em ordem crescente no sentido horário.

Ressalta-se que as correntes induzidas foram introduzidas na frequência referente ao escorregamento, enquanto as correntes de alimentação do estator foram inseridas na frequência que corresponde à velocidade síncrona.

Das grandezas de interesse, o torque foi calculado a partir do próprio FEMM, e exportado através do código elaborado no Scilab.

Para o cálculo das tensões induzidas nos enrolamentos do estator (V), a partir do desenvolvimento da lei de Faraday-Lenz, pode-se obter uma relação entre a

derivada temporal do fluxo magnético ($\partial\Phi/\partial t$) e a força eletromotriz, conforme a equação 6:

$$V = -\frac{\partial\Phi}{\partial t} \quad (6)$$

A forma discretizada dessa equação foi implementada no Scilab para o cômputo das tensões induzidas nos enrolamentos do estator.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo serão descritos e apresentados os resultados obtidos no FEMM para as simulações magnetodinâmica e magnetostática.

Para esta última, foram simulados o torque e as tensões trifásicas, a fim de se comparar com os dados de placa da máquina, já destacados no tópico 3.1.1, validando desta maneira a simulação do motor de indução trifásico.

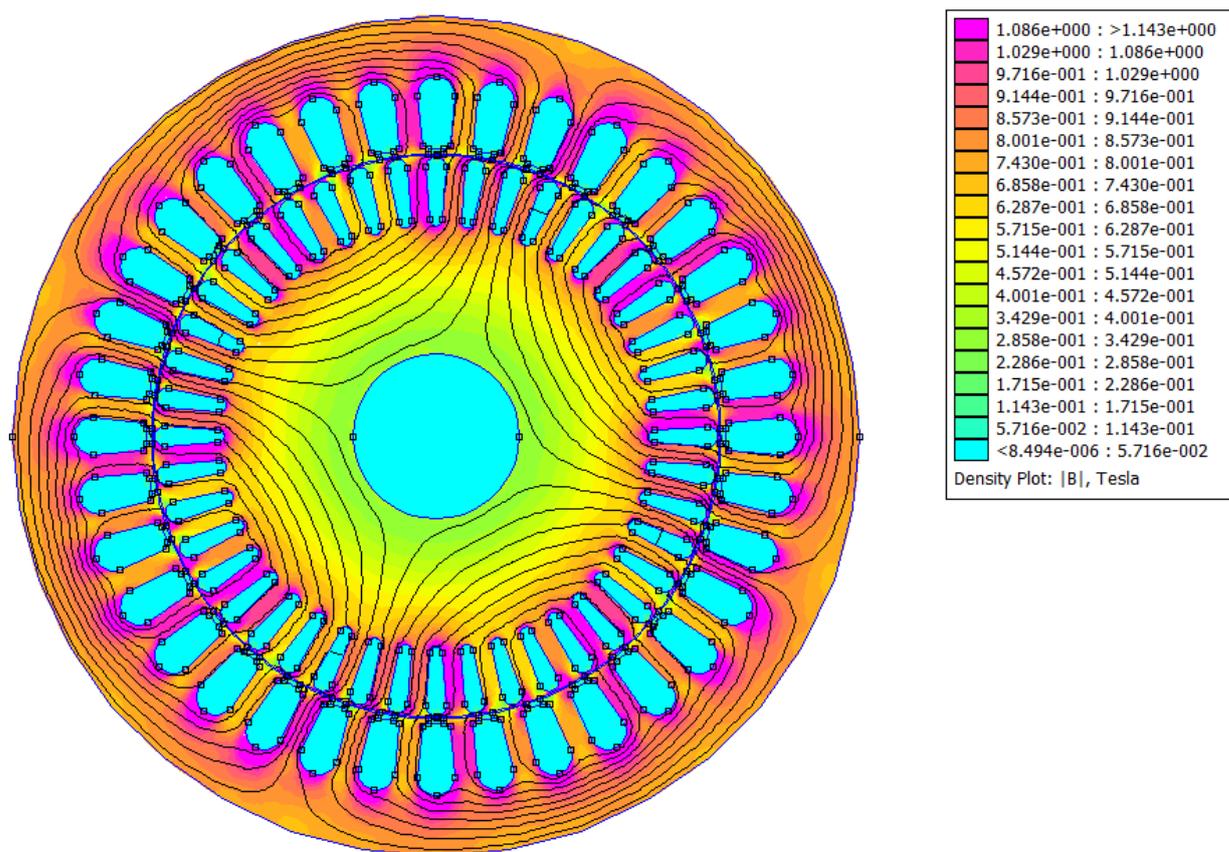
4.1 Simulação Magnetodinâmica

Com o objetivo de se obter as correntes induzidas nas barras do rotor, essa simulação foi realizada na frequência referente ao escorregamento e aplicando correntes trifásicas complexas nas bobinas do estator, como descrito no tópico 3.2.2, sem considerar o movimento do rotor em relação à parte fixa.

A validação da modelagem pode ser confirmada com a Figura 15, que apresenta as linhas de fluxo geradas da simulação, que acabam por definir os quatro polos da máquina com exatidão.

