



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Caio Alexandre da Trindade Graciano


**ESTUDO DE UM MOTOR DE RELUTÂNCIA SÍNCRONA
PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Rio de Janeiro

2024

Caio Alexandre da Trindade Graciano

**ESTUDO DE UM MOTOR DE RELUTÂNCIA SÍNCRONA PELO
MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**



Trabalho de Conclusão de Curso apresentado, como requisito parcial para obtenção do título de Graduado em Engenharia Elétrica, à Faculdade de Engenharia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Ênfase: Sistemas de Potência.

Orientador: Prof. Cleiton Magalhães Freitas, D.Sc.

Rio de Janeiro

2024

Página da Ficha Catalográfica:

A biblioteca deverá providenciar a ficha catalográfica. Salve a ficha no formato PDF.

Substitua esse arquivo **Ficha.pdf** na pasta **B.PreTextual** pelo pdf da sua ficha catalográfica enviado pela biblioteca.

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX

XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX

XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX

XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX

XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX

XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Caio Alexandre da Trindade Graciano

**ESTUDO DE UM MOTOR DE RELUTÂNCIA SÍNCRONA PELO
MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado, como requisito parcial para obtenção do título de Graduado em Engenharia Elétrica, à Faculdade de Engenharia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Ênfase: Sistemas de Potência.

Aprovada em DD de MMMMMM de 2024.

Banca Examinadora:

Prof. Cleiton Magalhães Freitas, D.Sc. (Orientador)
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Prof^a. Bárbara Maria Oliveira Santos, D.Sc.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Prof. Otto Wanner Ganvini Asencios, D.Sc.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Pedro Henrique Pereira, D.Sc.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Rio de Janeiro

2024

DEDICATÓRIA

Eu dedico essa tese para uma pessoa muito especial.

AGRADECIMENTOS

Texto de agradecimento texto de agradecimento texto de agradecimento texto de
 agradecimento texto de agradecimento texto de agradecimento texto de agradecimento
 texto de agradecimento texto de agradecimento texto de agradecimento texto de agrade-
 cimento texto de agradecimento texto de agradecimento texto de agradecimento texto de
 agradecimento.

Feliz, feliz, feliz... Estou tão feliz
Uma criança feliz

RESUMO

DA TRINDADE GRACIANO, Caio Alexandre. *Estudo de um motor de relutância síncrona pelo método dos elementos finitos*. 2024. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

O motor de relutância síncrona é uma máquina cujo estator se assemelha ao de uma máquina de indução, mas que o rotor não possui condutores, apenas uma geometria que permite o surgimento do torque de relutância. Como diferencial, este tipo de máquina possui menores perdas e maior densidade volumétrica de potência, quando comparadas às tradicionais máquinas de indução. O objetivo deste estudo é simular um motor de relutância síncrona utilizando o método de simulação de elementos finitos no programa FEMM 4.2. Para isso, foi proposta uma máquina genérica com quatro polos e 36 *slots* de bobinas no estator e um rotor com configuração de laminação axial.

Os resultados de simulação permitiram obter as indutâncias próprias e mútuas da máquina, a característica de torque eletromagnético, o padrão de campo magnético espacial e o comportamento geral do campo magnético no sistema.

Palavras-chave: MRS; Relutância; Elementos Finitos;

ABSTRACT

DA TRINDADE GRACIANO, Caio Alexandre. *Study of a Synchronous Reluctance Motor through Finite Element Method*. 2024. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The synchronous reluctance motor is a machine whose stator resembles that of an induction machine, but its rotor lacks conductors and instead has a geometry that allows for the emergence of reluctance torque. This type of machine is distinguished by its lower losses and higher volumetric power density compared to traditional induction machines. The aim of this study is to simulate a synchronous reluctance motor using the finite element method in the FEMM 4.2 software. To achieve this, a generic machine with four poles and 36 coil slots in the stator and a rotor with axial lamination configuration was proposed.

The simulation results enabled the determination of the machine's self and mutual inductances, the electromagnetic torque characteristic, the spatial magnetic field pattern, and the overall behavior of the magnetic field within the system.

