MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

MODELAGEM E AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO MOTOR *BRUSHLESS DC E AC* PARA OBTENÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS

Frederico Margues da Costa

ORIENTADOR: Geyverson Teixeira de Paula, Dr.

Goiânia
2018

sistema de bibliotecas ufg

EMC

UFG

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade do titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC nº 1204/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforma permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG):

Nome completo do autor: Frederico Marques da Costa

Título do trabalho: Modelagem e Avaliação Computacional do Desempenho do Motor *Brushless DC* e *AC* para Obtenção de Parâmetros Elétricos

2. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento [x] SIM [ ] NÃO[1]

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF do TCCG.

Frederico Marques da Costa
(Nome completo do autor)[2]

Ciente e de acordo:

Cyro Ribeiro Tavares de Pina
(Nome completo do orientador)[2]

Data: 17 / 12 / 2018

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.
Casos de embargo:
- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

[2] As assinaturas devem ser originais sendo assinadas no próprio documento, imagens coladas não serão aceitas.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

MODELAGEM E AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO MOTOR *BRUSHLESS DC* E *AC* PARA OBTENÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás.

Goiânia
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Costa, Frederico Margues da
MODELAGEM E AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO MOTOR BRUSHLESS DC E AC PARA OBTENÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS [manuscrito] / Frederico Margues da Costa. - 2018.
21 f.

Orientador: Prof. Dr. Geyverson Teixeira de Paula.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Elétrica, Goiânia, 2018.
Bibliografia. Apêndice.
Inclui gráfico, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Máquinas Elétricas. 2. Motor Brushless. 3. Elementos Finitos. 4. Ímãs Permanentes. 5. Parâmetros Elétricos. I. Paula, Geyverson Teixeira de, orient. II. Título.

CDU 621.3

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELETRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
Coordenação de Estágio e Projeto Final

ATA DE AVALIAÇÃO DE PROJETO FINAL

Aos 14 dias do mês de dezembro do ano de 2018, foi apresentado e defendido o Projeto Final intitulado Modelagem e Avaliação Computacional do Desempenho do Motor Brushless DC e AC para Obtenção de Parâmetros Elétricos perante a banca examinadora composta pelos membros:

1. Geyverson Teixeira de Paula, orientador e presidente;
2. Célio Correa Nunes Filho ; 3. Lucas Franco de Assis.

Após a exposição do trabalho por parte do(s) autor(es), aluno(s) do curso de Engenharia Elétrica, foram lhe(s) atribuídas as seguintes notas pelos membros da banca:

Aluno(s)	Membro 1	Membro 2	Membro 3
Frederico Marques da Costa	10,0	10,0	10,0

Nada mais havendo a registrar, eu, Geyverson Teixeira de Paula, designado secretário "ad hoc" da banca examinadora, lavrei a presente Ata do ocorrido, a qual, lida e considerada conforme, vai assinada por mim e pelos membros da banca.

Goiânia, 14 de dezembro de 2018.

Geyverson Teixeira de Paula

Célio Correa

Lucas Franco de Assis

"*Tenha em mente suas forças e tome cuidado com suas fraquezas*."

(Rick Riordan)

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por me proporcionar saúde, paciência e sabedoria para que pudesse chegar ao final do curso de graduação.

Agradeço aos meus pais Nelma e Marcus, aos meus familiares e, principalmente, a minha tia Elizabeth que me ofereceram o apoio necessário para que eu pudesse chegar onde cheguei.

A minha namorada, amiga e companheira Izabelle Godinho que me aturou durante todos os longos anos de universidade, apoiando em cada tomada de decisão, nos momentos de alegria, nos momentos de tristeza e nas horas de raiva, me tornando uma pessoa melhor ao longo desses anos, agradeço também pela colaboração nas correções gramaticais do seguinte texto.

Ao meu amigo Daniel Pires, pela companhia nos momentos de estudo e pela parceria em todos os trabalhos que foram feitos juntos dentro e fora da universidade sendo estes cumpridos com êxito.

Agradeço ao meu amigo, Engenheiro Rodrigo Starneck, que me deu total apoio na decisão de transferir para o curso de Engenharia Elétrica e foi grande companheiro durante todos esses anos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Geyverson pela presteza em cada análise do nosso longo projeto, sempre estando disponível e apto a ajudar a qualquer momento, me incentivando na descoberta de novas áreas dentro da engenharia e pelo seu extremo profissionalismo.

E por fim, agradeço a Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação pela infraestrutura oferecida para que o trabalho pudesse ser concluído com êxito.

Resumo

DA COSTA, Frederico Margues. **MODELAGEM E AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DO MOTOR *BRUSHLESS DC E AC* PARA OBTENÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.

O seguinte trabalho tem como objetivo principal a análise computacional, através de softwares de elementos finitos, dos parâmetros elétricos e eletromagnéticos dos motores Brushless DC e AC, visando auxiliar os projetistas do motor proporcionando-os valores mais próximos da realidade. Para tal análise foi utilizado o software Finite Element Method Magnetics (FEMM), simulando um motor Brushless e obtendo todos os parâmetros desejados do mesmo.

Palavras-chave: Motor *Brushless DC* e *AC*. Máquinas Elétricas. Parâmetros elétricos. Elementos finitos. Imãs Permanentes.

Abstract

DA COSTA, Frederico Margues. **MODELING AND COMPUTING EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF THE BRUSHLESS DC AND AC ENGINE FOR OBTAINING ELECTRICAL PARAMETERS** 2018. Course Conclusion Paper (Graduation) – School of Engineering Electrical, Mechanical and Computing, University Federal of Goiás, Goiânia, 2018.

The following work has as main objective the computional analysis, through Finite Elements softwares, of electric and eletromagnetics parameters of Brushless DC and AC motors, in order to assist electric motor designers by providing more realistic numbers (parameters). The analyses were made through the Finite Element Method Magnetics (FEMM) software, simulating a Brushless motor and so elicted the desired parameters.

Keywords: *Brushless Motor DC e AC. Electrical Machines. Electrical Parameters. Finite Elements. Permanent Magnets.*

Lista de Figuras

Figura 1 - Estrutura Motor PEQ.....28
Figura 2 - Distribuição das bobinas nas ranhuras.....29
Figura 3 – Materiais que compõem a estrututra.....30
Figura 4 - Malha gerada no Motor PEQ.....30
Figura 5 - Resultado da Análise do Motor.....31
Figura 6 - Fluxograma da Análise.....31
Figura 7 - Forma de onda da corrente.....32
Figura 8 – Fluxo (Wb) x Ângulo (graus) para corrente I = 0 [A].....33
Figura 9 – Tensão terminal (V.s/rad) x Ângulo (graus) para I = 0 [A].....34
Figura 10 - Torque (N.m) para I = 0 [A].....35
Figura 11 - Fluxo (Wb) x Ângulo (graus) para corrente I = 1 [A].....36
Figura 12 – Tensão terminal (V.s/rad) x Ângulo (graus) para I = 1 [A].....37
Figura 13 – Torque (N.m) para I = 1 [A].....37
Figura 14 - Fluxo (Wb) x Ângulo (graus) para corrente I = 2 [A].....38
Figura 15 - Tensão terminal (V.s/rad) x Ângulo (graus) para I = 2 [A].....39
Figura 16 - Torque (N.m) para I = 2 [A].....39
Figura 17 - Fluxo (Wb) x Ângulo (graus) para corrente I = 3 [A].....40
Figura 18 - Tensão terminal (V.s/rad) x Ângulo (graus) para I = 3 [A].....41
Figura 19 - Torque (N.m) para I = 3 [A].....41
Figura 20 - Fluxo (Wb) x Ângulo (graus) para corrente I = 4 [A].....42
Figura 21 – Tensão terminal (V.s/rad) x Ângulo (graus) para I = 4 [A].....43
Figura 22 - Torque (N.m) para I = 4 [A].....43
Figura 23 - Fluxo (Wb) x Ângulo (graus) para corrente I = 5 [A].....44
Figura 24 - Tensão terminal x Ângulo (graus) para I = 5 [A].....45
Figura 25 - Torque (N.m) para I = 5 [A].....45
Figura 26 - Torque médio (N.m) x Corrente (A).....47
Figura 27 - Constante de Torque (Kt) x Corrente (A).....47

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros construtivos do motor 29
Tabela 2 - Valores de torque para I = 0 [A] 35
Tabela 3 - Valores de torque para I = 1 [A] 38
Tabela 4 - Valores de torque para I = 2 [A] 40
Tabela 5 - Valores de torque para I = 3 [A] 42
Tabela 6 - Valores de torque para I = 4 [A] 44
Tabela 7 - Valores de torque para I = 5 [A] 46
Tabela 8 - Torques Médio, Mínimo e Máximo 46
Tabela 9 - Valores de Torque Ripple 46

Sumário

1 Introdução 13

1.1 Objetivos 16

1.2 Organização do Trabalho 16

2 Análise em Elementos Finitos 19

2.1 Introdução 19

2.2 *Finite Element Method Magnetics* 19

2.3 Linguagem Lua *Script* 20

2.4 Análise Magnetostática *FEMM* 20

3 Análise Matemática Elementos Finitos 22

3.1 Fluxo Concatenado 22

3.2 Força Contra Eletromotriz 24

3.3 Torque Eletromagnético 24

3.4 *Cogging Torque* 25

3.5 *Torque Ripple* 26

4 Resultados da Análise 28

4.1 Introdução 28

4.2 Cálculo dos Parâmetros Elétricos 32

4.3 Resultados para Corrente I=0 [A] 33

4.4 Resultados para Máquina Operando com Corrente. 35

4.5 Resultados para os valores de Torque e Torque ripple 46

5 Conclusão 49

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 51

1 Introdução

As máquinas elétricas estão cada vez mais difundidas no nosso cotidiano. Na grande maioria dos casos, passam imperceptíveis, mas ainda assim, possuem grande influência nas nossas atividades diárias, mesmo que indiretamente.

Dentre estas atividades encontram-se as responsáveis pela simples abertura de um portão eletrônico como também por atividades mais complexas, como o funcionamento de esteiras, turbinas dentre outros instrumentos presentes nas indústrias.

Atualmente os motores de indução são as máquinas mais utilizadas na planta industrial brasileira (ELETROBRAS, 2015). Sua utilização em larga escala no setor industrial vem do fato de que este tipo de motor é mais barato e de mais fácil manutenção se comparado com as alternativas de mercado, principalmente no que se diz respeito aos motores de corrente contínua (CC). Este tipo de motor possui vantagem em aplicações numa estreita faixa de velocidades, mas ainda assim seu maior benefício é o baixo custo de mercado (SANTOS, 2015).

Devido à vasta utilização de motores no nosso dia-a-dia, faz-se necessário um estudo cada vez mais detalhado dos mesmos, buscando novas tecnologias que viabilizem o seu uso, visto que os motores, de maneira geral, possuem baixo rendimento, o que acarreta em gastos desnecessários desde a sua fabricação até sua utilização. Com essa nova visão de melhoramento das máquinas elétricas e a descoberta de novos materiais e tecnologias de análise iniciou-se o estudo dos motores de ímãs permanentes sem escovas.

As máquinas que não possuem escovas e comutadores mecânicos, como são requeridos nos motores de corrente contínua convencionais ou nas máquinas síncronas de corrente alternada, são denominadas de *Brushless* (MILLER, 1989; KENJO; NAGAMORI, 1984).

Ao se tratar de máquinas *Brushless* os motores de ímãs permanentes ganham destaque, isto devido a sua alta eficiência energética diante das outras categorias de máquinas elétricas. Com o desenvolvimento da indústria de componentes eletrônicos que permitiu um maior controle de velocidade e torque e também da indústria de ímãs permanentes, a fabricação dos motores *Brushless* sofreu um grande impulso (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2003), (NASAR, 1987).

Tratando-se de aplicação, os motores *Brushless* podem ser empregados em qualquer aplicação que se se utilize motores de indução. Além disso, estes motores apresentam uma alta

eficiência para uma maior faixa de velocidades (SANTOS, 2015), tornando-o bastante promissor.

A título de exemplo, a substituição do motor de indução operando em velocidade constante pelo motor a ímãs permanentes com controle de velocidade variável, além de otimizar a eficiência energética, reduz o tamanho físico do compressor e melhora o desempenho termodinâmico para refrigeração sob a aplicação de técnicas alcançadas de modificação e de controle de velocidade (RASMUSSEN; RITCHIE, 1997), (PERSSON, 2007), (LAI et al., 2007).

Os motores sem escovas são utilizados na indústria de eletrodomésticos, automotiva, aeroespacial, medicina, automação industrial e instrumentação. Essa utilização em áreas diversificadas da indústria ocorre, pois, este tipo de motor, se comparado aos motores com escovas de corrente contínua e com os motores de indução, possuem dimensões reduzidas, tornando-os de extrema valia em aplicações as quais o espaço e o peso são fatores críticos. Algumas de suas principais características são: melhor velocidade *versus* torque; alta resposta dinâmica; alta eficiência e longa vida útil. (NIADA, 2015).

As máquinas elétricas rotativas podem funcionar como motor ou gerador. As duas partes básicas as quais compõem as máquinas elétricas são os núcleos do estator e do rotor. Estes núcleos, com raras exceções, são constituídos por lâminas metálicas agrupadas em pacotes de chapas. Quando se trata de máquinas de maior rendimento, como os geradores, sua construção é feita em chapas de aço-silício (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006), (NASAR, 1987).

Os motores de ímãs permanentes sem escovas são divididos em duas categorias, estas que são definidas pela forma de onda da força contra eletromotriz: senoidal e não senoidal. O estator destas máquinas é trifásico e o rotor aloja os ímãs permanentes. Os motores síncronos de ímãs permanentes necessitam de um controle mais refinado e sofisticado, e possuem forma de onda da força contra eletromotriz senoidal. Por sua vez, o de força contra eletromotriz de forma trapezoidal, requer um controle mais simples (NIADA, 2015). De acordo com (NASAR; BOLDEA; UNNEWEHR, 1993), a nomenclatura *Brushless DC* deve-se à máquina síncrona com imã permanente no rotor, com forma de onda não senoidal, ser comercializada juntamente com seu conversor de potência. Esse conjunto comporta-se como uma máquina CC, mas com um comutador eletrônico. Segundo (MILLER, 1989), o motor CC de ímãs permanentes sem escovas possui características de funcionamento semelhantes às máquinas de corrente contínua,

a diferença se encontra no fato do motor *Brushless* não necessitar de manutenções das escovas responsáveis pela comutação de corrente, como ocorre no motor CC. Além disso, podemos destacar outras vantagens como a eliminação da radio interferência (RFI); das faíscas, que podem ser fontes de combustão em atmosferas inflamáveis; e dos detritos e poeiras oriundos das escovas, que podem danificar os rolamentos e formar caminhos para arcos elétricos.

O desenvolvimento de motores elétricos à ímas permanentes foi um feito marcante no momento, contudo, encontra-se limitado. Assim, para seu aprimoramento, pode-se pensar em novos materiais para sua construção (SENS, 2001).