Outro parâmetro presente na mesma figura é a indução magnética, medida em Tesla (T). As regiões onde ocorre maior intensidade de indução, demarcadas pela cor rosa, são as correspondentes a uma maior concentração de fluxo, como alguns dentes do estator e algumas regiões entre barras do rotor. Regiões como eixo, barras do rotor e bobinas do estator não apresentam valores significativos de indução, por isso a cor azul. O valor máximo apresentado foi de, aproximadamente, 1,143 T, que é um valor plausível, por ainda estar na região linear, mas próximo ao joelho da curva de saturação do material, fornecida pela empresa.

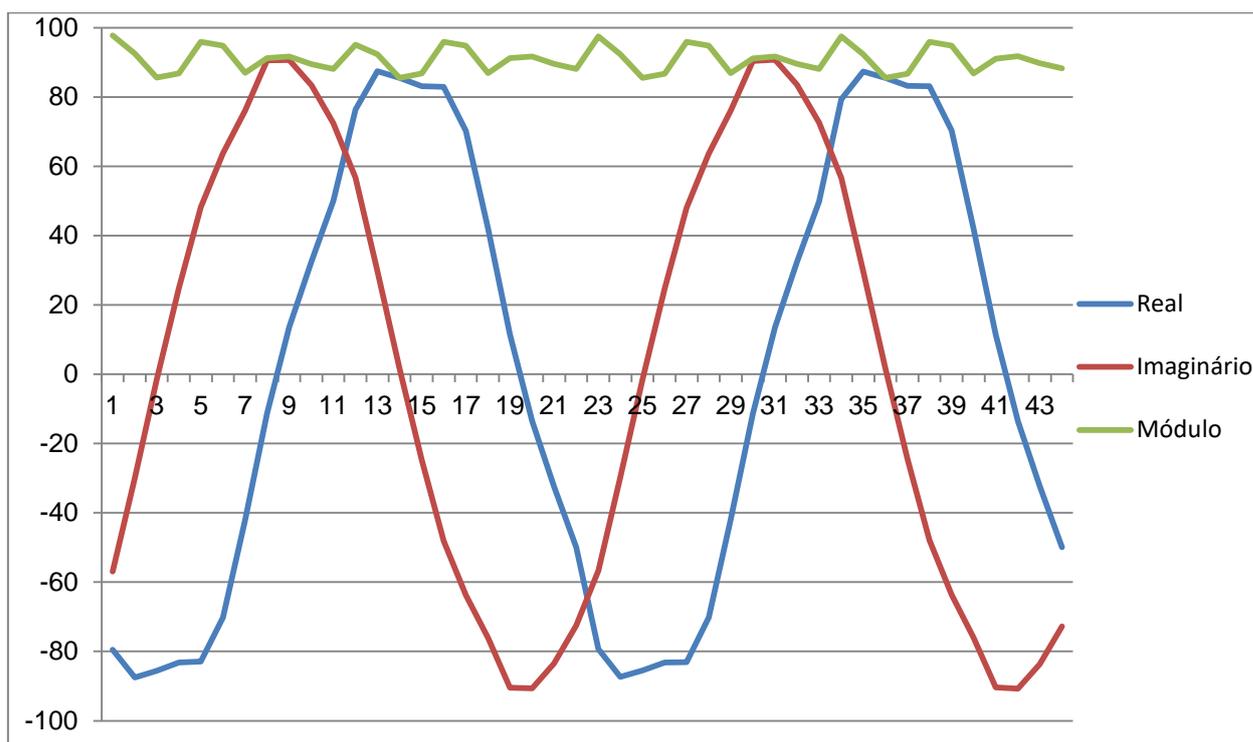
Figura 15 – Módulo da indução magnética para simulação magnetodinâmica



(Fonte: O autor)

Foi analisada, então, a corrente total referente a cada barra, individualmente. Todas possuem componentes real e imaginária distintas, formando curvas sinusoidais, porém os seus módulos são similares, mais uma vez validando a modelagem realizada. Os gráficos da Figura 16 representam a componente real, a componente imaginária e o módulo da corrente na medida em que ela é induzida em cada barra. Sua ordem de grandeza é maior do que a das correntes inseridas no estator, pois há 44 barras no rotor e 36 ranhuras no estator, sendo cada uma destas com 50 espiras em série no seu interior.

Figura 16 – Componentes real e imaginária, e módulo das correntes induzidas



(Fonte: O autor)

Visto que seu formato é de uma senoide, as correntes induzidas (I_{bn}) inseridas para a simulação magnetostática seguem a equação 7:

$$I_{bn} = I_0 * \text{sen}(\omega t + \varphi_n) \quad (7)$$

Onde I_0 é a média do módulo de todas as correntes e n é o número de cada barra.

Na Tabela 3 são expostos esses valores referentes aos gráficos da Figura 16, para as dez primeiras barras, com intuito de ilustrar seu comportamento.

Tabela 3 – Dados da corrente induzida para as dez primeiras barras

Barra	Parte real [A]	Parte imaginária [A]	Módulo [A]
1	-79,5	-56,9	97,7
2	-87.5	-29.9	92.5
3	-85.6	-1.54	85.6
4	-83.2	24.9	86.8
5	-82.9	48.2	95.9
6	-70.2	63.8	94.8
7	-42.0	76.1	86.9
8	-11.4	90.5	91.2
9	13.6	90.6	91.7
10	32.5	83.4	89.5

(Fonte: O autor)

A barra 1 foi tida como referência para os cálculos, cujos dados estão destacados na Tabela 3. Sua defasagem (φ_1), em radianos, foi calculada através da equação 8:

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{\text{Im}\{I_{b1}\}}{\text{Re}\{I_{b1}\}}\right) - \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

Como visto pelo gráfico da parte real da Figura 17, aproximadamente a cada 11 barras a senoide completa meio período. Logo, os demais ângulos referentes às outras barras, também expressos em radianos, podem ser calculados pela equação 9:

$$\varphi_n = \varphi_{n-1} - \frac{\pi}{11} \quad (9)$$

As correntes que foram induzidas na simulação magnetostática apresentam apenas sua parte real, desconsiderando a análise da parte imaginária. Sendo assim, não foi necessário fazer os cálculos para determinar os dados referentes à corrente imaginária.