Keywords: SynRM; Reluctance; Finite Element Method; FEM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Material magnético em meio a um campo	20
Figura 2 - Máquina Síncrona de polos salientes genérica	21
Figura 3 - Eixos Direto e em Quadratura na máquina de polos salientes	22
Figura 4 - Eixos Direto e em Quadratura no SynRM	23
Figura 5 - Exemplos de rotor para SynRM	25
Figura 6 - Biblioteca de Materiais do FEMM	29
Figura 7 - Vista do motor a ser estudado	29
Figura 8 - Curvas de Fluxo Concatenado	33
Figura 9 - Fluxo nas bobinas A e C	34
Figura 10 - Fluxo Concatenado no ferro do rotor	35
Figura 11 - Caminhos de Fluxo de A para C	36
Figura 12 - Curva de Fluxo no Air gap do Aço M-36	39
Figura 13 - Curva de Histerese no Air Gap do Aço M-36	39
Figura 14 - Curva de Histerese do Aço M-36	40
Figura 15 - Curvas de Fluxo Concatenado do Aço M-36	40
Figura 16 - Curva de Indutância do Aço M-36	41
Figura 17 - Dados utilizados para corrente da máquina	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros Físicos da Máquina Simulada	28
Tabela 2 - Valores de Fluxo no Ferro	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SynRM	Synchronous Reluctance Machine
MRS	Máquina de Relutância Síncrona
RSM	Reaction Synchronous Motor
MEF	Método de Elementos Finitos

LISTA DE SÍMBOLOS

t	Tempo
L	Dimensão na direção x
H	Dimensão na direção y
ρ	Massa específica
μ	Viscosidade dinâmica
ν	Viscosidade cinemática

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	13
1	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	19
1.1	Conceito de Relutância	19
1.2	Definição de eixo direto e de quadratura	22
1.3	Definição da máquina de relutância síncrona	23
1.4	Tipos de Rotor	24
1.5	Teoria Aplicada	25
1.6	Conclusões Parciais	26
2	PREPARAÇÃO DAS SIMULAÇÕES	27
2.1	FEMM	27
2.2	Definição da Máquina a ser estudada	27
2.3	Metodologia de automação das simulações	30
2.4	Testes iniciais da geometria	32
2.5	Conclusões parciais	34
3	RESULTADOS	38
3.1	Levantamento dos vetores de campo magnético espaciais	38
3.2	Levantamento da Indutância	38
3.3	Levantamento do Torque	42
	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS	44
	GLOSSÁRIO	46
	APÊNDICE A – Primeiro apêndice	47
	APÊNDICE B – Segundo apêndice	49
	ANEXO A – Primeiro anexo	50
	ANEXO B – Segundo anexo	51
	ÍNDICE DE ASSUNTOS	52

INTRODUÇÃO

A tecnologia envolvida na construção de motores são um ótimo parâmetro para representar o desenvolvimento de um estado. Desde as máquinas à pressão de vapor até as primeiras máquinas à combustão, a engenharia vem inovando formas cada vez mais baratas e eficientes de se aproveitar energia. Com o desenvolvimento de máquinas vieram as máquinas elétricas que, em comparação as de combustão, apresentam maior portabilidade e podem ser fabricadas em diversos tamanhos para diversas potências. Estima-se que na indústria nacional, 70% da energia elétrica é convertida em mecânica por motores elétricos. Dos variados tipos de motores elétricos o mais popular é o de indução, tanto trifásico quanto monofásico, que representam cerca de 90% do total de motores em atividade (CARMO; COELHO; ÊVO, 2023). Isso porque:

- É um motor de simples construção;
- De baixa complexidade;
- Barato para ser construído;
- Econômico, por não precisar de alimentação no rotor.

Apesar dessas vantagens, um novo tipo de motor está ganhando espaço no mercado, o Motor de Relutância Síncrona (MRS) ou *SynRM* (Synchronous Reluctance Motor) (MURATALIYEV et al., 2022). Ele apresenta as mesmas vantagens descritas acima, mas também é um motor frio e por isso é mais eficiente.