Graças aos avanços nas ciências dos materiais e a descoberta dos ímãs de terras raras (Nd-Fe-B), a utilização do motor de ímãs permanentes sem escovas (*brushless*) vem se tornando uma opção mais atrativa ao mercado em relação ao motor de indução (PRADO, 2016).

Ao se utilizar os ímãs permanentes de terras raras consegue-se melhorar determinados parâmetros do motor, tais como: densidade de potência, desempenho dinâmico e qualidade. Outro ponto a se destacar é que a utilização desses ímãs melhora o desempenho do motor em regime permanente (GIERAS, 2002).

Como existem limitações da densidade de fluxo magnético no ferro, a utilização dos ímãs permanentes, no rotor dos motores, exige que se tenha conhecimento das propriedades magnéticas do material ferromagnético que constitui a estrutura do estator. (HENDERSHOT; MILLER, 1994).

Um ponto a ser destacado é que não apenas o desenvolvimento de materiais proporcionou o desenvolvimento das máquinas elétricas, mas também o desenvolvimento dos computadores e ferramentas computacionais, visto que estes proporcionam uma análise computacional que auxilia na obtenção de parâmetros e permite aos projetistas desenvolver produtos com maior qualidade e menor custo possível, tudo isto muitas vezes ligado ao método dos elementos finitos, o qual proporciona uma análise mais próxima do real, disponibilizando os devidos parâmetros para produção do motor (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2003), (NASAR, 1987).

A utilização do Método dos Elementos Finitos é utilizada devido a este proporcionar soluções aproximadas para derivadas parciais e equações diferenciais dadas as condições de contorno necessárias. De maneira geral este método é utilizado em eletromagnetismo, onde se busca soluções para determinadas grandezas, tais como: intensidade de fluxo elétrico, campo

elétrico, campo elétrico, intensidade de campo magnético, densidade de fluxo magnético, torque eletromagnético entre outros. (JULIANE, 2007).

O projeto e desenvolvimento de motores deve levar em consideração diversos fatores que podem interferir na sua operação. Assim grandezas como o fluxo magnético, a força contra eletromotriz, *cogging torque*, momento de inércia, indutância entre outros. Visando a obtenção destes parâmetros se necessita implementar novos métodos de análise, como o Método dos Elementos Finitos, pois assim os valores obtidos em bancadas podem ser complementados com maior exatidão.

1.1 Objetivos

Tem-se como objetivo principal a obtenção dos parâmetros elétricos (fluxo concatenado, força contra eletromotriz, resistência de fase, *cogging torque*, torque eletromagnético e *ripple* de torque) de um motor *Brushless DC*.

Como objetivos secundários têm-se:

- modelagem do motor *Brushless DC* em Elementos Finitos;
- análise dos parâmetros do motor sobre diferentes metodologias e normas;

1.2 Organização do Trabalho

O capítulo 01 trata de uma introdução e contextualização do conteúdo o qual será abrangido durante o desenvolvimento do trabalho e apresentar os objetivos principais e secundários do mesmo.

O capítulo 02 aborda o método dos elementos finitos, onde se busca apresentar ao leitor o funcionamento do *software FEMM,* a linguagem de programação Lua *script* além de abordar a análise matemática que existe acoplada a análise computacional.

No capítulo 03 inicia-se a abordagem da análise matemática do motor em estudo, apresentando todos os componentes que formam o mesmo e todos os cálculos e passos para que se chegue aos objetivos propostos. E com base nos conceitos apresentados no capítulo o leitor está preparado para ter um entendimento mais aprofundado dos resultados da análise final do motor.

Com base nos capítulos já apresentados, o capítulo 04 surge para apresentar ao leitor os resultados alcançados com a análise em elementos finitos, apresentando de forma resumida algumas informações, as quais são de extrema importância para o projeto de motores *Brushless.*

O capítulo 05 apresenta a conclusão dos resultados obtidos com todas simulações realizadas, abrangendo o quão importante é o método de análise em elementos finitos e que este deve ser cada vez mais interligado ao projeto de máquinas elétricas no século XXI.

2 Análise em Elementos Finitos

2.1 Introdução

O Método dos Elementos Finitos (MEF) está ganhando cada vez mais espaço quando se trata de análises ligadas aos problemas de engenharia. Sua evolução se deu principalmente pelo fato do desenvolvimento das ferramentas computacionais, estas que por sua vez proporcionam uma análise cada vez mais próxima da realidade e em um menor espaço de tempo.

A evolução das ferramentas computacionais proporciona o desenvolvimento de projetos de máquinas elétricas com um nível de detalhamento numérico superior aos encontrados em décadas passadas. Desta forma, reduziu-se nas linhas de produção o desperdício de tempo e materiais iniciando uma nova era de otimização de projetos.

O presente capítulo visa apresentar como o trabalho com o MEF pode facilitar as atividades nas mais diversas áreas da engenharia além de sua formulação básica. Outro ponto a ser apresentado será o *software* o qual foi utilizado para realizar as análises do motor *Brushless* em estudo, identificando as equações utilizadas e descrevendo suas principais características.

2.2 *Finite Element Method Magnetics*

Para realizar as análises do motor *Brushless* utilizou-se o *software Finite Element Method Magnetics (FEMM),* este que é de licença livre e de manipulação simples, necessitando apenas do entendimento da linguagem de programação Lua *script*, esta que é baseada na linguagem de programação C, para que as análises sejam feitas de maneira mais prática, e desta forma, encontrar os parâmetros necessários para análise do motor.

A escolha do *software* foi feita por este ser um conjunto de programas que resolve problemas eletromagnéticos de baixa frequência em duas dimensões de domínios planares e axissimétricos. Outro ponto a se destacar é que o *FEMM* permite a criação da geometria necessária para análise além de ter a possibilidade de importação de outros formatos de arquivo tais como os arquivos no formato DXF (*Drawing Exchange Format*), possibilitando desta forma a análise de geometrias já existentes. Atualmente o *FEMM* aborda problemas

lineares e não lineares de magnetostática além de problemas lineares de eletrostática e fluxo de calor.

No *FEMM* a linguagem Lua *script* possui um modo interativo, onde somente uma instância é executada a cada tempo. Essa única instância do Lua pode analisar a geometria e avaliar o resultado (pós processamento).

2.3 Linguagem Lua *Script*

A linguagem Lua nasceu em 1993 na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ) para ser utilizada em um projeto da Petrobras. Atualmente essa linguagem de programação é a única criada em um país em desenvolvimento a ganhar projeção mundial (MARTINELLI, SIMONASSI, TAVARES, 2018).

Lua é uma linguagem de programação de extensão projetada para dar suporte à programação procedimental em geral e que oferece facilidades para a descrição de dados. Essa linguagem também oferece um bom suporte para programação orientada a objetos, programação funcional e programação orientada a dados. Foi planejada para ser utilizada em qualquer aplicação que necessite de uma linguagem de *script* leve e poderosa e por ser uma linguagem de extensão, não possui a noção de um programa principal, ou seja, funciona somente se estiver embarcada em um programa hospedeiro (IERUSALIMSCHY, FIGUEIREDO, CELES, 2008).

Na linguagem de programação Lua tem-se alguns diferenciais de suma importância, entre eles: o uso de técnicas de programação funcional; a utilização de estrutura de dados; uso de co-rotinas e a comunicação com o código escrito em C (IERUSALIMSCHY, 2009).

Atualmente essa linguagem é utilizada nas mais diversas áreas, desde grandes aplicativos para *desktops* como o *Adobe Photoshop Lightroom*, até *software* para sistemas embarcados. Outra grande utilização da Lua é na área de jogos e em equipamentos de área de segurança, sendo a linguagem de *script* embutida em ferramentas com *Wireshark*, *snort* e *nmap* (IERUSALIMSCHY, 2009).

2.4 Análise Magnetostática *FEMM*

Nas análises de problemas eletrostáticos onde o campo é invariante no tempo a intensidade de campo (H) e a densidade de fluxo (B) são obtidas por meio das seguintes equações (MEEKER, 2018):

$$\Delta \text{ x } E = J \quad (1)$$

$$\Delta \cdot B = 0 \quad (2)$$

Com base nas equações acima temos a relação construtiva entre B e H, conforme equação (3), sendo esta (MEEKER, 2018):

$$B = \mu H \quad (3)$$

O *FEMM* trabalha em busca de encontrar um campo que satisfaça (1) e (2) através da abordagem do potencial vetor campo magnético, desta maneira a densidade de fluxo pode ser escrita em termos do potencial vetor (A), conforme equação (4) abaixo (MEEKER, 2018):

$$B = \nabla \text{ x } A \quad (4)$$

Esta definição de B satisfzaz a equação (2), desta maneira a equação (1) pode ser escrita conforme equação (5) (MEEKER, 2018):

$$\nabla \text{ x } (\frac{1}{\mu B} \nabla \text{ x } A) = \text{J} \quad (5)$$

Para problemas isotrópicos lineares e assumindo a lei de Couloumb como $\nabla \cdot A = 0$, temos que a equação (5) é resumida conforme equação (6) abaixo (MEEKER, 2018):

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = \text{J} \quad (6)$$

Desta forma o problema B – H com relação não linear pode ser resolvido. A vantagem de utilizar o potencial vetor para formulação é que todas as condições podem ser satisfeitas com a combinação de equações simples. Desta forma, se A é encontrado, B e H podem ser deduzidos por meio de diferenciação de A (MEEKER, 2018).

3 Análise Matemática Elementos Finitos

3.1 Fluxo Concatenado

Quando se tem uma variação de campo magnético este produz um campo elétrico no espaço. De acordo com a equação de Maxwell, equação (7), conhecida como lei de *Faraday*, tem-se:

$$\oint_C E \cdot ds = -\frac{d}{dt}\int_S B \cdot da \quad (7)$$

Logo, se conclui que a integral de linha da intensidade de campo elétrico E ao longo de um contorno fechado C é igual a razão, no tempo, da variação de fluxo magnético que concatena, ou seja, passa através, aquele contorno (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2003).

Sabendo que E é muito pequeno no fio, este pode ser desprezado de forma que o primeiro membro da equação (7) se reduz ao negativo da tensão induzida nos terminais. Sabe-se também que o fluxo do núcleo predomina na segunda parte de (7) tem-se a redução da mesma conforme (8) (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2003). Abaixo encontra-se a equação para tensão induzida, que, por definição, pode ser descrita como o número de espiras (*N*) vezes o fluxo concatenado, conforme equação (8):

$$e = N \cdot \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (8)$$

Desta forma conclui-se que o fluxo concatenado λ é dado pela equação (9):

$$\lambda = N\varphi \quad (9)$$

Onde:

λ é o fluxo concatenado à espira [Wb];

φ é o fluxo concatenado à bobina [Wb];

N é o número de espiras.

De uma maneira geral o fluxo concatenado de uma bobina é indicado pela integral de superfície da componente normal de densidade do fluxo magnético, de tal forma que a

integração é realizada sobre qualquer superfície delimitada pelas espiras presentes na bobina, conforme equação (10).

$$\phi = -\omega_{mec} N_c \, r_1 L_{STK} \frac{\partial}{\partial \Theta} \int_{\Theta 1}^{\Theta 2} B(\Theta) d\Theta \quad (10)$$

Onde:

ω_{mec} é a velocidade mecânica angular da máquina [rad/s];

L_{STK} é altura do número de pacote de lâminas do estator;

r_1 é o raio interno do estator;

$B(\Theta)$ é o fluxo magnético no interior das bobinas;

N_c é o número de condutores na ranhura.

Ao trabalhar com a equação (10), o maior problema a se resolver está no fato da descrição da densidade de fluxo magnético dentro das bobinas, $B(\Theta)$, para o cálculo da variação do fluxo concatenado com as mesmas. O fluxo concatenado na máquina quando esta não está saturada é praticamente o mesmo fluxo que atravessa o entreferro e possui baixa dispersão. Ao entrar na saturação os dentes, estes guiam o fluxo dos ímãs por entre as bobinas, deixam de ser atrativos, reduzindo a quantidade de fluxo concatenado com as bobinas e afetam a forma de onda da força contra eletromotriz, causando distorção da mesma (PAULA, 2013).

Quando se trata de circuitos magnéticos, onde as relações B x H são lineares, tem-se que a tensão induzida pode ser expressa conforme equação (11):

$$e = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (11)$$

Onde:

L é a indutância [H];

i é a corrente [A].

No trabalho com elementos finitos, realizou-se a análise da tensão com base na equação (11), visto que obter os fluxos é uma tarefa de maior complexidade.

Portanto para chegar ao resultado esperado do fluxo concatenado, aplicou-se corrente na fase A enquanto as fases B e C operavam em vazio, ou seja, sem corrente.

3.2 Força Contra Eletromotriz

Na análise dos motores *Brushless* a força contra eletromotriz possui uma importância fundamental, pois é ela quem diferencia o motor *Brushless DC* (BLDC) do Motor *Brushless AC* (BLAC), visto que o motor BLDC possui forma de onda trapezoidal enquanto o BLAC possui forma de onda senoidal levando em consideração a força contra eletromotriz (SCALABRIM, OLIVEIRA, 2016).

Para obtenção da força contra eletromotriz se faz necessário o conhecimento de duas grandezas de extrema importância, sendo estas: o fluxo concatenado nas fases do motor e o ângulo mecânico e com base na equação (9) tem-se o cálculo da força contra eletromotriz.

O cálculo da força contra eletromotriz é uma aplicação da lei de Lenz, pois tem-se ciência que o sentido da tensão induzida é oposto ao sentido da força eletromotriz aplicada que a criou. Desta forma todas as vezes que ocorre uma ação motora inicia-se em contrapartida uma ação geradora.

3.3 Torque Eletromagnético

O torque e a velocidade angular de eixo, quando se trata de máquinas elétricas rotativas, são as variáveis mecânicas de saída. Entretanto, considera-se o torque sendo de maior relevância na análise, pois a partir deste pode-se determinar a carga mecânica a qual a máquina irá suportar durante seu funcionamento (MILLER, HENDERSOT, 1995).

Matematicamente, o torque pode ser descrito tanto em termos de corrente quanto em termos de fluxo eletromagnético. Como a obtenção dos valores do fluxo eletromagnético é de alta complexidade, tem-se prioridade por obter o torque através da corrente, desta forma obtem-se o torque através da coenergia do sistema (12) (HANSELMAN, 1994).

$$T_{el} = \frac{e \cdot i}{\omega_m} \qquad (12)$$

Onde:

e é a tensão induzida pelas bobinas [V];

T_{el} é o torque eletromagnético [N.m];

i é a corrente elétrica [A].

3.4 *Cogging Torque*

Segundo o IEEE 2015 o *cogging torque* é definido como a diferença dos picos máximo e mínimo de torque medidos após uma revolução completa da máquina em circuito aberto.

Outra definição para o *cogging torque* é que este se trata do torque produzido pela variação da relutância vista pelo circuito magnético, o qual possui como fonte magnética os ímãs do rotor (PAULA, 2016).