A média do módulo das correntes foi calculada somando-se todos os módulos de cada barra e dividindo a soma pelo número total de barras, resultando em:

$$I_0 = 90,9 A$$

4.2 Simulação Magnetostática

No código elaborado, primeiramente foram definidos quantos graus o motor rotacionaria ao todo e quantos pontos seriam analisados nesse movimento. Decidiu-se por simular um período elétrico da alimentação do estator, com 180 passos de 1° elétrico e de 0,96° de rotação do rotor. Em seguida, diversos parâmetros já conhecidos foram acrescentados ao problema, tais como a velocidade de rotação, o valor instantâneo da corrente do estator, o número de polos, a frequência e a média do módulo das correntes induzidas. O próximo passo foi elaborar equações para a análise do problema, sendo elas: o cálculo da velocidade síncrona e do escorregamento; uma relação do número de pontos com o ângulo simulado, intitulado como “passo em graus”; e a determinação do passo no tempo.

As correntes no estator e as induzidas nas barras do rotor seguem o mesmo modelo de senoide, como visto na equação 7. O escorregamento interfere diretamente no fator ωt para as correntes induzidas, e também no posicionamento do rotor, que gira mais lentamente que o campo girante segundo o fator $(1 - s)$.

Com os resultados obtidos na simulação magnetodinâmica para a barra de referência, foi necessário acrescentar apenas a defasagem da corrente entre cada barra, garantindo que ela fosse variando a cada passo.

Como a técnica do *Sliding Band* é relativamente nova e há poucas pesquisas utilizando-a, primeiramente foram obtidos resultados para uma simulação de movimento manual, com auxílio de funções do Scilab e da programação em linguagem Lua. Em seguida, foi feita simulação com a técnica descrita neste trabalho. A grande

diferença entre elas, é que na técnica manual ocorre de fato o movimento da máquina ao longo dos passos, ou seja, o rotor vai se deslocando visualmente, enquanto que na outra, o que é visto é apenas o movimento das linhas de campo no estator, simulando o movimento. A malha de todo o domínio de estudo permanece a mesma, e não se vê a geometria do rotor girando.

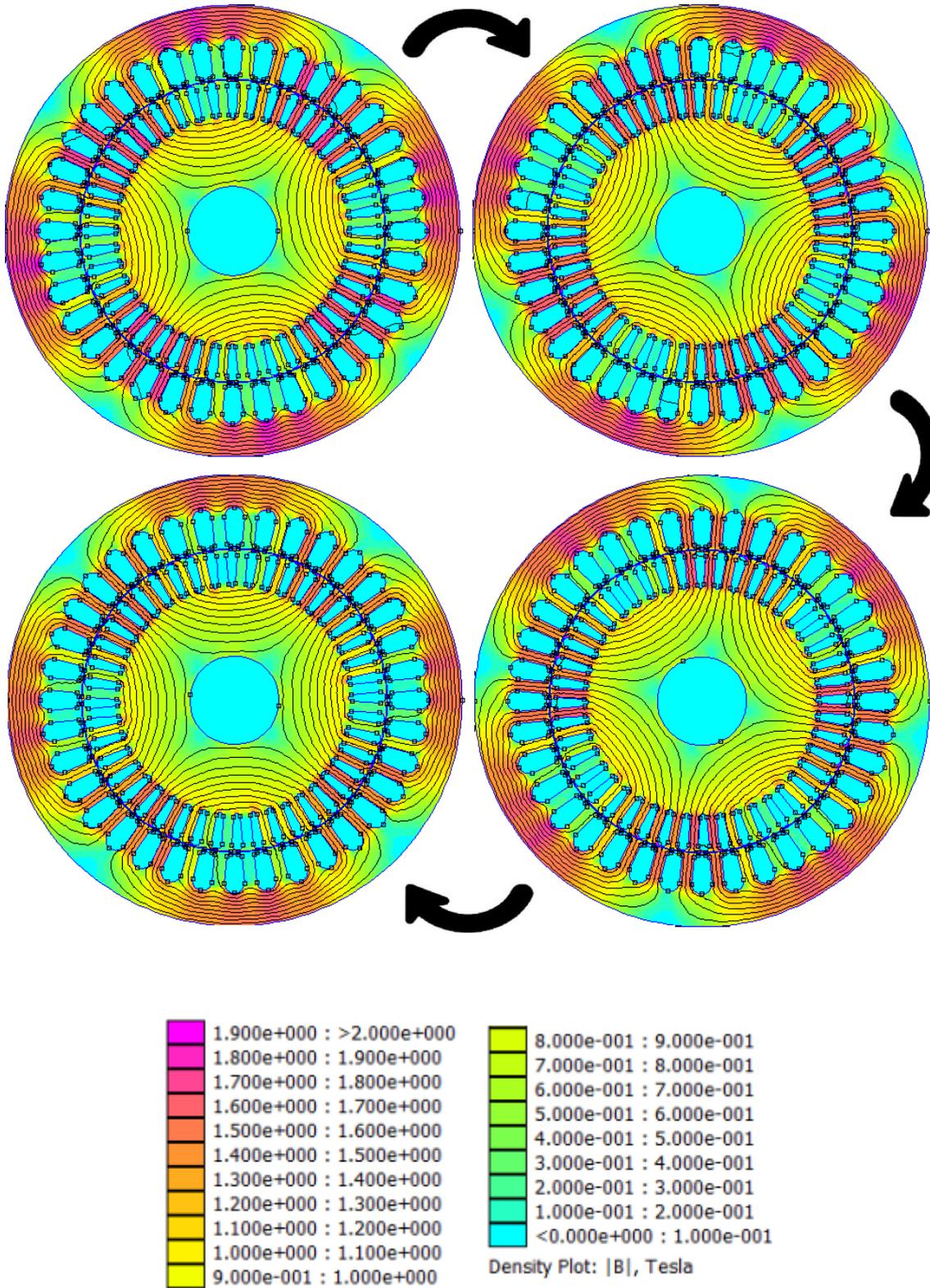
Para ambas as simulações foi estabelecido que o ângulo simulado seria de 180° , analisando o resultado em 180 diferentes pontos, ou seja, a cada etapa o motor teve um movimento de $0,96^\circ$.