Mas por que um motor “frio”? O princípio de funcionamento do motor de indução envolve a condução de corrente elétrica em um enrolamento ou conjunto de barras curto-circuitadas localizadas no rotor da máquina. Por ser uma corrente muito alta, o motor apresenta temperaturas elevadas, apresentando perdas de potência no rotor e de vida útil. O motor de relutância síncrona, por outro lado, tem princípio de funcionamento baseado no torque de relutância. Quando ocorre a presença de um fluxo magnético, este tende a seguir o caminho de menor relutância, de maneira análoga ao comportamento da corrente elétrica que percorre o caminho de menor resistência em circuitos elétricos. Assim, quando um material ferromagnético está posicionado no trajeto do fluxo magnético, ele se alinhará com o fluxo para se tornar o caminho de menor relutância. Esse alinhamento é induzido pelo torque de relutância. Em resumo, o torque de relutância é o resultado da força que promove o alinhamento de um material ferromagnético com o fluxo magnético, visando minimizar a relutância magnética.

Acho que isso tudo de eixo direto e de quadratura devem ir para o próximo capítulo ... vou deixar um comentário lá.

É importante entender os conceitos de eixo direto (d) e em quadratura (q) para compreender o funcionamento das máquinas síncronas de relutância ou de polos salientes.

O estudo do motor de relutância síncrona é de suma importância no contexto atual de avanços tecnológicos e demanda por soluções energéticas eficientes e sustentáveis. Este tipo de motor, que se destaca por sua construção robusta, ausência de ímãs permanentes e baixo custo de fabricação, apresenta um potencial significativo para aplicações industriais e de mobilidade elétrica. A análise detalhada de suas características eletromagnéticas utilizando método dos elementos finitos trás consigo uma compreensão dos efeitos da geometria do rotor. Ademais, a compreensão aprofundada dos princípios de funcionamento e dos desafios técnicos associados ao motor de relutância síncrona contribui para a formação de engenheiros capacitados, aptos a inovar e implementar tecnologias que atendam às crescentes exigências por eficiência energética e sustentabilidade ambiental. Portanto, o desenvolvimento deste projeto de graduação é não apenas relevante, mas também estratégico para o avanço do conhecimento científico e tecnológico no campo dos motores elétricos.

Explica o que é isso ... em geral, o eixo direto está alinhado com o eixo magnético do campo, o outro está em 90 graus em relação a ele. No caso da máquina de relutância, um dos eixos representa o caminho de baixa relutância e o outro o de alta relutância

acho que seria bom colocar colocar uma descrição mais completa sobre eixo direto e de quadratura no próximo capítulo. Uma explicação contendo figuras

Para analisar o comportamento de uma máquina síncrona de relutância ou de polos salientes, pode ser conveniente usar um método de referência diferente da corrente trifásica. O rotor de uma máquina síncrona pode apresentar uma geometria que faça com que ela tenha um eixo de menor relutância com o fluxo do enrolamento de campo, e um eixo que tenha a maior relutância com esse mesmo campo. Desse modo, através da Transformada de Park é possível visualizar a interação do fluxo magnético com as correntes de modo simplificado, facilitando controle e análise de desempenhos. (UMANS, 2014).

Já foi comprovado que, usando um mesmo estator, o modelo de relutância síncrona consegue produzir de 10% a 15% mais torque em relação ao de indução (BOGLIETTI; PASTORELLI, 2008).

Por isso o objetivo deste projeto é estudar as características de um motor de relutância síncrona.

vai para o próximo capítulo o que estava até aqui

Nesta altura, você já apresentou a contextualização e já disse o que é uma máquina de indução. Para finalizar esta parte, escreva um parágrafo dizendo que é importante estudar este tipo de máquina e por isso este projeto foi proposto. É quase como uma preliminar dos objetivos

Objetivo

Este trabalho visa simular uma máquina de relutância síncrona por meio do software FEMM (Finite Element Method Magnetics) (MEEKER, 2019). O FEMM, baseado no método dos elementos finitos, permite o cálculo de campos em circuitos magnéticos e será utilizado para determinar diversos parâmetros elétricos/magnéticos da máquina. Sendo assim, os objetivos específicos são:

- Cálculo das Indutâncias: Determinar as indutâncias da máquina, essenciais para compreender o comportamento e a eficiência do sistema.
- Estudo do Comportamento do Torque e da Tensão Induzida: Analisar o torque gerado pela máquina em relação às diferentes condições de operação, assim como a tensão induzida, contribuindo para a compreensão do desempenho do sistema.
- Avaliação da Distribuição de Fluxo Magnético: Investigar como o fluxo magnético se distribui na máquina.
- Verificação dos Efeitos da Saturação Magnética: Investigar os efeitos da saturação magnética, um fenômeno que afeta o desempenho e a estabilidade da máquina em diferentes regimes de operação.