A utilização do MEF possibilita o cálculo dessa parcela do torque eletromagnético empregando-se dois diferentes métodos, sendo eles: o método dos tensores de Maxwell e o método do trabalho virtual. A análise no método virtual é realizada com base na avaliação da co-energia do sistema com relação a variação da posição do rotor (PAULA, 2016).

Na equação (13) é expressa a fórmula a qual possibilita o cálculo do *cogging torque* via método do trabalho virtual e na equação (14) a representação do método dos tensores de Maxwell.

$$T_{cg} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial R\varphi^2}{\partial \theta} \qquad (13)$$

$$T_{cg} = -\frac{l_f}{\mu 0} r^2 \int_0^{2\pi} B_R(\theta)\, B_T(\theta) d\theta \qquad (14)$$

Onde:

$B_R(\theta)$ é a componente radial da densidade de fluxo magnético do ímã no ponto de operação no entreferro;

$B_T(\theta)$ é a componente tangencial da densidade de fluxo magnético do ímã no ponto de operação no entreferro.

R é a relutância visto pelo circuito magnético [Ω];

l_f é a altura do pacote de lâminas do estator [m];

r raio interno do estator [m].

O *cogging torque* tem comportamento oscilatório com frequência bem descrita para condições da máquina em vazio (CHABCHOUB; SALAH, 2012). Sendo assim a frequência

do *cogging torque* é dada pela equação (15), a qual é descrita em relação a ordem do primeiro harmônico de um período elétrico da máquina.

$$f_{cog(i)} = \frac{MMC\ [2p,Ns]}{2} \times i \qquad (15)$$

Onde:

MMC é o mínimo múltiplo comum;

i é a ordem harmônica;

$f_{cog(i)}$ é a frequência do *cogging torque* para *i* – ésima harmônica;

Ns é o número de ranhuras do estator;

2p é o número de pólos.

Os valores dos parâmetros envolvidos no cálculo da frequência de *cogging torque* assim como os harmônicos devem ser estudados com maior nível de detalhamento para realização de projetos de máquinas síncronas de imãs permanentes.

3.5 *Torque Ripple*

Os motores, de uma maneira geral, possuem variações em suas especificações, entretanto todos possuem dois componentes básicos, sendo estes o rotor e o estator. Geralmente o rotor é preso à carga e inicia sua rotação devido à repulsão do campo magnético do rotor e o campo magnético do estator. Para que a rotação do motor permaneça constante o a orientação magnética do rotor deve alterar sua direção periodicamente e a frequência que faz com que isso aconteça depende do número de pólos magnéticos no motor/estator que podem variar de 2 a N (MOTION CONTROL AND MOTOR ASSOCIATION, 2013).

As curvas geradas da interação entre os campos magnéticos não variam de forma linear como função do ângulo do rotor e ao se aumentar o número de pólos pode se reduzir o nível de oscilação do torque, entretanto este estará sempre presente em algum grau na máquina (MOTION CONTROL AND MOTOR ASSOCIATION, 2013).

O *Torque Ripple* é uma oscilação que ocorre no torque e geralmente possui três fontes, sendo estas o efeito *cogging* que ocorre devido a interação do fluxo magnético do rotor com a variação da permeabilidade magnética do entreferro devido a geometria das ranhuras do estator (GIERAS, WING, 2002), a distorção da densidade de fluxo magnético no entreferro

devido a distribuição trapezoidal e também devido a diferença de permeabilidade magnética do entreferro (TRINDADE, 2009).

Com base na norma *IEEE* (2015) o *Torque Ripple* pode ser calculado conforme equação (16) descrita abaixo:

$$Tr = \frac{Tmax - Tmi}{Tmed} \times 100\% \qquad (16)$$

Onde:

Tmax é o torque máximo [N.m];

Tmin é o torque mínimo [N.m];

Tmed é o torque médio [N.m].

Segundo o *IEEE* (2015) existem diferentes métodos na literatura para minimizar o *torque ripple* através de projetos de máquinas e técnicas de controle, entretanto ainda é um desafio elimina-lo por completo. Alguns dos efeitos do *torque ripple* são: ruídos, vibrações, interferência na velocidade entre outros. As máquinas de ímãs permanentes de alta performance são as que mais sofrem com tais efeitos do *torque ripple (*PAULA, 2011).

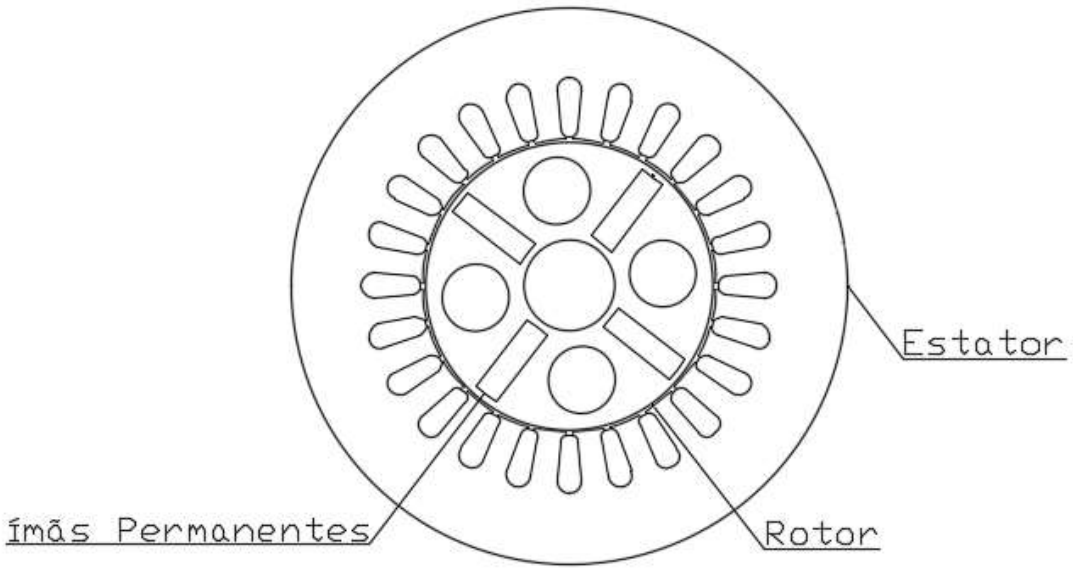
4 Resultados da Análise

4.1 Introdução

O capítulo em estudo visa o entendimento teórico e a formulação matemática de diferentes parâmetros analisados com o auxilio do *software FEMM*. Com base nessas informações inicia-se a análise dos resultados obtidos através da modelagem e simulação do motor *Brushless* em estudo.

Para realizar a aquisição de parâmetros utilizou-se um motor síncrono de ímãs permanentes no interior do rotor (*spoke type rotor*) disponível no laboratório de pós-graduação da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás. Na Figura 1, temos a seção transversal do motor utilizado, sendo apresentados o rotor, os ímãs permanentes e o estator. PEQ é a sigla para Núcleo de Pesquisa em Processamento da Energia e Qualidade.

Figura 1 - Estrutura Motor PEQ



Fonte: Autor

As características construtivas do motor em estudo estão relacionadas na Tabela 1, onde encontram-se as dimensões da máquina, número de pólos e número de ranhuras.

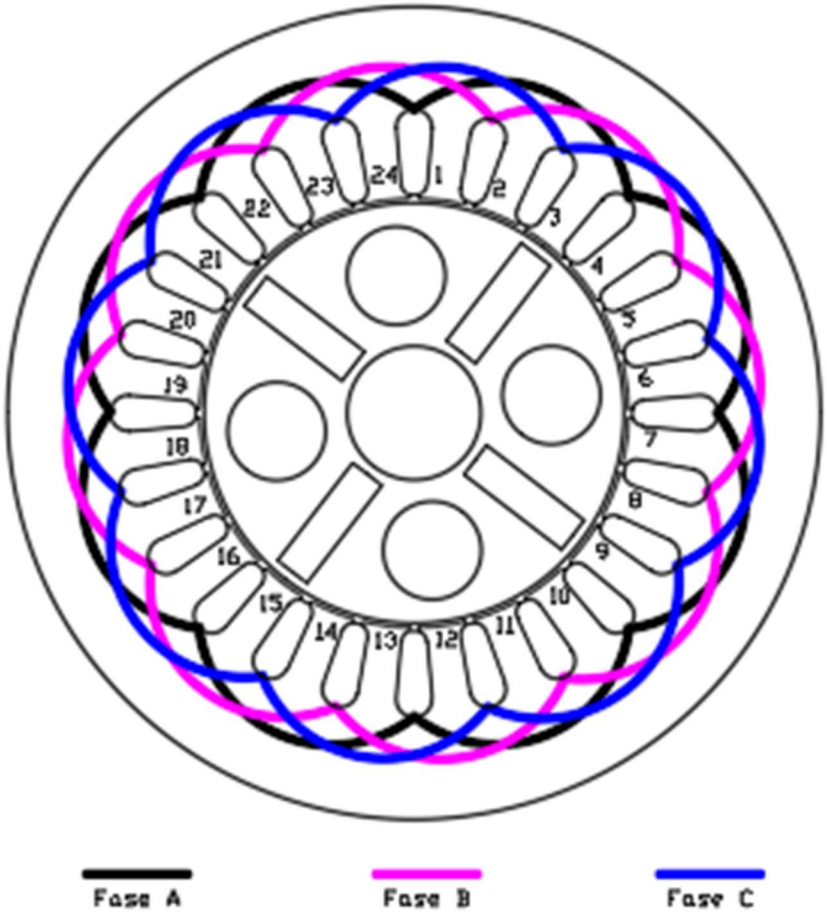
Tabela 1 - Parâmetros construtivos do motor

Parâmetros do Motor	Dimensões
Diâmetro do Rotor	94 mm
Diâmetro Externo do Estator	182 mm
Diâmetro Interno do Estator	96 mm
Número de Pólos	4 pólos
Número de Ranhuras	24 ranhuras
Comprimento do Pacote de Lâminas	102 mm

Fonte: Autor

Sabendo que o motor possui 3 fases e 24 ranhuras chega-se a conclusão através da razão número de ranhuras/fases que teremos 8 bobinas por fase. Realizando a razão número de ranhuras/bobinas por fase temos que o espaço físico entre as bobinas é de 3 ranhuras, portanto a fase A tem inicio na primeira ranhura e término na quarta ranhura e assim sucessivamente, recebendo acréscimo de 3 ranhuras por fase. A fase B inicia na segunda ranhura e termina na quinta ranhura e a fase C inicia na terceira ranhura e termina na sexta ranhura e assim sucessivamente conforme Figura 2, abaixo.

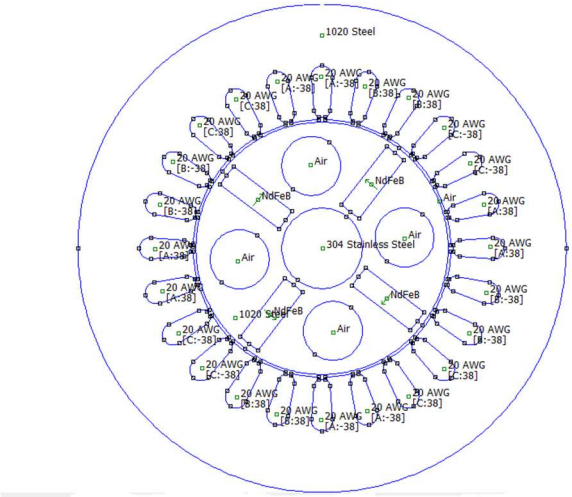
Figura 2 - Distribuição das bobinas nas ranhuras



Fonte: Autor

Na Figura 3 se tem a representação dos materiais que compõe cada parte da estrutura, sendo os imãs permanentes compostos por Neodímio (Nd), Ferro (Fe) e Boro (B) e as bobinas de cobre de 20 *AWG* (*American Wire Gauge*) ou 0,52 mm². O rotor e o estator são compostos por Aço Carbono (1020 *Steel*).

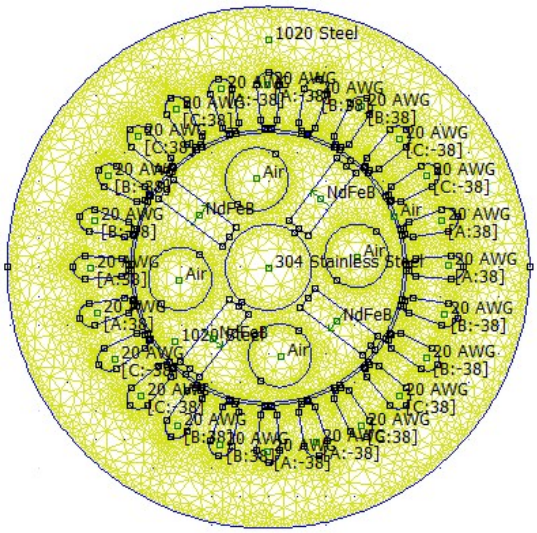
Figura 3 – Materiais que compõem a estrututra



Fonte: Autor

Com base na configuração da imagem acima pode-se iniciar a análise do motor em elementos finitos. O primeiro passo para tal análise é gerar as malhas para que se vizualise onde existe uma maior concentração de nós no motor. A malha em estudo possui 18918 nós conforme Figura 4.

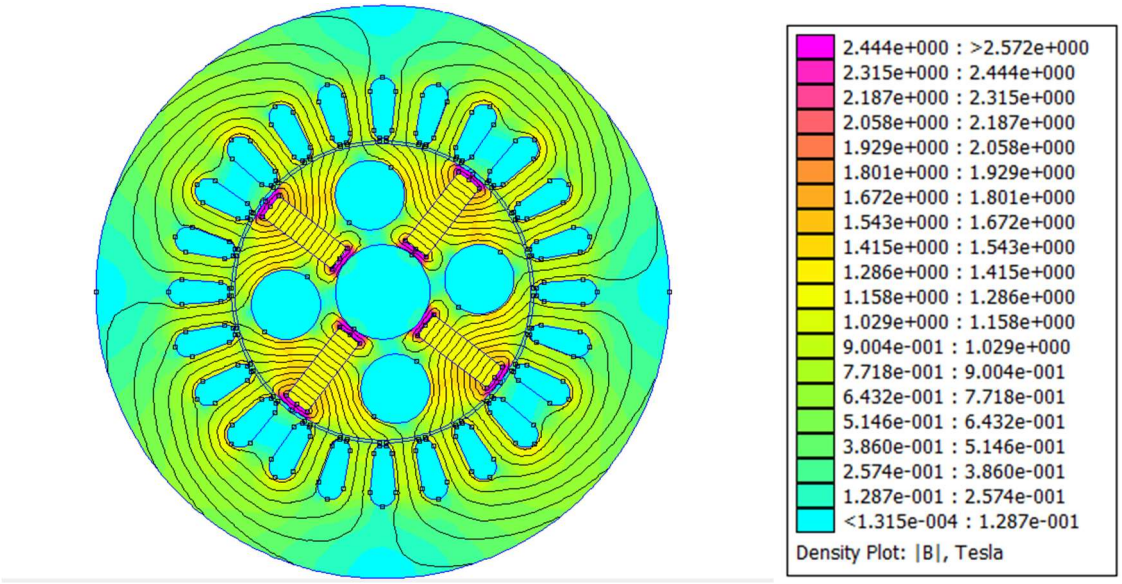
Figura 4 - Malha gerada no Motor PEQ



Fonte: Autor

Ao gerar a malha e simular, o motor está preparado para receber a análise necessária. Os resultados obtidos para o motor em estudo estão apresentados na Figura 5, na qual tem-se a representação da densidade de fluxo magnético no motor.