4.2.1 Simulação de Movimento Manual

Para a execução dessa técnica foi criado um comando no código para selecionar toda a área do rotor e assim movimentá-lo através uma função já existente em Lua.

A Figura 17 representa as linhas de campo e a intensidade de indução magnética para quatro posições diferentes do rotor (0° , 60° , 120° e 180°). Com elas, pode-se perceber o movimento da máquina, que se dá no sentido anti-horário.

Figura 17 – Análise do movimento através de simulação manual



(Fonte: O autor)

Após todos os passos terem sido simulados, o Scilab gerou dois gráficos a partir dos comandos inseridos anteriormente, um do torque variando com o tempo para toda a simulação, e outro das tensões trifásicas também em função do tempo. Esses gráficos são ilustrados pelas Figura 18 e Figura 19, respectivamente.

Figura 18 – Gráfico do torque em relação ao tempo para simulação manual

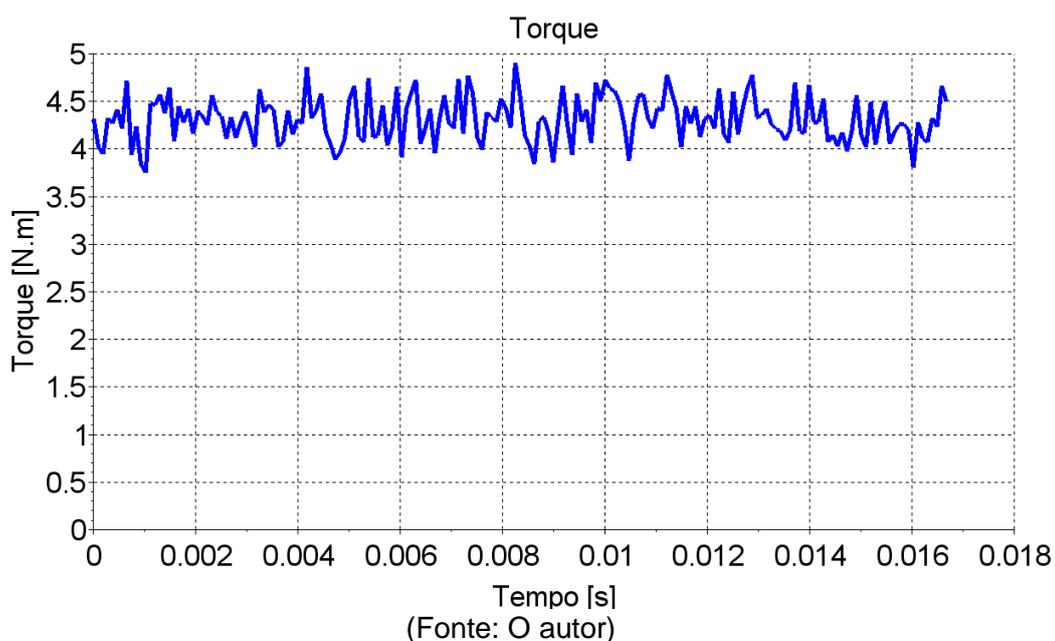
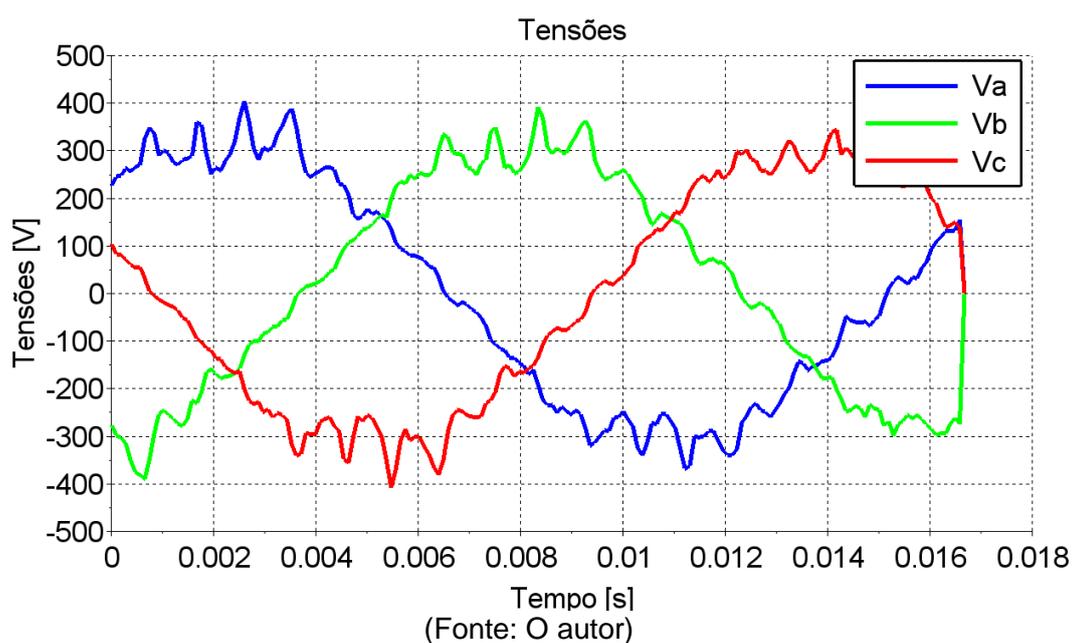