Justificativa

Escrever aqui onde este tipo de máquina vem sendo usado

dizer quais fabricantes já disponibilizam este tipo de máquina. A ABB é um caso:

SynRM ABB

É importante colocar algumas referencias neste processo!

Esta seção pode ser menos técnica e mais de divulgação.

O *SynRM* não é uma novidade, na verdade, existem estudos sobre a teoria de motores de relutância síncrona desde 1923 (KOSTKO, 1923). Nessa época, era utilizado o motor síncrono de reação¹, sua aplicação era em ferramentas de pequeno porte, como oscilógrafos e em dispositivos de retificação. Mas alcançou o seu limite devido à baixa eficiência e torques para cargas mais baixas. A sua performance era precária para motores de escala maior.

¹ Motor síncrono de reação é um motor de polos salientes sem enrolamento de campo, o predecessor dos motores de relutância atuais, pode ser visto um exemplo na Fig.5.a

Em seu artigo, KOSTKO argumentou que a inferioridade do motor síncrono de reação era devido à forma do rotor e assim desenvolver uma geometria de rotor que o fizesse performar como os motores CA da época.

Atualmente o motor de indução permanece popular, mas devido ao avanço de tecnologias de controle, o motor de relutância síncrona começou a atrair cada vez mais atenção. Já foi comprovado que em uma comparação direta entre o motor de indução e o motor de relutância síncrona, o motor de relutância consegue performar com um torque maior apesar de apresentar uma grande oscilação no torque (ABRAMENKO et al., 2020; MOGHADDAM; MAGNUSSEN; SADARANGANI, 2010).

As máquinas de relutância síncrona têm conquistado cada vez mais espaço no mercado, pois devido às necessidades e avanços tecnológicos atuais fazem com que este modelo de máquina síncrona seja mais viável. Por exemplo, o modelo da ABB apresenta as mesmas características do motor de indução mas conta algumas vantagens. O funcionamento a frio, devido ao mínimo de perdas no rotor. Não há ímãs, então não há problemas de rendimento para o caso de operação em altas temperaturas e é mais barato para construir. Devido à simplicidade do rotor, a sua manutenção também é facilitada. Além disso, devido ao desenvolvimento de inversores cada vez melhores, o motor consegue desempenhar bem em amplas faixas de velocidade (CATÁLOGO..., 2024).

O *SynRM* possui diversas aplicações, mas pode-se citar sistemas de ventilação, misturadores e compressores. Algumas das maiores indústrias de tecnologia já possuem seu próprio modelo do *SynRM*, como o *SynRM* da ABB e *SIMOTICS* da Siemens (TECHNICAL..., 2022).

Revisão Bibliográfica

Este projeto foi realizado com diversas referências, mas é válido destacar a dissertação de mestrado de MOGHADDAM. Muito da teoria trabalhada neste projeto, assim como referências gráficas foram confirmados desse trabalho.

O objetivo da tese de MOGHADDAM foi apresentar a informação necessária para o desenvolvimento de uma geometria eficiente do rotor do *SynRM*. Para entender o potencial do *SynRM* ele fez comparações entre a máquina projetada e o Motor de Indução (IM) pois este é o mais utilizado na indústria. Foram verificadas diversas geometrias de rotor, baseado no trabalho de (KOSTKO, 1923). Além disso, o trabalho estuda a influência dos parâmetros principais na performance do motor, utilizando o método de elementos finitos (FEM). Através da teoria utilizada de outras publicações, materiais e estudos utilizando FEM ele alcançou diversos resultados, divididos em 6 capítulos. No capítulo 2 elucidou os princípios básicos e utilizou a transformada de Park para efetuar a modelagem do motor. Nos capítulos 3 e 4 foram feitas comparações diretas entre o *SynRM* e o

IM, além de demonstrar as diferentes geometrias do rotor e alguns sistemas de controles são investigados. No capítulo 5, foram classificados os parâmetros que influenciam a performance do motor, e seus efeitos foram investigados e demonstrados. No capítulo 6 a geometria otimizada é desenvolvida utilizando métodos teóricos e FEM. E nos capítulos 7 e 8, a geometria gerada de cada conjunto de parâmetros de *design* é modelada com software de elementos finitos adequado para avaliar as variáveis-alvo.