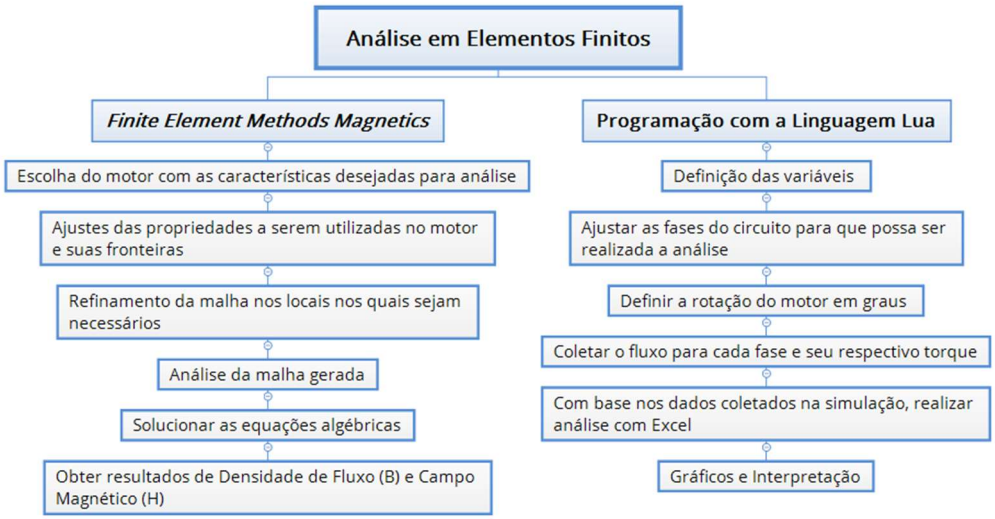
Figura 5 - Resultado da Análise do Motor



Fonte: Autor

Conhecendo as características básicas que o motor possui, pode-se iniciar uma análise mais aprofundada, a qual se faz necessário a utilização da linguagem Lua *script.* O fluxograma apresentado na Figura 6 mostra o desenvolvimento da lógica de programação para obtenção dos fluxos nas fases A, B e C do motor e os valores de torque do mesmo.

Figura 6 - Fluxograma da Análise



Fonte: Autor

4.2 Cálculo dos Parâmetros Elétricos

Diversos parâmetros foram analisados, entre eles a resistência de fase, a força contra eletromotriz, fluxo magnético nas fases, torque e ripple de torque. Todos os valores foram obtidos por meio de simulações no *software FEMM*.

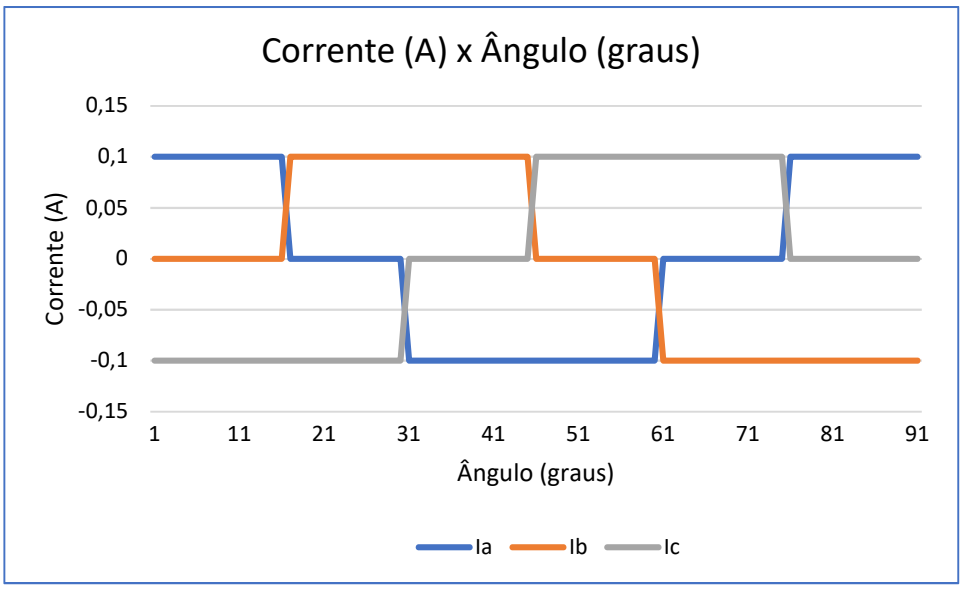
Para chegar aos resultados foram realizadas simulações para as correntes I=0 [A], I=1 [A], I=2 [A], I=3 [A], I=4 [A], I=5 [A] para uma rotação do motor entre os ângulos 0º e 180º graus mecânicos, que correspondem a 0º e 360º elétricos. A conversão graus mecânicos para graus elétricos, onde P é o número de pólos da máquina em estudo, se encontra na equação (17) abaixo.

$$1° \, mecânico = \left(\frac{P}{2}\right) ° \, elétricos \quad (17)$$

Na primeira simulação se utilizou corrente de armadura nula, também conhecida como simulação a vazio, em que o motor é acionado em baixa velocidade como gerador para que se possa obter os seguintes parâmetros: fluxo-concatenado por fase, força contra eletromotriz e *cogging torque*.

Na simulação utilizou-se a forma de onda de corrente quadrada conforme disposta na Figura 7 abaixo.

Figura 7 - Forma de onda da corrente



Fonte: Autor

Apesar de ser um *software* que nos fornece um vasto número de parâmetros do motor, o *FEMM* ainda precisa de outras ferramentas de análise para um melhoramento dos dados obtidos das simulações com a programação Lua, e para isso utilizou-se o Excel como material de apoio, visto que os parâmetros obtidos poderiam ser manipulados de maneira mais harmoniosa e assim atingir os resultados desejados.

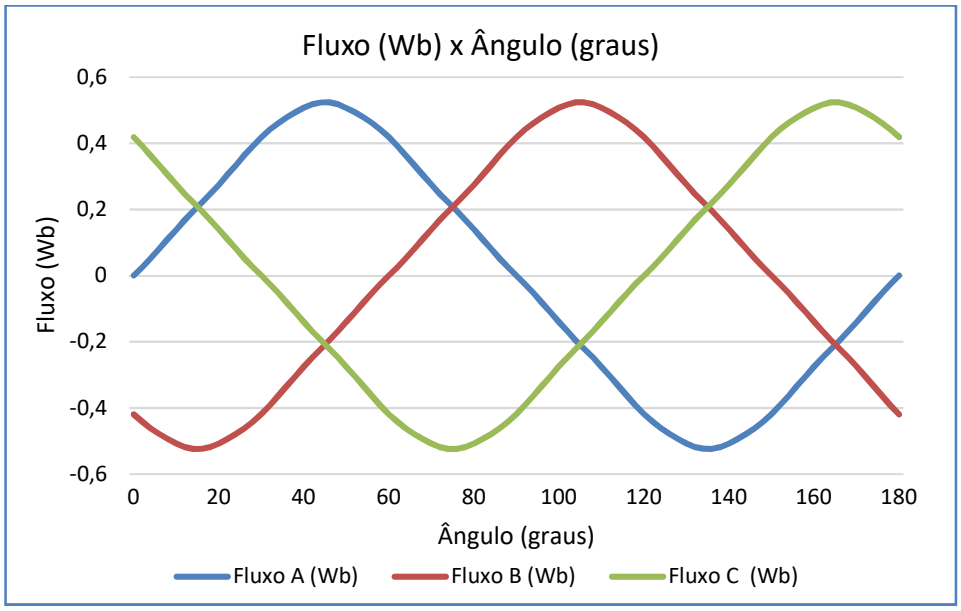
4.3 Resultados para Corrente I=0 [A]

Realizar análise para o motor ocorre excitação apenas do rotor, sem corrente de estator, ou seja, corrente do estator igual a zero, desta forma pode-se validar com a simulação a força eletromotriz gerada nos enrolamentos e o *cogging torque.*

A reação de armadura pode causar alterações no platô da força eletromotriz gerada nos enrolamentos induzida pelos ímãs e esta simulação deve ser feita sem corrente nos enrolamentos (SCHIMITZ, 2017).

Para obtenção dos resultados abaixo, Figura 8, realizou-se a simulação do motor onde se encontrou os valores dos fluxos para as fases A, B e C e dos ângulos em graus mecânicos para um determinado número de passos do rotor (K).

Figura 8 – Fluxo (Wb) x Ângulo (graus) para corrente I = 0 [A]



Fonte: Autor

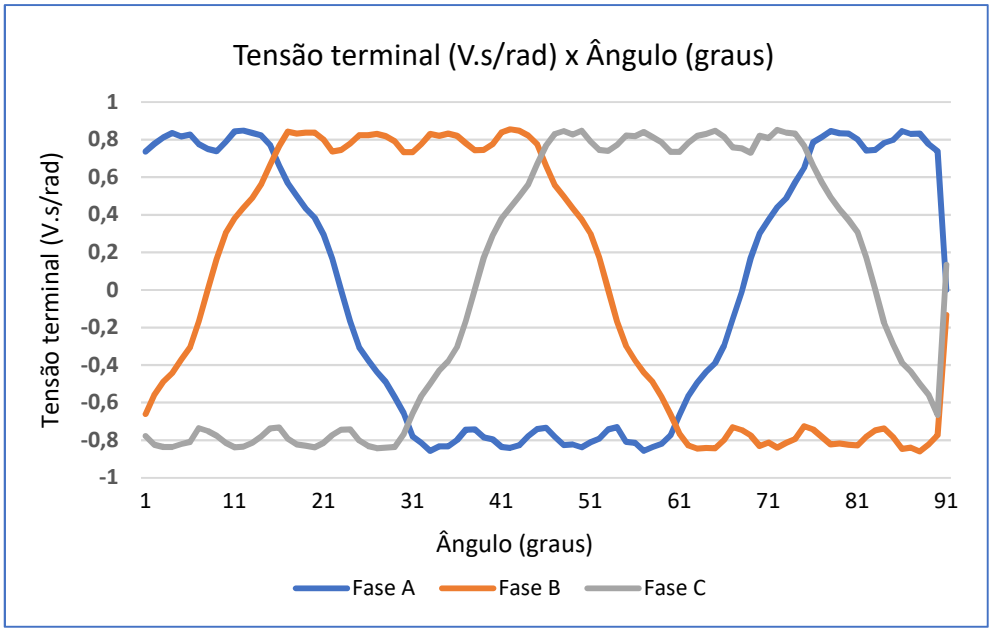
Com base na simulação a vazio, percebe-se que os gráficos para o fluxo concatenado são bastante próximos a senóides assim como sugere a literatura trabalhada, observando que não existem distorções ao longo das curvas apresentadas.

Conforme previsto na equação (15) descrita no capítulo 3, a frequência fundamental do *cogging torque* para a máquina em estudo, a qual possui 24 ranhuras e 4 pólos, é 12 vezes a frequência fundamental do fluxo, isto é, 12 vezes a frequência elétrica da máquina.

Os gráficos da força contra eletromotriz são obtidos através da variação do fluxo nas fases dividido pela variação do ângulo, conforme equação (9), citadada no capítulo 3.

Com base na equação (9), temos o seguinte resultado para força contra eletromotriz, Figura 9, onde verifica-se a onda trapezoidal conforme a teoria dos motores *Brushless DC,* onde tem-se um comportamento suave nas regiões de crescimento e redução do fluxo concatenado.

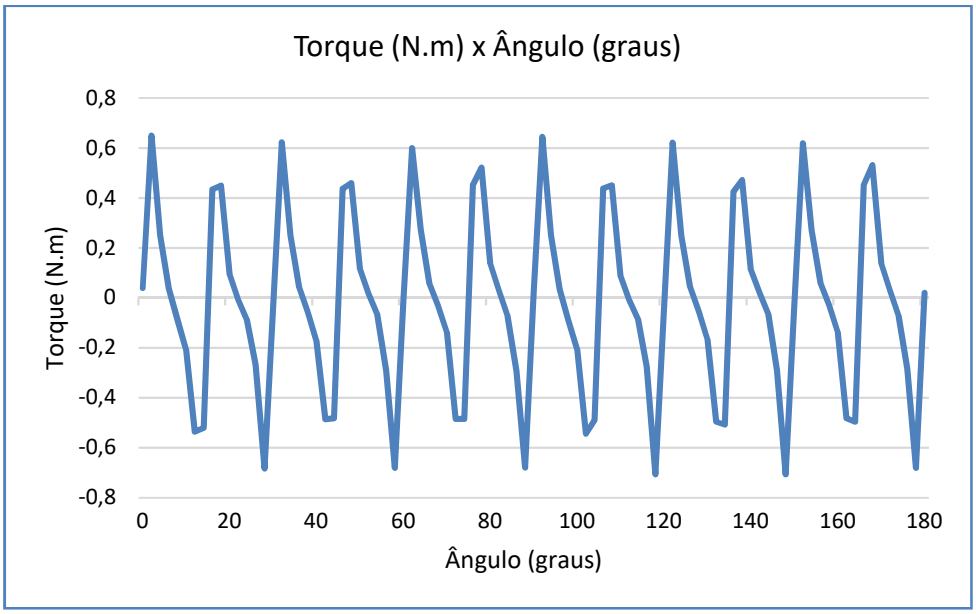
Figura 9 – Tensão terminal (V.s/rad) x Ângulo (graus) para I = 0 [A]



Fonte: Autor

O *cogging torque* foi outro parâmetro obtido através das análises computacionais e com base nos valores obtidos chega-se ao seguinte resultado:

Figura 10 - Torque (N.m) para I = 0 [A]



Fonte: Autor

Conforme apresentado na Figura 9, a força contra eletromotriz possui distorções nos seus períodos de máximo, diferenciado-se dos motores ideais cujos possuem máximos constantes.

Com base no gráfico da Figura 10, chega-se a conclusão que os valores do torque máximo e mínimo para a corrente I = 0 [A] são:

Tabela 2 - Valores de torque para I = 0 [A]

Torque Médio [N.m]	Torque Mínimo [N.m]	Torque Máximo [N.m]
-0,020	-0,707	0,650

Fonte: Autor

4.4 Resultados para Máquina Operando com Corrente.

Considerando o motor com excitação, ou seja, simulando o motor com a presença de corrente elétrica, os passos foram os mesmos para a simulação a vazio, ou seja, realizou-se a simulação para se obter os fluxos e os torques para um determinado valor de K. Logo, os resultados obtidos estão representados nas imagens seguintes, para as correntes I=1 [A], I=2 [A], I=3 [A], I=4 [A], I=5 [A], respectivamente.