Figura 19 – Gráfico das tensões trifásicas em relação ao tempo para simulação manual



Fazendo-se a média do gráfico do torque, obteve-se um valor de 4,31 N.m, que é um valor relativamente próximo ao apresentado pela folha de dados do motor de indução trifásico.

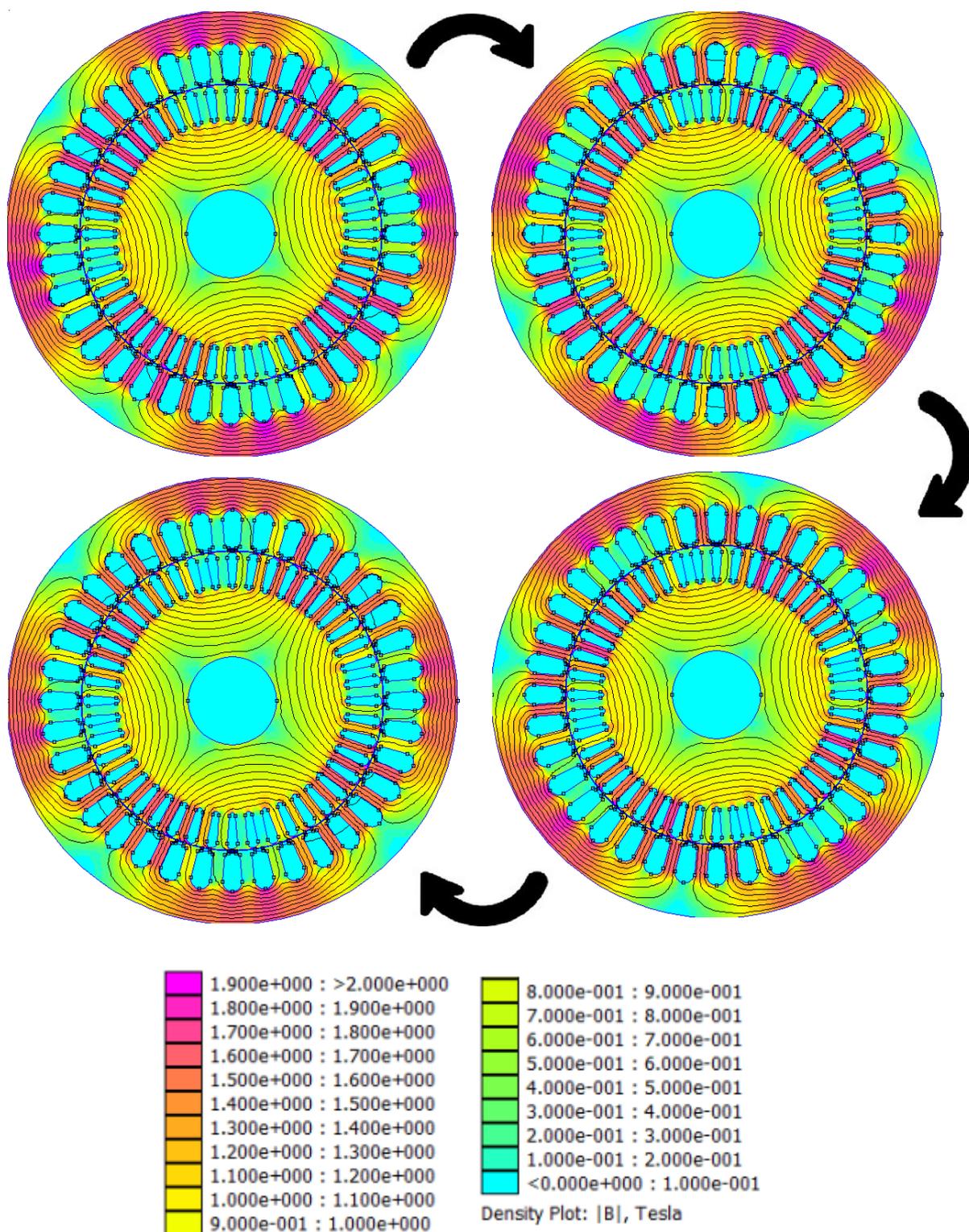
O gráfico das tensões também é plausível, com o valor máximo de aproximadamente 380 V apresentado na Figura 9, bem como as defasagens entre os enrolamentos. Entretanto, a forma delas não é perfeita, porque há uma diferença de relutância ao longo da rotação do rotor, devida à geometria.