Também deve ser apontada a importância do artigo de KOSTKO (1923), que foi referência para muitos dos artigos e literaturas modernas a respeito do *SynRM*. Em seu artigo, ele desenvolve a teoria do motor de reação (o que viria a ser o *SynRM*), demonstra que sua inferioridade aos motores da época eram devidos à forma do rotor, e analisar uma construção de rotor que equiparasse os motores de reação aos de corrente alternada que estavam em alta na época.

Vale mencionar que existem estudos de otimização que definem quais parâmetros devem ser variados para se obter maior eficiência com a máquina. Por exemplo, o artigo de BÁRTA; ONDRŮŠEK é de otimização de um motor TLA, com foco em achar a relação entre o número de barreiras no rotor e o número de bobinas no estator no torque produzido. Neste artigo, os autores chegaram à conclusão que a oscilação do torque varia com o número de barreiras, e que para diferentes tamanhos de barreiras a oscilação do torque não variou significativamente. Esse resultado foi confirmado no capítulo 8 da tese de MOGHADDAM, que concluiu que variar o número de barreiras não é a melhor estratégia para otimização da oscilação do torque.

Além disso, há também o artigo de LIM et al. cujo objetivo é otimizar o *design* do rotor de acordo com a relação Torque/Volume. O procedimento utilizado foi relacionar a potência de saída de acordo com as variações no tamanho da máquina. Foi criado um algoritmo que visava maximizar a diferença $L_d - L_q$ em função da variação de K_w , que é a razão entre a largura da barreira de fluxo e a largura das camadas de ferro no rotor. Através de um processo iterativo utilizando FEA e CAD, ele pôde achar a relação K_w ótima para qualquer diâmetro de rotor. Os dados obtidos apontam que a relação de K_w com o diâmetro do rotor é inversamente proporcional (LIM et al., 2007).

Organização do Trabalho

Nesta dissertação, serão abordados os softwares utilizados e sua contribuição para sua conclusão. Em seguida, será apresentada a máquina de relutância síncrona (*SynRM*) escolhida para o estudo, destacando suas características elétricas e magnéticas.

Na sequência, serão realizadas simulações conforme os objetivos propostos. Primeiramente, serão apresentadas as curvas de fluxo e de indutância da máquina, seguidas pela análise do efeito da geometria do rotor nessas indutâncias. Posteriormente, será

abordado o comportamento do torque e da tensão induzida, seguido pela análise da distribuição de fluxo magnético na máquina. Por fim, serão examinados os efeitos causados pela saturação magnética.

1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Neste capítulo será exposto o princípio de funcionamento de um SynRM, as teorias envolvidas e as especificações da máquina a ser estudada. Será explicado o conceito de relutância e como esta é utilizada no motor de relutância síncrona. Além disso, será explicado porque tal motor funciona mesmo sem enrolamento de campo como os motores síncronos tradicionais. Também serão explicadas as referências do eixo direto e em quadratura, o porque utilizaremos essas referências e porque elas são importantes para este estudo. Após a explicação do conceito de relutância e as referências de eixo direto e em quadratura, será explicado como a máquina de relutância síncrona se difere de outras máquinas CA. Serão apresentados alguns dos tipos de rotor que caracterizam o motor de relutância síncrona e a evolução do motor saliente de polos simples para o atual ALA. Também serão mostradas as equações teóricas que serão úteis no estudo desta máquina.