Para os valores utilizados na simulação é perceptível as alterações que ocorrem nos fluxos e na força contra eletromotriz. Assim, de acordo com que ocorre o aumento da corrente

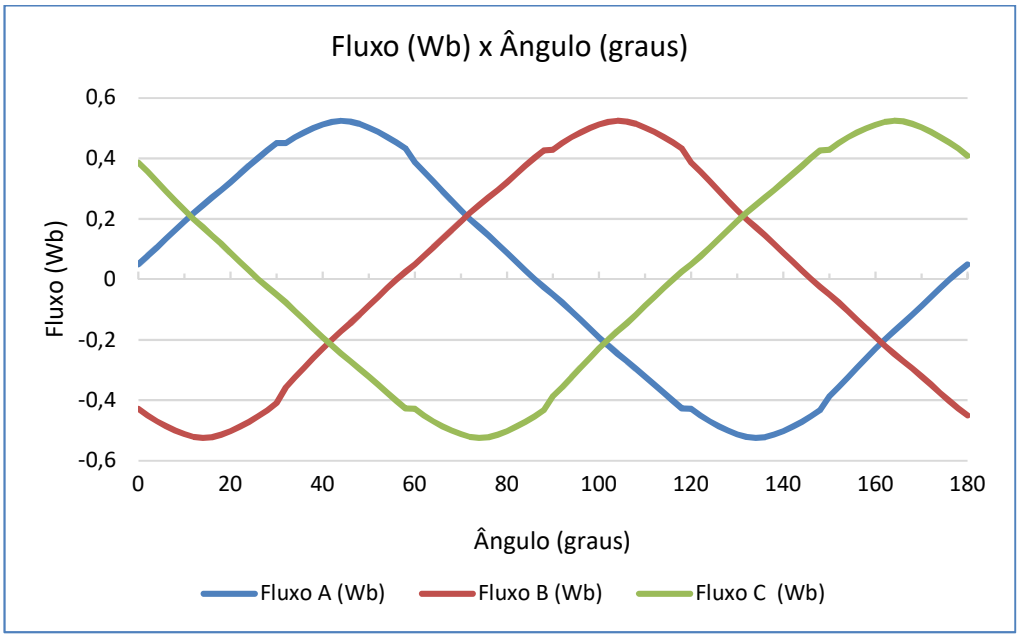
aplicada no motor os fluxos começam a sofrer distorção em determinados pontos e a força contra eletromotriz perde sua forma de onda trapezoidal.

Com base nos resultados obtidos do fluxo concatenado, Figura 11, nota-se que as regiões de transição, ou seja, acréscimo ou decréscimo de fluxo concatenado sofrem alterações consideráveis visto que o fluxo para a máquina com corrente passa apresentar deformações nas ondas.

Na análise do gráfico da força contra eletromotriz, Figura 12, percebe-se três valores de picos bem notáveis. O primeiro valor de pico refere-se ao chaveamento da fase que ocorre no início da força contra eletromotriz; o segundo pico ocorre na região central elevando consideravelmente o valor da força contra eletromotriz e o terceiro ocorre no final elevando o valor da força contra eletromotriz, entretanto de uma maneira menos drástica que as outras (PAULA, 2013).

Os valores de torque também sofrem alterações, visto que seus picos sofrem aumento de acordo com que a corrente aumenta, e além disso, se iniciou a análise dos torques mínimo, máximo e médio e também o *torque ripple* (Figura 13).

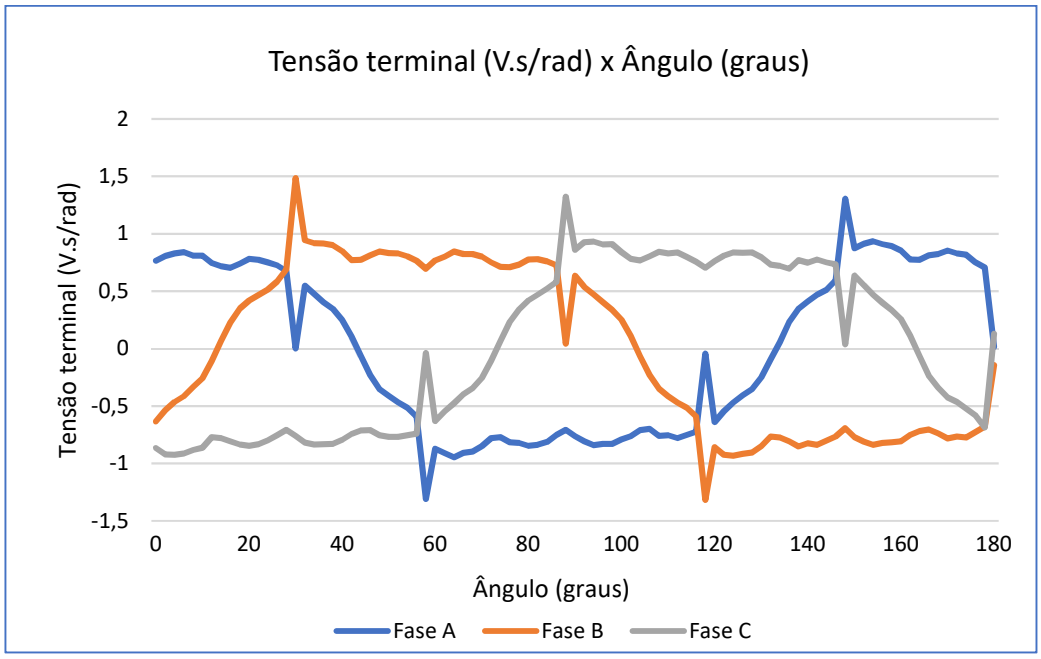
Figura 11 - Fluxo (Wb) x Ângulo (graus) para corrente I = 1 [A]



Fonte: Autor

É válido ressaltar que os valores encontrados para os resultados seguintes vieram da formulação previamente discutida nos capítulos 2 e 3 do presente trabalho, e devido a este motivo não serão apresentadas novamente para a análise.

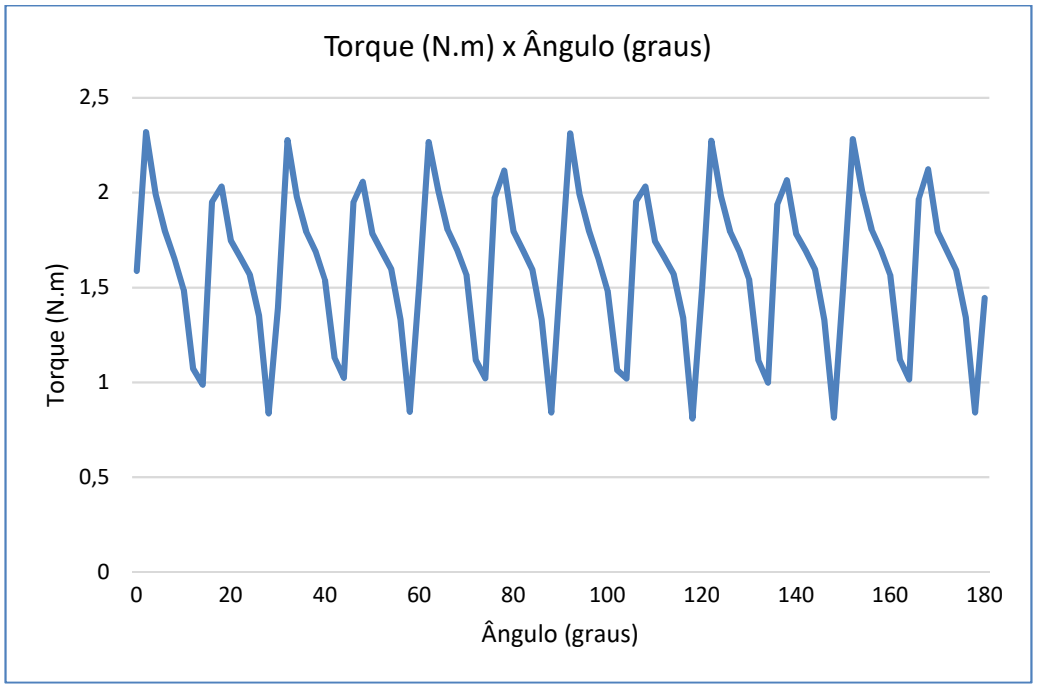
Figura 12 – Tensão terminal (V.s/rad) x Ângulo (graus) para I = 1 [A]



Fonte: Autor

Para cada valor de corrente analisado serão apresentados os valores dos torques médio, mínimo e máximo, além do resultado para o *torque ripple.*

Figura 13 – Torque (N.m) para I = 1 [A]



Fonte: Autor

Quando se trabalha com corrente igual a 1 [A], tem-se que os valores de torque para o motor são:

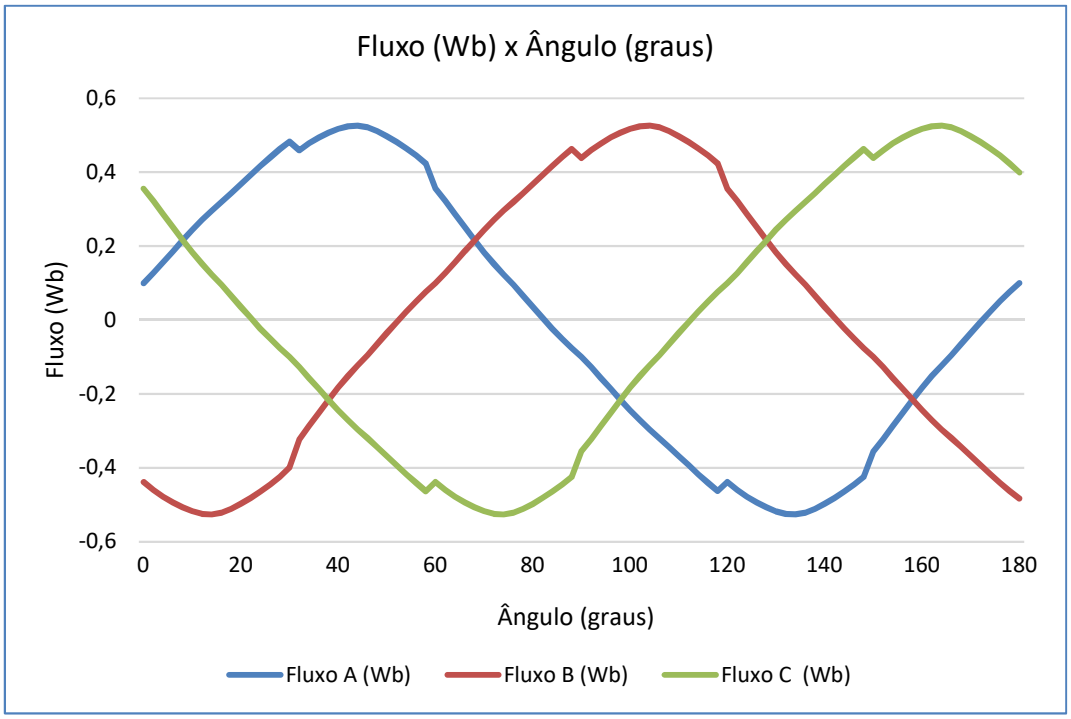
Tabela 3 - Valores de torque para I = 1 [A]

Torque Médio [N.m]	Torque Mínimo [N.m]	Torque Máximo [N.m]	*Torque Ripple* [%]
1,609	0,810	2,320	93,868

Fonte: Autor

Os resultados apresentados para o fluxo concatenado, força contra eletromotriz e torque encontrados na condição de corrente I = 2 [A] estão apresentados nas Figuras 14 – 16.

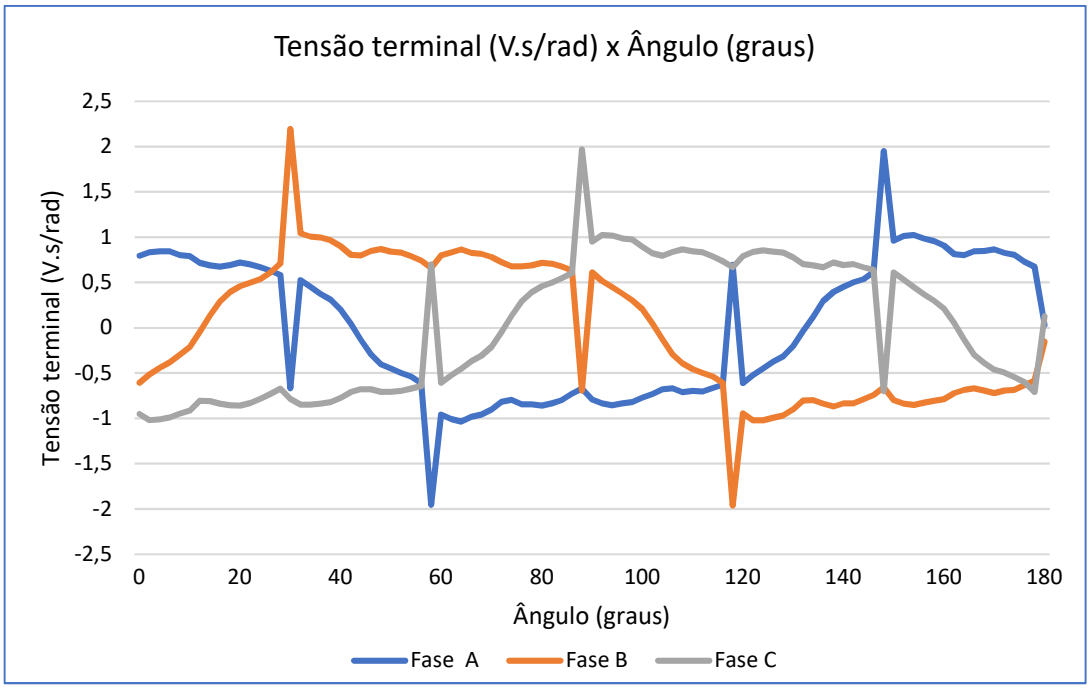
Figura 14 - Fluxo (Wb) x Ângulo (graus) para corrente I = 2 [A]