4.2.2 Simulação de Movimento com *Sliding Band*

Diferentemente da técnica anterior, nessa simulação não é visto o movimento físico do rotor, apenas o movimento das linhas de fluxo magnético no estator ao longo dos passos.

Com a Figura 20, onde estão destacadas quatro diferentes posições da simulação completa (0° , 60° , 120° e 180°), pode-se perceber esse movimento, que também se dá no sentido anti-horário.

Figura 20 – Análise do movimento através do *Sliding Band*



(Fonte: O autor)

Assim como no tópico anterior, foram gerados dois gráficos, representados pelas Figuras 21 e 22, um para o torque e outro para as tensões trifásicas, respectivamente, ambos ao longo do tempo.

Figura 21 – Gráfico do torque em relação ao tempo para simulação com o *Sliding Band*

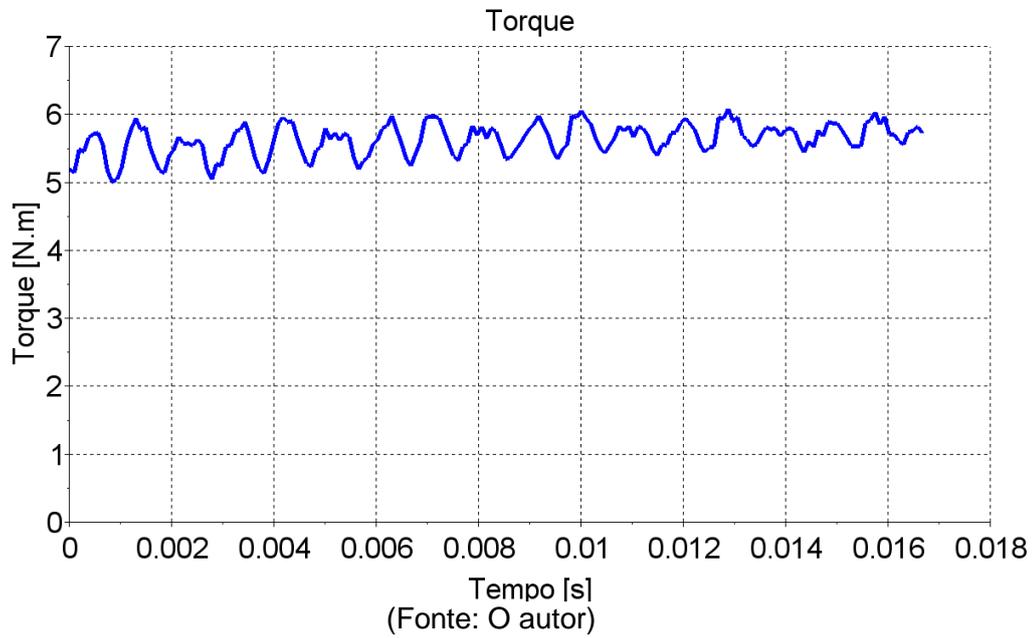
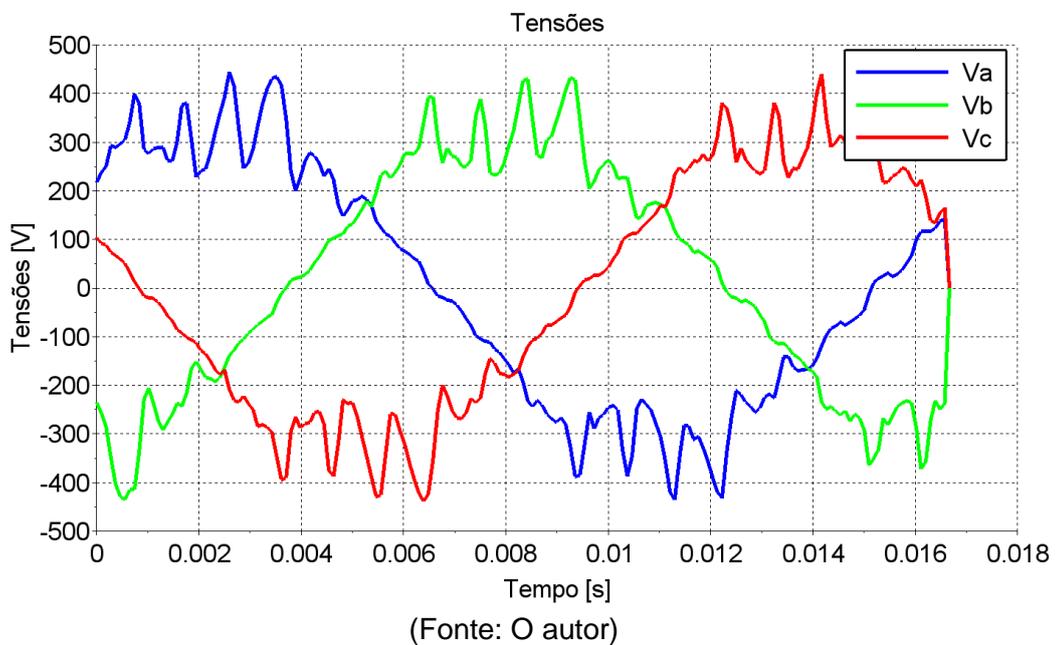