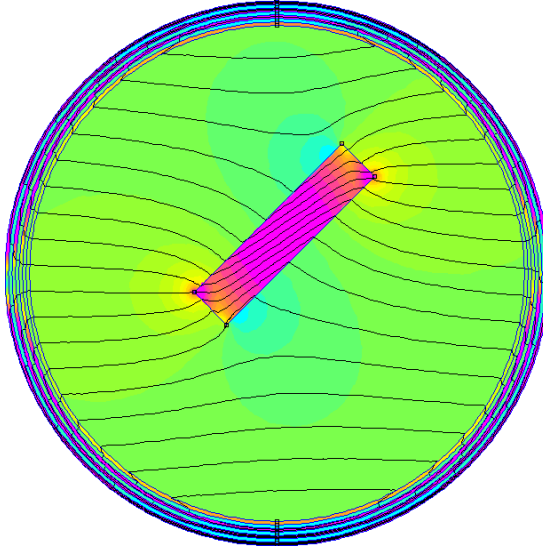
1.1 Conceito de Relutância

A máquina de relutância síncrona (SynRM) é um dispositivo que usa o conceito de relutância e campo magnético senoidal para produzir torque. O princípio de funcionamento do motor é bem simples. Quando um material magnético é imerso em campo magnético em um meio de alta relutância, como o ar por exemplo, as linhas de fluxo tendem a convergir e passar pelo meio de menor relutância, que seria o caminho por dentro material ferromagnético. Na Figura 1a, observamos esta situação. Neste caso, o material magnético possuirá a tendência de se alinhar com as linhas de fluxo magnético, de forque a maximizar a quantidade de linhas de fluxo em seu interior. Esta questão é visualizada na porção direita da figura Figura 1b. Como consequência, é gerado um torque para que o material se alinhe com o campo magnético.

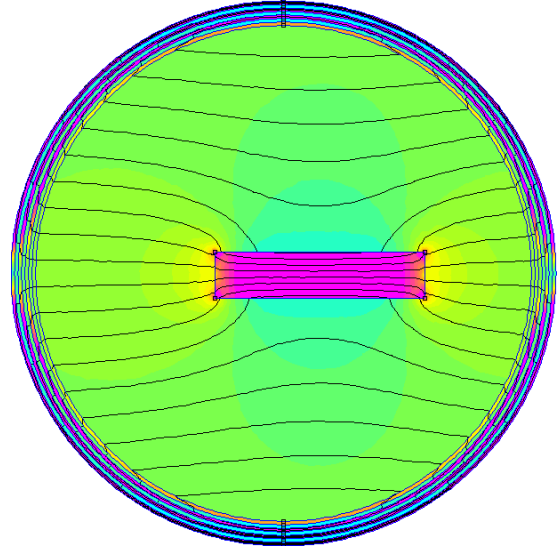
Para entender melhor o conceito de torque de indutância, considere uma máquina síncrona trifásica de polos salientes mostrada na figura 2. Se considerarmos a corrente de

Figura 1 - Material magnético em meio a um campo

(a) Inclinado em 45°



(b) Em fase com o campo



Fonte: O Autor

campo i_{fd} igual a zero, a coenergia (UMANS, 2014, sec. 3.6) ficará da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 W'_\phi = & \frac{i_a^2}{2} \left[L_A - L_B \cos(2\theta_r) + L_{sl} \right] + i_a i_b \left[-\frac{L_A}{2} + L_B \cos\left(2\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) \right] \\
 & + i_a i_c \left[-\frac{L_A}{2} + L_B \sin\left(2\theta_r + \frac{\pi}{6}\right) \right] + \frac{i_b^2}{2} \left[L_A + L_B \cos\left(2\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) + L_{sl} \right] \\
 & + i_b i_c \left[-\frac{L_A}{2} - L_B \cos\left(2\theta_r + \frac{\pi}{6}\right) \right] + \frac{i_c^2}{2} \left[L_A + L_B \sin\left(2\theta_r + \frac{\pi}{6}\right) + L_{sl} \right]
 \end{aligned} \tag{1}$$

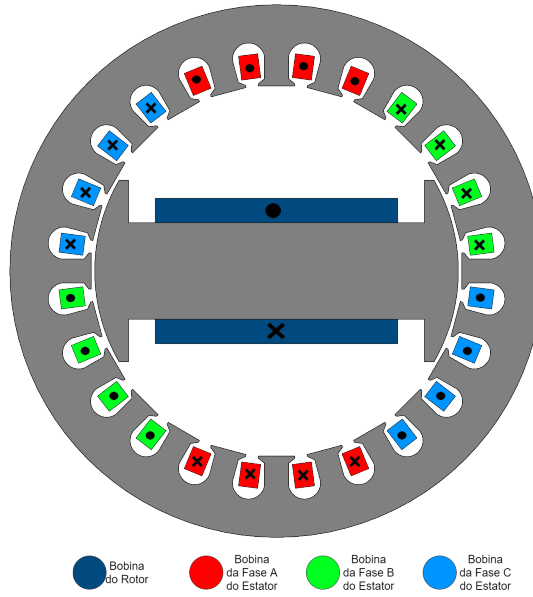
onde:

- L_{sl} é a indutância mútua de dispersão, comum à todos os enrolamentos do estator.
- L_A , L_B e L_C são respectivamente a indutância própria das bobinas A, B e C.
- θ_r é o ângulo que o eixo direto do rotor faz com a referência do estator.
- i_a , i_b e i_c são as correntes das bobinas A, B e C.

As indutâncias utilizadas na equação 1 foram retiradas de (KRAUSE, 2013, eq. 1.4-16).

Para obter o torque deste máquina síncrona elementar, basta derivar a coenergia

Figura 2 - Máquina Síncrona de polos salientes genérica



Fonte: (FREITAS, 2021)

encontrada em relação ao ângulo θ_r (UMANS, 2014, sec. 3.6):

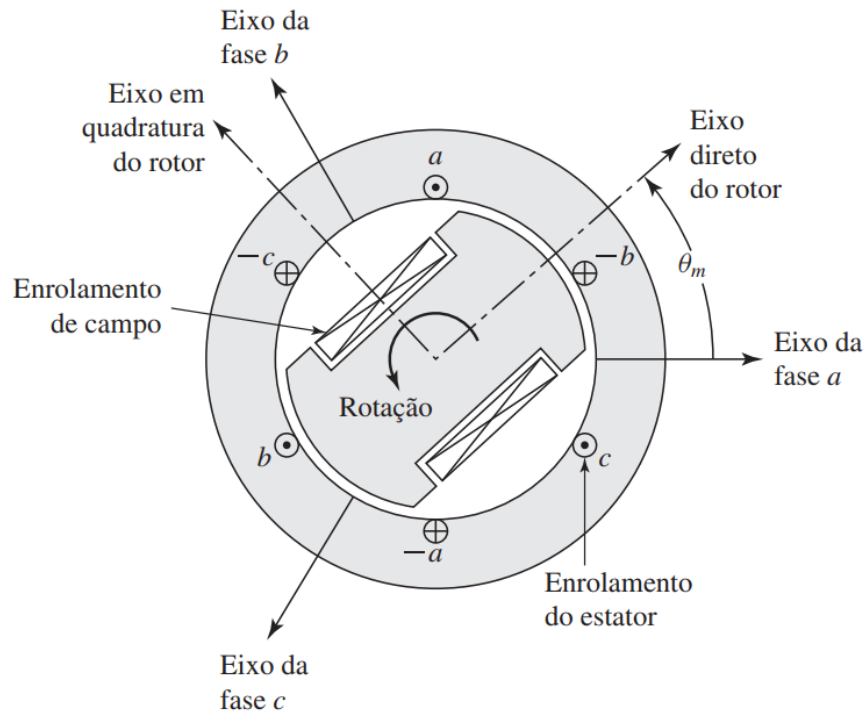
$$T = \frac{\partial W'_\phi}{\partial \theta_r} = L_B i_a^2 \sin(2\theta_r) - 2L_B i_a i_b \sin\left(2\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) + 2L_B i_a i_c \cos\left(2\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) - L_B i_b^2 \sin\left(2\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) + 2L_B i_b i_c \sin(2\theta_r) + L_B i_c^2 \cos\left(2\theta_r + \frac{\pi}{6}\right) \quad (2)$$

Considerando i_a , i_b e i_c como correntes trifásicas com valores eficazes iguais a I_s , defasadas de 120° entre si e com ângulo de fase ϕ :

$$T = \frac{\partial W'_\phi}{\partial \theta_r} = -3I_s^2 L_B \left[\sin(2\phi) - \frac{1}{2} \sin(2\phi - 4\theta_r) \right] \quad (3)$$

Dessa forma, é possível ver que existe torque mesmo desconsiderando a corrente do enrolamento de campo. Esse torque é o torque de relutância e ele é proporcional ao quadrado da corrente do estator. Além disso, ele possui duas componentes, uma média e outra com quatro vezes a frequência do mecânica. A componente média força o caminho de baixa relutância do rotor se alinhar com o campo magnético girante produzido pelo estator.