Fonte: Autor

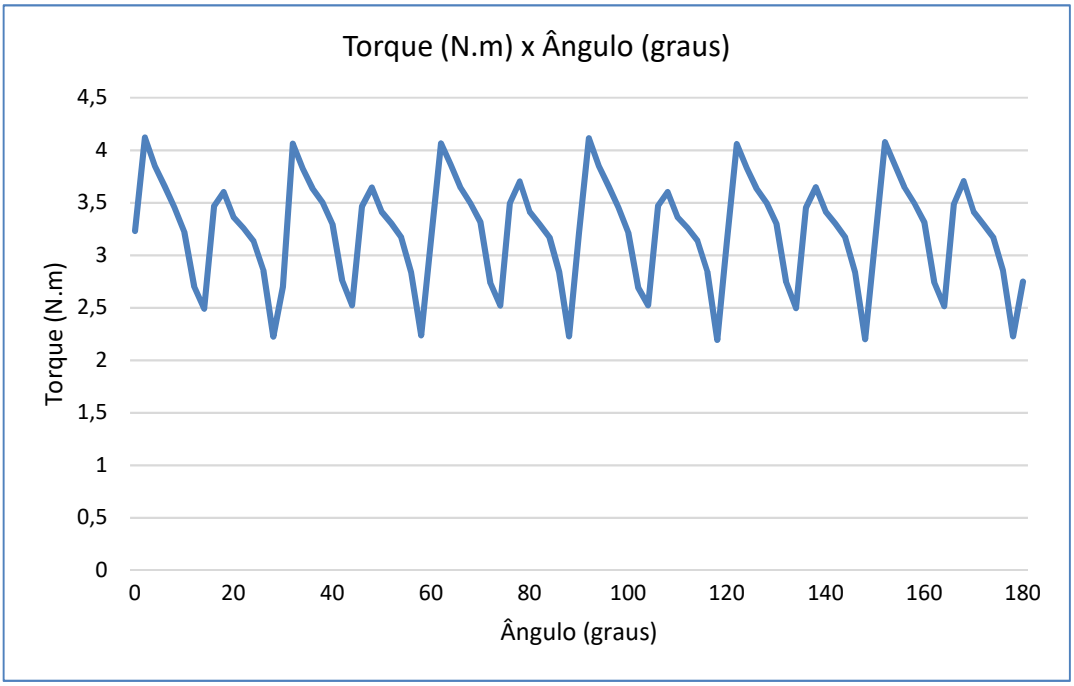
Logo, percebe-se um aumento significativo nos valores de torque médio, torque mínimo e torque máximo, entretanto existe uma queda no valor do *torque ripple.*

Figura 15 - Tensão terminal (V.s/rad) x Ângulo (graus) para I = 2 [A]



Fonte: Autor

Figura 16 - Torque (N.m) para I = 2 [A]



Fonte: Autor

Ao variar a corrente para I = 2 [A], temos alterações na curva de torque de modo que os valores passam a ser:

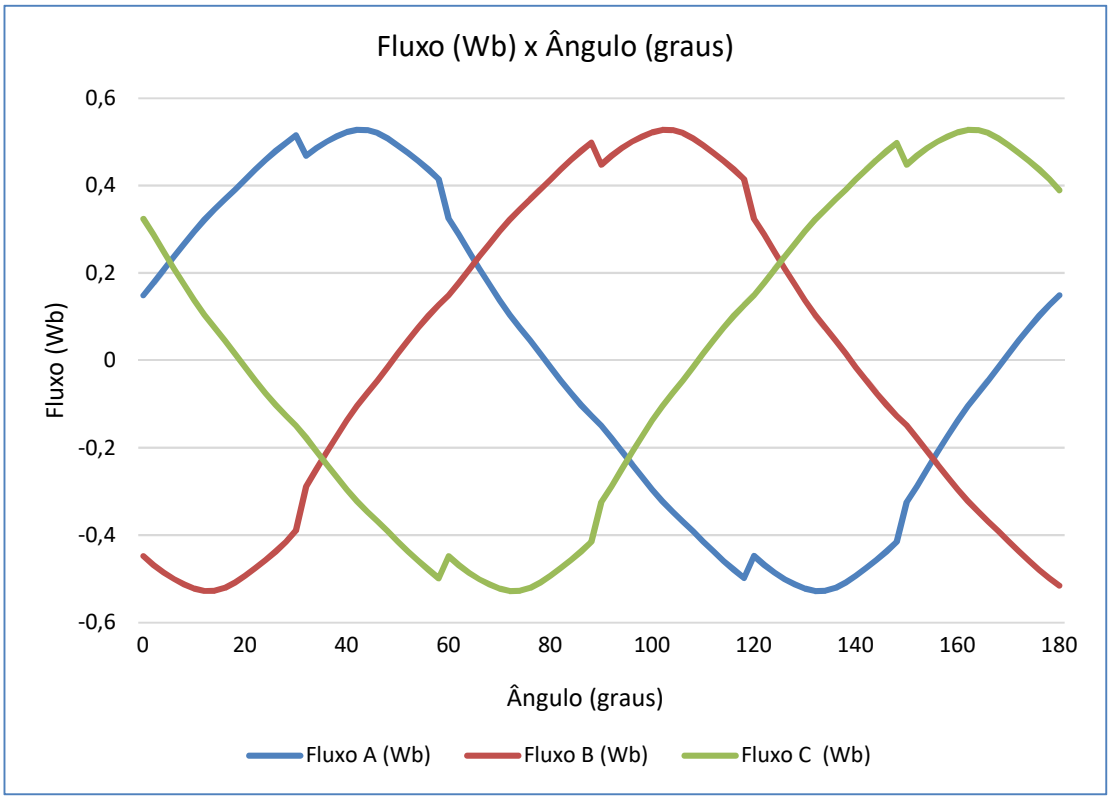
Tabela 4 - Valores de torque para I = 2 [A]

Torque Médio [N.m]	Torque Mínimo [N.m]	Torque Máximo [N.m]	*Torque Ripple* [%]
3,242	2,193	4,123	59,552

Fonte: Autor

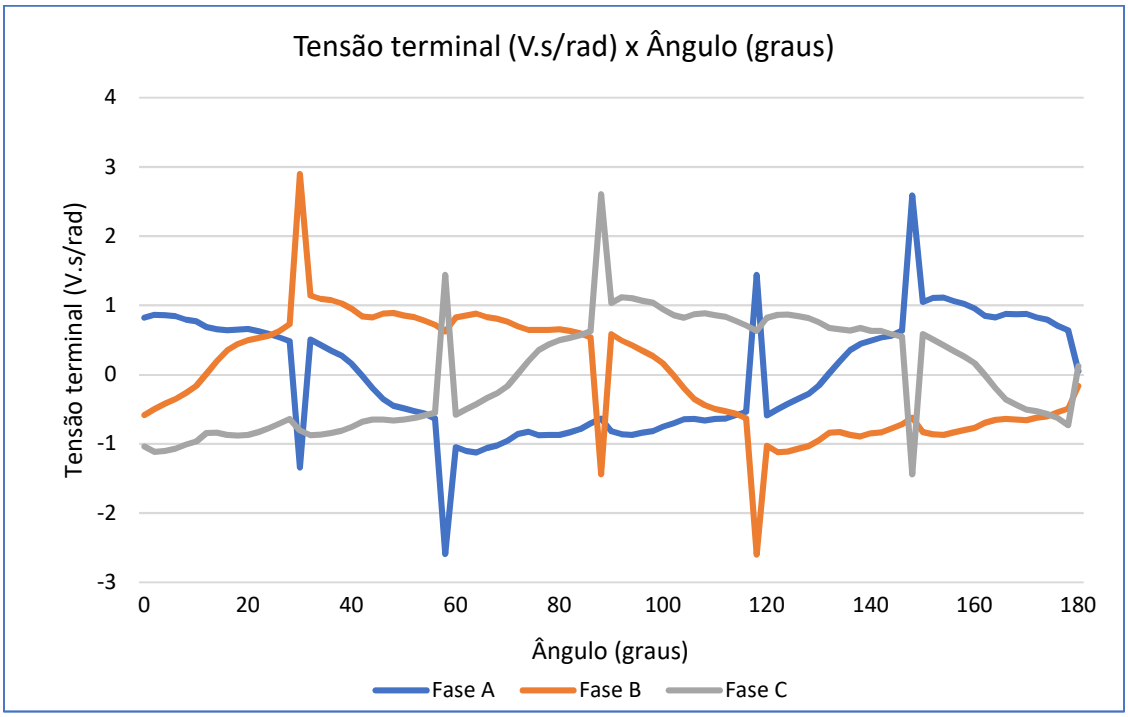
Os resultados apresentados para o fluxo concatenado, força contra eletromotriz e torque encontrados na condição de corrente I = 2 [A] estão apresentados nas Figuras 17 – 19.

Figura 17 - Fluxo (Wb) x Ângulo (graus) para corrente I = 3 [A]



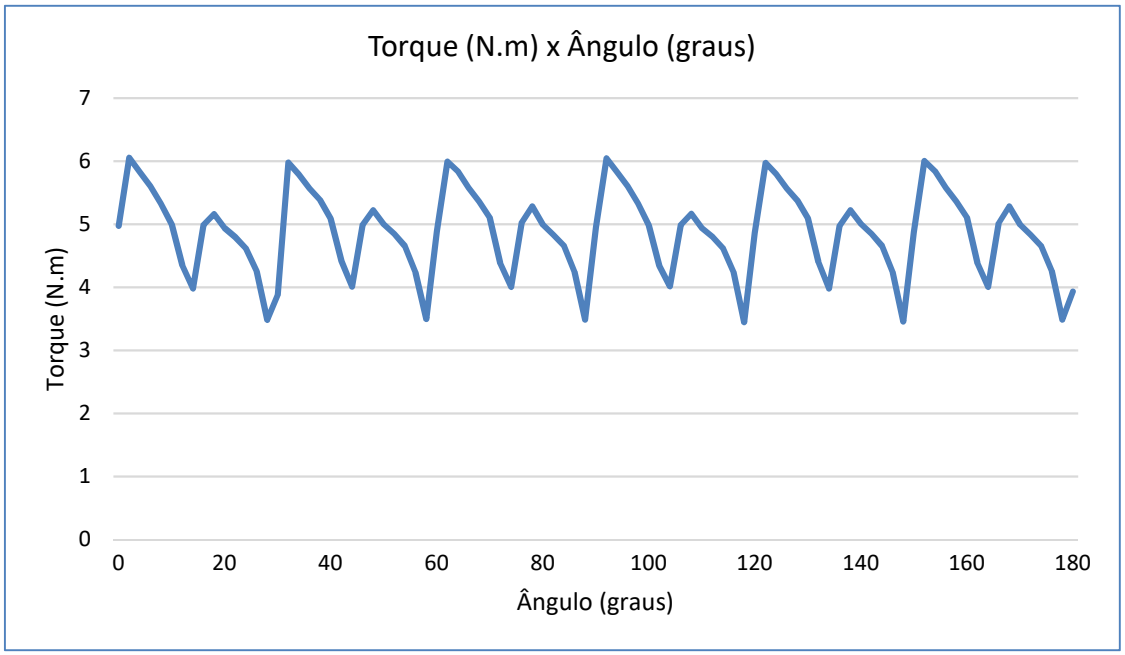
Fonte: Autor

Figura 18 - Tensão terminal (V.s/rad) x Ângulo (graus) para I = 3 [A]



Fonte: Autor

Figura 19 - Torque (N.m) para I = 3 [A]



Fonte: Autor

Ao excitar a máquina com uma corrente de 3 [A], o torque ripple sofre uma pequena queda enquanto os demais sofrem aumentos provacados por estas alterações de corrente.

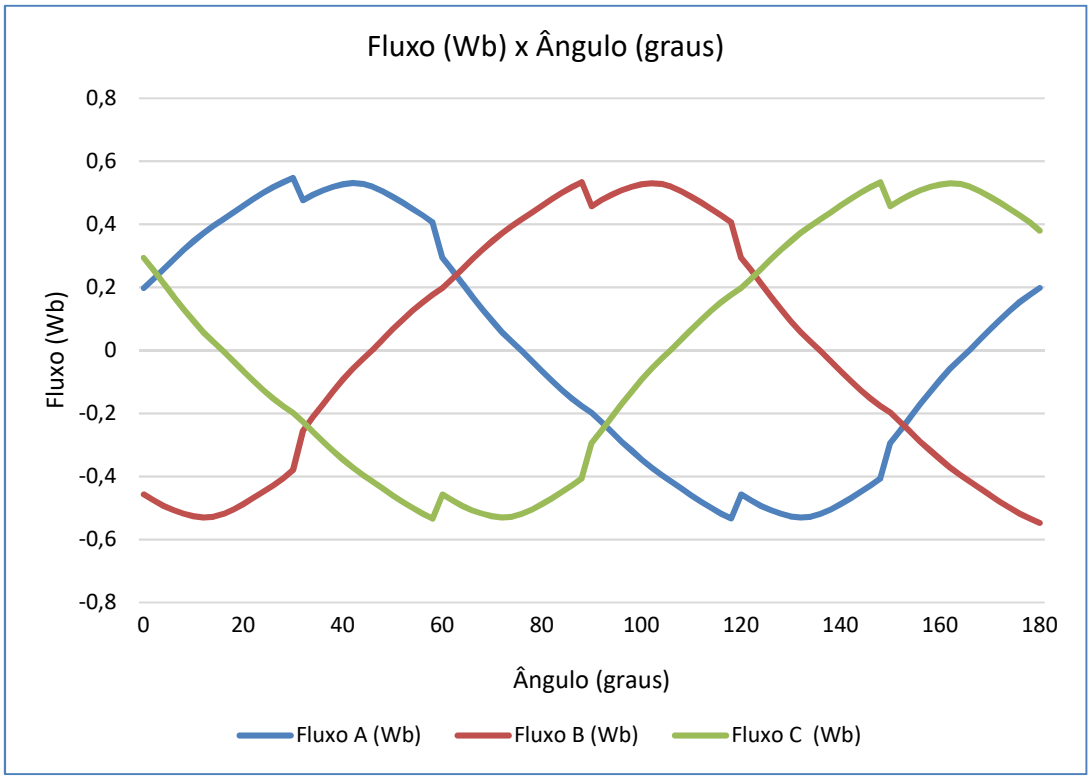
Tabela 5 - Valores de torque para I = 3 [A]

Torque Médio [N.m]	Torque Mínimo [N.m]	Torque Máximo [N.m]	*Torque Ripple* [%]
4,879	3,446	6,056	53,488

Fonte: Autor

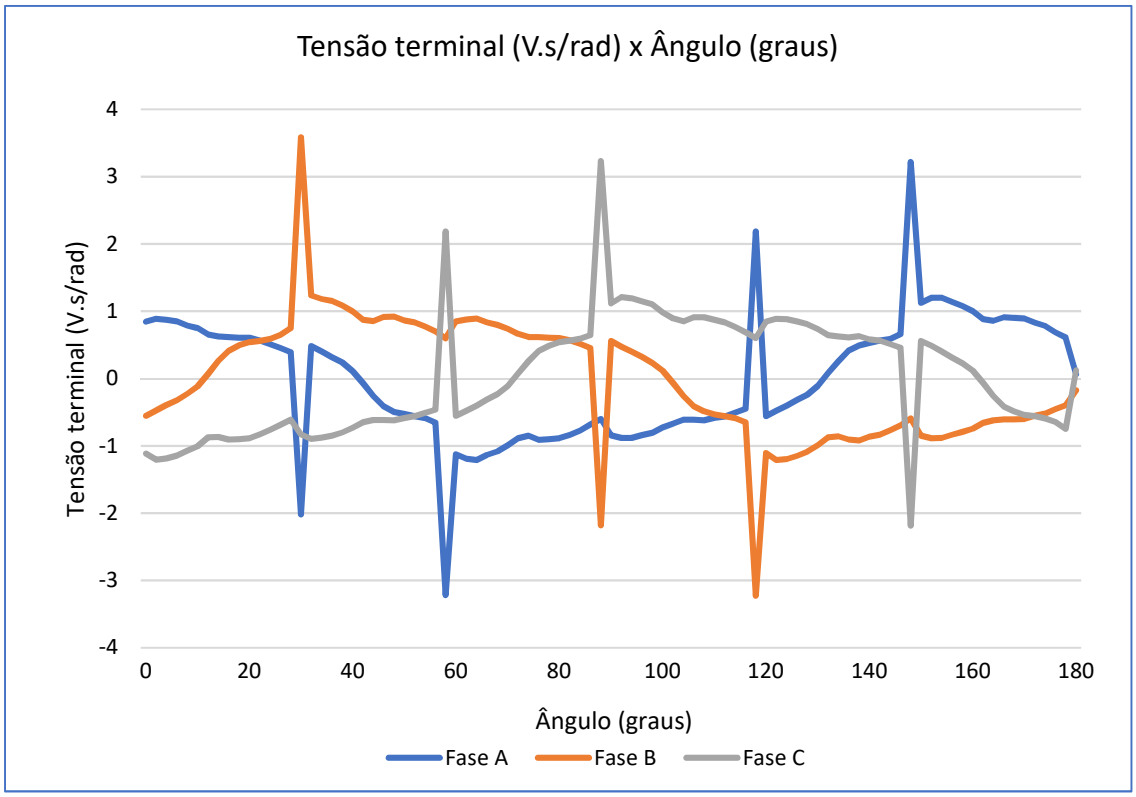
Os resultados apresentados para o fluxo concatenado, força contra eletromotriz e torque encontrados na condição de corrente I = 4 [A] estão apresentados nas Figuras 20 – 22.