Figura 22 – Gráfico das tensões trifásicas em relação ao tempo para simulação com o *Sliding Band*



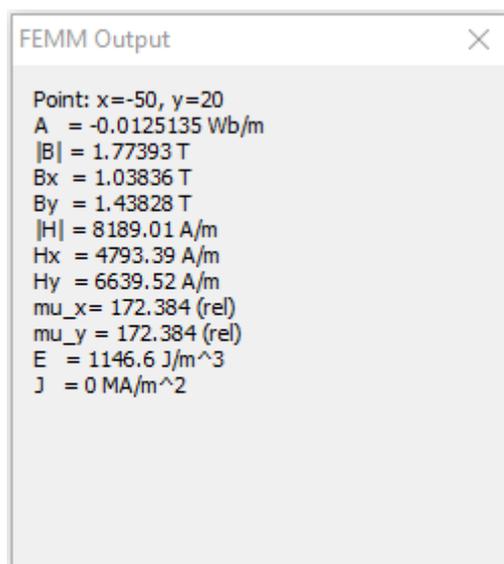
A média apresentada no gráfico do torque foi de aproximadamente 5,63 N.m, o que significa uma diferença de quase 36% comparada com o caso anterior, e uma diferença ainda maior para o dado de placa. Observa-se também um aumento progressivo do valor médio, bem como uma redução progressiva na variação do torque. Esses fatores levam a crer que há um erro na simulação.

Já as tensões apresentam valores um pouco mais aproximados, atingindo alguns valores de pico maiores dos que o da simulação manual.

Analisando-se um mesmo ponto ($x = -50$; $y = 20$), localizado no estator próximo às suas ranhuras, para uma mesma posição de rotação (60°), conseguiu-se destacar as diferenças entre as duas técnicas, apesar de as cartas de campos parecerem semelhantes, como já visto pelas Figuras 17 e 20. Os valores encontrados com a simulação do movimento manual estão expostos na Figura 23, e os obtidos através da técnica *Sliding Band*, na Figura 24.

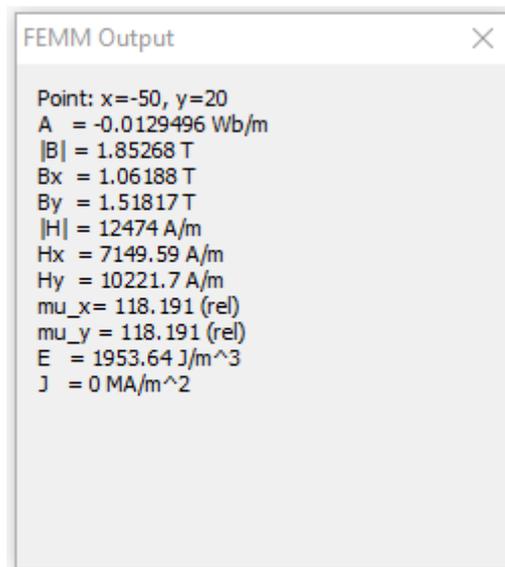
O módulo da intensidade campo magnético ($|H|$) para o segundo caso foi relativamente maior que o do primeiro, já indicando um possível erro nessa simulação, entretanto os módulos da indução magnética ($|B|$) não apresentaram uma diferença muito grande. Pelo fato de os pontos estarem na mesma posição, o que significa que é o mesmo meio (aço magnético), suas permeabilidades (μ_x ; μ_y) deveriam ser praticamente as mesmas, o que poderia validar a técnica do *Sliding Band*, porém as do caso clássico foram levemente maiores que as do outro caso.

Figura 23 – Parâmetros analisados para um ponto na simulação manual



(Fonte: O autor)

Figura 24 – Parâmetros analisados para um ponto na simulação do *Sliding Band*



(Fonte: O autor)

Dessa maneira, não se pôde validar a modelagem com a técnica de movimento do Sliding Band, mas visto que é um método recente, ainda são necessárias novas análises para garantir seu funcionamento correto.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÃO

No presente trabalho de conclusão de curso, foi realizada a modelagem eletromagnética de um motor de indução trifásico. O dispositivo se encontra no Laboratório de Máquinas da UTFPR – Campus Curitiba, de forma que foi possível analisá-lo e obter seus dados característicos de funcionamento para aplicação na simulação. Além disso, duas técnicas de movimento distintas foram aplicadas para a comparação de resultados e validar a modelagem realizada.

Foi descrito o princípio de funcionamento do motor de indução trifásico, visto que para fazer a modelagem, é necessário entender como ocorre seu movimento. Também foi apresentado brevemente o método dos elementos finitos, que é a técnica utilizada pelo *software* na resolução do problema proposto.

Foram descritas diferentes técnicas de simulação do movimento em uma modelagem eletromagnética, dado que é uma tarefa complexa e de difícil execução, e foram escolhidas duas diferentes: uma considerada clássica, a qual foi chamada de simulação manual; e outra relativamente nova, chamada de *Sliding Band*.