Figura 20 - Fluxo (Wb) x Ângulo (graus) para corrente I = 4 [A]



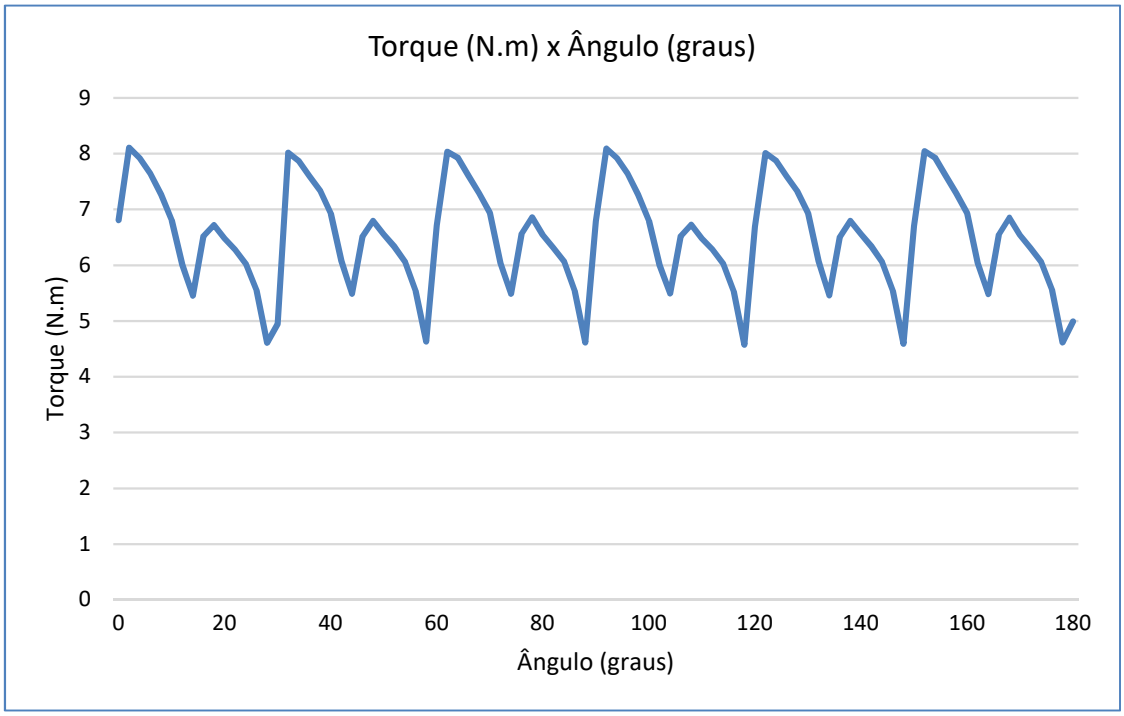
Fonte: Autor

Figura 21 – Tensão terminal (V.s/rad) x Ângulo (graus) para I = 4 [A]



Fonte: Autor

Figura 22 - Torque (N.m) para I = 4 [A]



Fonte: Autor

Quando comparada a corrente de 3 [A], temos que os valores de torque praticamente dobram e o *torque ripple* torna a aumentar seu valor.

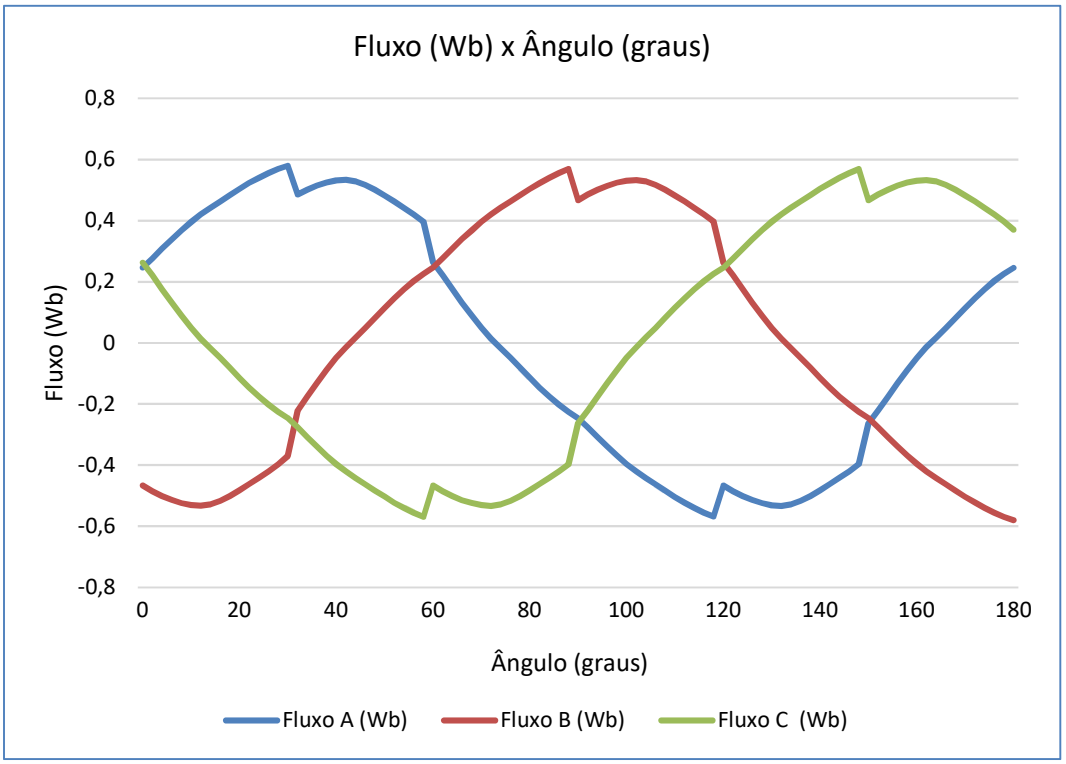
Tabela 6 - Valores de torque para I = 4 [A]

Torque Médio [N.m]	Torque Mínimo [N.m]	Torque Máximo [N.m]	*Torque Ripple* [%]
6,522	4,575	8,109	54,190

Fonte: Autor

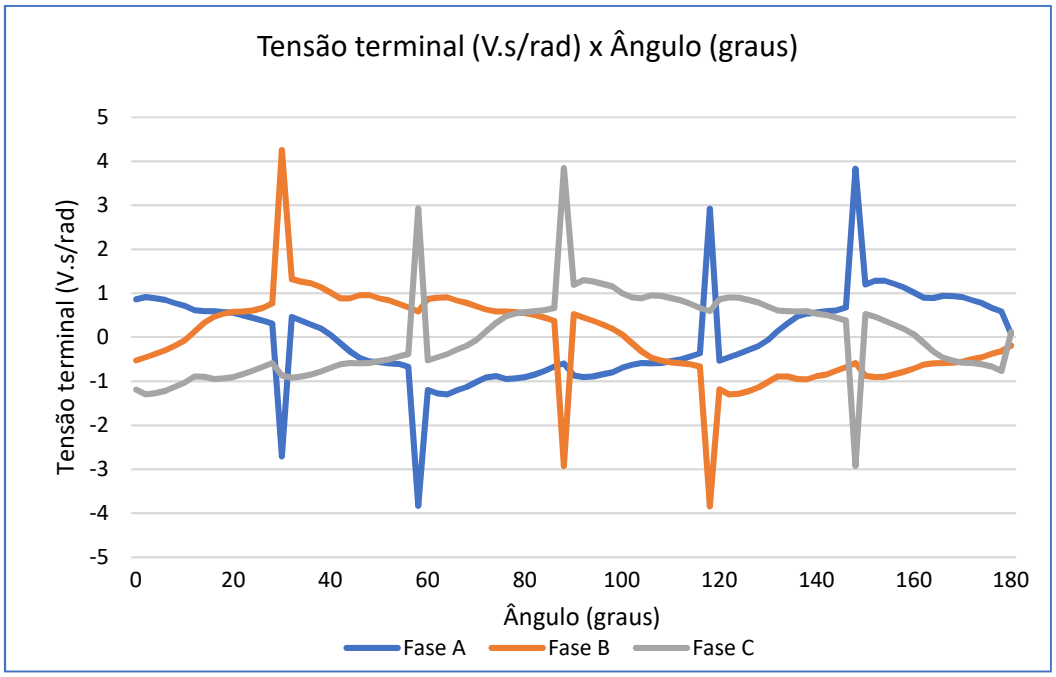
Os resultados apresentados para o fluxo concatenado, força contra eletromotriz e torque encontrados na condição de corrente I = 5 [A] estão apresentados nas Figuras 23 – 25.

Figura 23 - Fluxo (Wb) x Ângulo (graus) para corrente I = 5 [A]



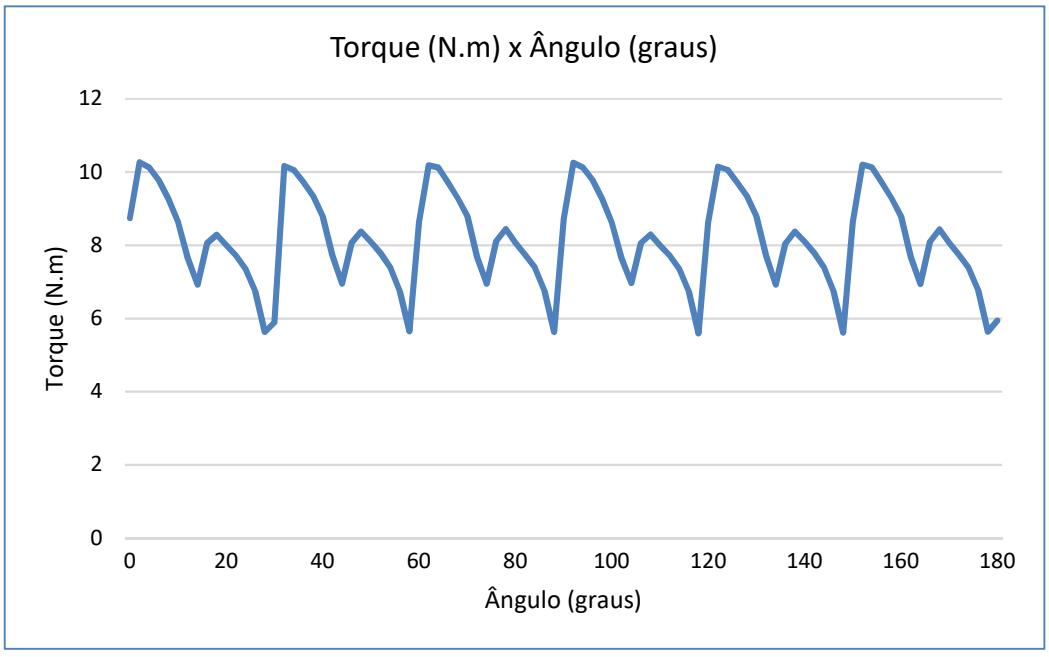
Fonte: Autor

Figura 24 - Tensão terminal x Ângulo (graus) para I = 5 [A]



Fonte: Autor

Figura 25 - Torque (N.m) para I = 5 [A]



Fonte: Autor

Na última análise, considerando a corrente igual a 5 [A] temos aumento de todas as variáveis conforme esperado

Tabela 7 - Valores de torque para I = 5 [A]

Torque Médio [N.m]	Torque Mínimo [N.m]	Torque Máximo [N.m]	*Torque Ripple* [%]
8,170	5,589	10,270	57,290

Fonte: Autor

4.5 Resultados para os valores de Torque e Torque ripple

Ao realizar a análise dos gráficos, como dito anteriormente chega-se aos seguintes resultados dispostos na tabela 8, para os valores de torques mínimo, médio e máximo.

Tabela 8 - Torques Médio, Mínimo e Máximo

Corrente [A]	Torque Médio [N.m]	Torque Mínimo [N.m]	Torque Máximo [N.m]
1	1,609	0,810	2,320
2	3,242	2,193	4,123
3	4,879	3,446	6,056
4	6,522	4,575	8,109
5	8,170	5,589	10,270

Fonte: Autor

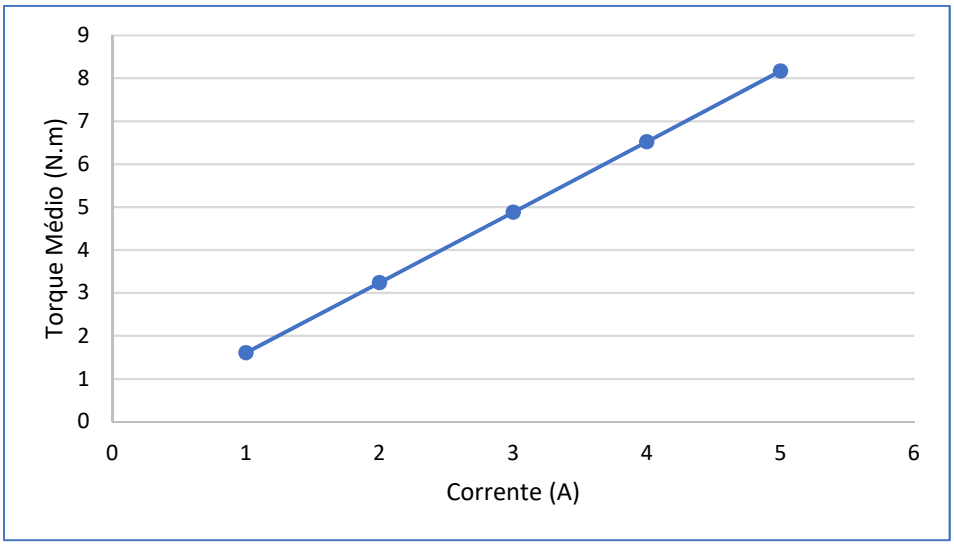
Com base na equação (16) para o cálculo do *torque ripple*, temos os seguintes valores conforme tabela 9, abaixo:

Tabela 9 - Valores de Torque Ripple

Corrente [A]	*Torque Ripple* [%]
1	93,868
2	59,552
3	53,488
4	54,190
5	57,290

Fonte: Autor

Figura 26 - Torque médio (N.m) x Corrente (A)



Fonte: Autor

Para o cálculo da constante de torque (Kt) utilizou-se a equação (18), descrita abaixo:

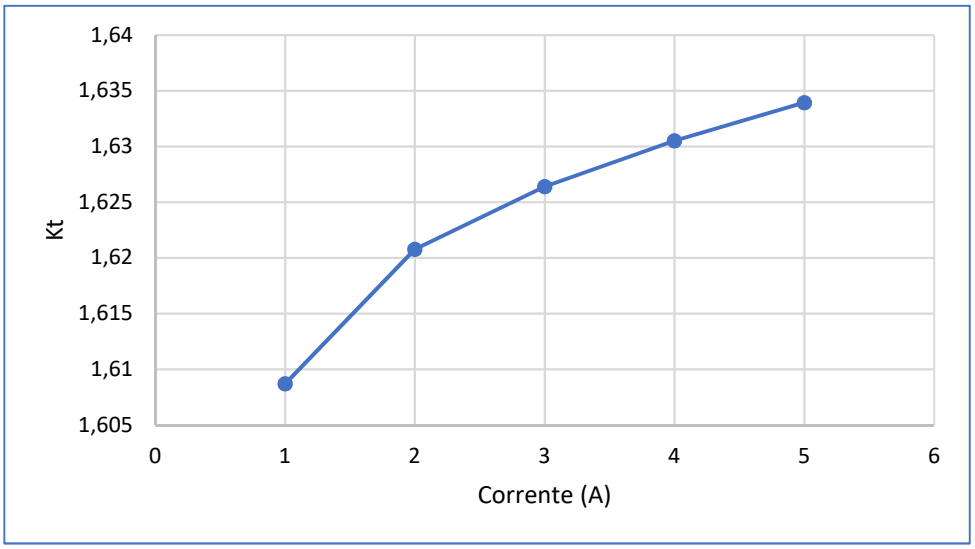
$$Kt = \frac{Tmed}{i} \qquad (18)$$

Onde:

Tmed é o torque médio [N.m];

i é a corrente aplicada ao motor [A].

Figura 27 - Constante de Torque (Kt) x Corrente (A)



Fonte: Autor

Na Figura 26, tem-se a representação do torque médio de cada corrente de estator para a máquina analisada. Com base no gráfico, percebe-se que de acordo com que se aumenta a corrente o torque médio da máquina cresce de maneira praticamente linear.

Ao analisar a Figura 27, tem-se que para uma corrente de 1 [A] o Kt é menor devido ao *cogging torque* ter sido expressivo quando comparado ao torque produzido, derrubando o valor médio. Para os demais valores de corrente o aumento se deve à produção de torque de relutância nesse tipo de motor *Brushless* que tem ímãs no interior do rotor. Se o caso em estudo fosse para um motor onde os ímãs se localizam na superfície do rotor, não haveria produção de torque de relutância e ficaria nítida a redução do Kt com o aumento da corrente.

Outra análise realizada foi a resistência de fase, essa que ficou constante em 1.0323 **Ω** para todos os valores de corrente. Esse valor foi obtido através da simulação da máquina no *FEMM.*

5 Conclusão

Sabe-se que o consumo de energia vem aumentando ao longo dos anos nos grandes centros urbanos e que grande causa disso é a expansão do setor industrial.

Desta forma, fez-se necessário a busca de formas alternativas de energia e o desenvolvimento de novas técnicas de projetos de máquinas elétricas, visto que estas representam grande parte do consumo de energia na planta de uma indústria.

Graças a isto, e também a necessidade de criar produtos novos e mais viáveis ao mercado, o estudo dos motores *Brushless* está se tornando cada vez mais difundido, principalmente após o grande avanço da computação que é de extrema valia nos cálculos realizados no projeto desse tipo de motor.

Com base no trabalho em questão percebe-se que o avanço das ferramentas computacionais possibilita uma análise mais rápida e prática dos parâmetros elétricos dos motores de uma maneira geral.

Entretanto é valido ressaltar que apesar de ser um método mais rápido, é necessário o conhecimento teórico dos parâmetros elétricos para que estes sejam implementados na linguagem de programação escolhida, pois o *software* encaixa no projeto como um facilitador, reduzindo a quantidade de cálculos manuais.

Logo, o entendimento da teoria e do funcionamento do *software* são necessários pois se complentam e proporcionam um número ainda mais exato dos parâmetros, e desta forma não só é afetado o consumo de energia, mas também outro grande problema que ainda existe no projeto de máquinas que é o desperdício de matéria prima e consequentemente a perda de dinheiro pelos fabricantes.

Assim, conhecer cada aspecto do motor e poder testá-lo virtualmente antes da sua produção mostra como é necessário a análise em Elementos Finitos. Com base nisso, o desenvolvimento de motores para diferentes aplicações passa a ser de maior confiabilidade e segurança, podendo estes serem expandidos a diversos cenários do nosso cotidiano.

Em suma, pode-se dizer, com base nas análises realizadas que os parâmetros analisados nos mostram o real funcionamento de uma máquina. Desta forma, ao simular a máquina busca-se retirar os parâmetros reais da máquina a qual será produzida. Com esses valores analisados, a qualidade de projeto se eleva de uma forma significativa, gerando os

melhores resultados possíves para todo o sistema de energia, não apenas as máquinas estudadas.

Outro ponto a se destacar é a questão de como teoria e simulação se complementam mostrando a validade de todas as análises com embasamentos teóricos consolidados.

Visto que temos essa consolidação, chega-se a conclusão que o MEF é realmente algoque deve ser levado em conta na análise de máquinas elétricas já que possui todos os requisitos que se é necessário para projeto, como confiabilidade de resultados e agilidade de processamento, gerando, desta forma, produtos com excelente qualidade para um mercado o qual vem se tornando cada vez exigente no que se refere a energia elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHAPCHOUB, M.; SALAH, I. BEM. ***PMSM cogging torque reduction: Comparision between diferente shapes of magnet.*** 2012.

ELETROBRAS. *Guia Básico Motor Elétrico*. [S.1.], 2015. Disponível em: <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/Motor_eletrico.pdf>. Acesso em: 26 set. 2018.

FITZGERALD A. E., KINGSLEY C. JR., UMANS S.D., ***Electric Machinery***. 6th ed., *McGraw-Hill Inc*, *New York*, 2003.

FITZGERALD A. E., KINGSLEY C. JR., UMANS S.D., ***Máquinas Elétricas: com introdução a eletrônica de potência***. 6. ed., Porto Alegre: *Bookman,* 2006. 648p.

GIERAS, J. F. e W. M. ***Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications***. 2. ed. ed [S.1]: *Marcel Dekker*, *Inc, New York*, 2002.

HANSELMAN, D. C. ***Brushless permanente Magnet Motor Design.*** [S.I] *Mcgraw – Hill*, 1994. P. 191.

HENDERSHOT, J. R; MILLER T. J. E. ***Design of Brushless Permanent – Magnet Motors First Edition***. *New York*: *Oxford University Press*, 1994.

IEEE STANDARDS ASSOCIATION. ***Trial Guide for Testing Permanent Magnetics Machines.*** *3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA. 2014*

IERUSALIMSCHY, R ***Uma introdução a programação Lua***. Disponível em: < https://www.lua.org/doc/jai2009.pdf >. Acesso em: 01 dez. 2018.

IERUSALIMSCHY, R; FIGUEIREDO, L. H; CELES, W. ***Manual de Referência de Lua 5.1.*** Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2008.

JULIANI, A. D. P. ***Análise do Campo Magnético de um Motor de Ímã Permanente no Rotor Utilizando o Método dos Elementos Finitos***. 2007. 115f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos; Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

KENJO, T.; NAGAMORI, S. ***Permanent Magnet and Brushless DC Motors. First Edition, New York: Oxford University Press, 1984. 194p.***

MARTINELLI, R.; SIMONASSI K.; TAVARES, F. ***A linguagem Lua***. Disponível em: < https://inf.ufes.br/~vitorsouza/wp-content/uploads/teaching-lp-20132-seminario-lua.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2018.

MEEKER, D. Finite Element Methods Magnetics version 4.2 user's manual. Idioma: Inglês 2018.

MILLER, T. ***Brushless Permanent – Magnet and Relutance Motor Drives.*** [S.1]: *Claredon Press – Oxford,* 1989. 24.

MILLER, T. J. E.; HENDERSOT JR, J. R. ***Design of Brushless permanet magnet motors.*** [S.I] *Oxford university press,* 1995. P. 584.

MOTION CONTROL ONLINE. ***Understanding the distinctions Among Torque Ripple, Cogging Torque, and Detent****,* 2013. Disponível em: < https://www.motioncontrolonline.org/content-detail.cfm/Motion-Control-Tech-Papers/Understanding-the-Distinctions-Among-Torque-Ripple-Cogging-Torque-and-Detent/content_id/675>. Acesso em 21 nov. 2018.

NASAR, S. A.; BOLDEA, I.; UNNEWEHER, L. E. ***Permanent Magnet, Relutance, and Self Synchronous Motors****. CRC Press*, 1993.

NASAR, S. A. ***Handbook of Electric Machines****. McGraw-Hill, New York*, 1987.

PAULA, G. T., ***Projeto de uma máquina síncrona com ímã permanente no Rotor****.* Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

PAULA, G. T. ***Influência da Saturação no Torque da Máquina Síncrona de Ímã permanente no Rotor****.* Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

PAULA, G. T. ***Cálculo da força contra eletromotriz em máquinas síncronas****.* Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

PERSSON, E. The challenges of using variable-speed motor drives applications. In: Proc. Electrical Insulation Conf. And Electrical Manufacturing Expo.: 2007. P. 453-458.

PRADO, R, A***. Desenvolvimento de um Sistema de Ensaio de Máquinas Brushless DC***. 2016. 131f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

RASMUSSEN, C. B.; RITCHIE, E. ***Variable speed Brushless DC motor drive for household refrigerator compressor***. In: Proc. Eight Int Electrical Machines and Drives Conf. (Conf. Pulb. No. 444).: 1997. P. 128-132.

SANTOS, O. T. P., ***Comparação entre motor de Indução e Motor de Ímãs Permanentes***. 2015. 51f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SCALABRIM C. R. ***Estudo da operação da máquina Brushless como gerador.*** In. 26º SEMINÁRIO DE Iniciação ciêntifica da Universidade do Estado de Santa Catarina. 2016. 2 p.

SCHMITZ, C***. Projeto e Otimização de motores BLDC de ímãs permanentes superficiais***. 2017. 151p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Florianópolis. 2017.

SENS, M. **Avanços Tecnológicos no Motores Elétricos**, WEG em Revista, Janeiro – Fevereiro. 2001

TRINDADE, R. H. ***Estudo de Máquinas Elétricas não convencionais: Motor Brushless DC.*** 2009. 30f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

Apêndice A - Linguagem de Programação Lua *script*

Para realizar as análises de maneira mais sitemática e rápida foi necessário a implementação da linguagem de programação Lua, conforme citado no texto anteriormente. Com a devida lógica de programação implementada, chegou-se aos resultados os quais foram apresentados no Capítulo 4 do presente trabalho.

O *script* utilizado segue abaixo:

```
-- load geometry
mydir="./"
open(mydir .. "PEQ-Fred.fem")

-- and save as a temporary file name so we don't
-- ovewrite the original geometry
mi_saveas(mydir .. "temp.fem")

-- make sure that the currents are zeroed out
-- we just want flux linkage due to the magnets
mi_modifycircprop("A",1,0);
mi_modifycircprop("B",1,0);
mi_modifycircprop("C",1,0);

-- show the Lua console window so that we can see the
-- program report its progress
showconsole()

-- move the rotor through one pole pitch in small
-- increments, recording the flux linkage of each
-- phase at each rotor position
teta = {};
fluxoA = {};
fluxoB = {};
fluxoC = {};
torque = {};
steps = 90;
-- inclui o valor da corrente desejada
corrente = 1;

for k = 1,(steps+1) do

  print((k-1) .. "/" .. steps);

  if ( k > 0 ) and ( k < 17) then
        mi_modifycircprop("A",1,corrente);
        mi_modifycircprop("B",1,0);
        mi_modifycircprop("C",1,-corrente);
  end

  if ( k > 16 ) and ( k < 31) then
        mi_modifycircprop("A",1,0);
        mi_modifycircprop("B",1,corrente);
        mi_modifycircprop("C",1,-corrente);
  end

  if ( k > 45 ) and ( k < 61) then
        mi_modifycircprop("A",1,-corrente);
        mi_modifycircprop("B",1,corrente);
        mi_modifycircprop("C",1,0);
  end
  if ( k > 60 ) and ( k < 76) then
        mi_modifycircprop("A",1,0);
        mi_modifycircprop("B",1,-corrente);
        mi_modifycircprop("C",1,corrente);
  end
```

```
  if ( k > 75 ) then
        mi_modifycircprop("A",1,corrente);
        mi_modifycircprop("B",1,-corrente);
        mi_modifycircprop("C",1,0);
  end

  mi_analyze(1);
  mi_loadsolution();

  teta[k] = (k-1)*360/2/steps;

  -- collect the flux linkage for each phase
  v1,v2,fluxoA[k] = mo_getcircuitproperties("A");
  v1,v2,fluxoB[k] = mo_getcircuitproperties("B");
  v1,v2,fluxoC[k] = mo_getcircuitproperties("C");

  -- compute the cogging torque
  mo_groupselectblock(2);
  torque[k] = mo_blockintegral(22);

  -- increment the rotor's position
  mi_selectgroup(2);
  mi_moverotate(0, 0, 360/2/steps, 4);
  mi_clearselected();
end

-- write results to disk for further analysis.

fp=openfile(mydir .. "flux-results-corrente-" .. corrente .. ".txt","w")

for k = 1,(steps+1) do
  write(fp,teta[k],"     ",fluxoA[k],"    ",fluxoB[k],"    ",fluxoC[k],"
        ",torque[k],"\n")
end

closefile(fp);
```