As principais características do motor de estudo e dos *softwares* utilizados no desenvolvimento do projeto – FEMM e Scilab – foram apresentadas e detalhadas.

Primeiramente, foi realizada uma simulação magnetodinâmica, com a frequência referente ao escorregamento da máquina, para determinar as correntes induzidas nas barras do rotor. Em seguida, foi feita a simulação magnetostática, passo a passo durante um período elétrico, para as duas técnicas de movimento.

Para ambos os métodos de simulação de movimento, a simulação magnetostática exigiu um grande custo computacional. Com a técnica manual, que apresentou resultados mais próximos aos esperados, o tempo total de simulação foi de, aproximadamente, 34 horas. Para o *Sliding Band*, o tempo foi de 24 horas, entretanto, os resultados obtidos não foram tão satisfatórios. Afirma-se que esse longo tempo de simulação é um empecilho para fazer um estudo aprofundado da técnica a fim de melhorá-la.

Concluindo, o trabalho de conclusão de curso permitiu ampliar os conhecimentos na área de máquinas elétricas, especificamente para o motor de indução trifásico, além de conhecimentos em eletromagnetismo e programação, que são fundamentais para se fazer a modelagem eletromagnética. A proposta do trabalho foi atingida, onde se pôde validar a modelagem comparando com os dados reais do motor de base, porém, estudos ainda são necessários para melhorar a técnica cujos resultados não foram tão próximos dos calculados manualmente.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para eventuais trabalhos futuros, sugere-se fazer um aprofundamento na técnica do *Sliding Band*, bem como uma comparação entre os resultados oriundos da modelagem eletromagnética desse mesmo motor com um ensaio do mesmo, em que mais dados e mais próximos da realidade são obtidos. Para isso, pode ser aconselhável testar o método em uma geometria que permita cálculo linear, mais rápido do que quando se considera a curva de saturação do material. Foram realizados testes considerando uma permeabilidade constante nos núcleos do rotor e do estator, porém foi constatada uma concentração excessiva de fluxo entre as barras do rotor e o entreferro. Na prática, isso não ocorre, pois um fluxo maior tende a saturar o núcleo, que por sua vez deixa de concentrar o fluxo magnético, por operar com permeabilidade reduzida. Logo, não foi possível efetuar cálculos lineares com o motor deste trabalho. Depois de se validar o método *Sliding band*, podem-se melhorar os cálculos da simulação para que se aproximem cada vez mais dos reais.

Outra opção seria fazer a modelagem de outros motores do mesmo laboratório, que possuem defeito, como falha nas bobinas ou apenas uma barra do rotor falhada. Comparando esses resultados com os da simulação de uma máquina perfeita, como a deste projeto, permite o entendimento do que certas irregularidades causam em seu funcionamento.

Outra sugestão é alterar parâmetros da mesma máquina, como tamanho, materiais ou número de barras, e ver o que acarretaria nos resultados, se haveria uma melhora em seu funcionamento comparando-os com o do mesmo motor.

6 REFERÊNCIAS

ANTUNES, O. J. **Formulações conformes e não-conformes com interpolação de ordem elevada para a modelagem do movimento em máquinas elétricas**. 2005. 158 p. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina.

BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-Estática**. [S.I.]: Editora da UFSC, 2004.

BASTOS, J. P. A.; SADOWSKI, N. **Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods**. [S.I.]: Marcel Dekker, Inc, 2003.

CABREIRA, M. de F. R. R. **Análise termo-magnética de motores de indução de pequeno porte utilizando técnicas de elementos finitos em duas dimensões**. 1996. 103 p. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina.

FEMM. **Finite Element Method Magnetics: Download**. 2018. Disponível em: <<http://www.femm.info/wiki/Download>>. Acesso em: 25/05/2019.

IDA, N.; BASTOS, J. P. **Electro-Magnetics and Calculation of Fields**. 2. ed. [S.I.]: Springer-Verlag. 1997.

LAI, H.; RODGER, D. **Modelling Rotor Skew in Induction Machines Using 2D and 3D Finite Element Schemes**. [S.I.], 1997. Acesso em: 04/03/2019.

MEEKER, D. **Finite Element Method Magnetics: Version 4.2 - User's Manual**. [S.I.], 2018a.

MEEKER, D. **Rotor Motion using an (Anti)Periodic Air Gap Boundary Condition**. 2018b. Disponível em: <<http://www.femm.info/wiki/RotorMotion>>. Acesso em: 21/05/2019.

OLIVEIRA, F. T.; DONSIÓN, M. P. A finite element model of an induction motor considering rotor skew and harmonics. In: RENEWABLE ENERGY AND POWER QUALITY JOURNAL, 2017. Malaga. **International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'17)**. Malaga. 2017. P. 119 – 122.

SCILAB. **Algos development**. 2019. Disponível em: <<http://www.scilab.org/software/scilab/algos-development>>. Acesso em: 26/05/2019.

SOUSA, S. G. P. P. de. **Análise do comportamento de motor síncrono pentafásico de ímãs permanentes tolerante a falta de fase pelo método dos elementos finitos.** 2016. 104 p. Tese (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

TORO, V. D. **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** [S.I.]: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1999.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley.** 7. Ed. [S.I.]: AMGH Editora Ltda., 2014.