Figura 3 - Eixos Direto e em Quadratura na máquina de polos salientes



Fonte: (UMANS, 2014), Apêndice C

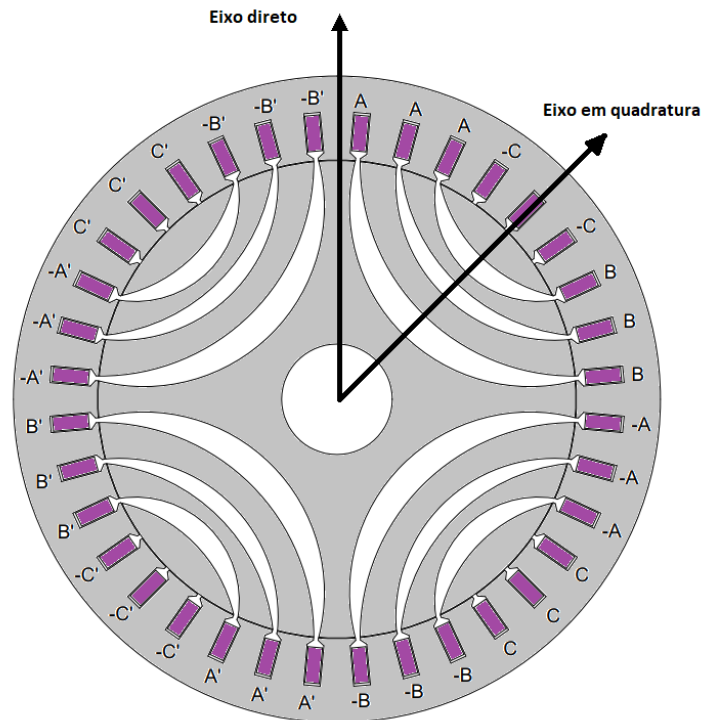
1.2 Definição de eixo direto e de quadratura

Para analisar o comportamento de uma máquina síncrona de relutância ou de polos salientes, pode ser conveniente usar um referencial de representação de tensões, correntes e indutâncias diferentes do referencial natural abc . A transformação das variáveis de eixo direto e em quadratura, também chamada de transformação de Park, consiste em decompor as grandezas de armadura de uma máquina síncrona em duas componentes girantes, uma alinhada com o eixo do enrolamento de campo, a componente de eixo direto, e a outra perpendicular ao eixo de enrolamento de campo, definida como eixo em quadratura. Para exemplificar, o rotor de uma máquina síncrona pode apresentar uma geometria que faça com que ela tenha um eixo de menor relutância, alinhado com o fluxo produzido pelo circuito de campo, e um eixo que tenha a maior relutância. O eixo alinhado com o fluxo do campo é o eixo direto da máquina, como pode ser visto na Figura 3.

Essa transformação é conveniente pois as grandezas giram junto com o rotor, portanto, o valor dos caminhos magnéticos do ponto de vista dessas grandezas é constante. Desse modo, através da Transformada de Park é possível visualizar a interação do fluxo magnético com as correntes de modo simplificado, facilitando controle e análise de desempenhos (UMANS, 2014).

No caso do motor de relutância síncrona a ser estudado, não há enrolamentos

Figura 4 - Eixos Direto e em Quadratura no SynRM



Fonte: O Autor

de campo para serem utilizados como referência para os eixos direto e em quadratura. O princípio de funcionamento do *SynRM* é baseado no torque de relutância explicado na seção 1.1. Nesse caso, o eixo direto é o caminho de menor relutância no rotor, e o caminho de maior relutância é o eixo em quadratura. Esses eixos podem ser visualizados na figura 4.

1.3 Definição da máquina de relutância síncrona

O estator da máquina de relutância síncrona possui uma configuração praticamente igual ao estator de máquinas de indução e máquinas síncronas. No geral, a máquina de relutância síncrona é similar a uma máquina síncrona de polos salientes, a maior diferença entre as duas é a ausência de enrolamento de campo. Sendo assim, o rotor tira vantagem de sua geometria que favorece o alinhamento com um determinado eixo e desfavorece o outro, sendo estes os eixos direto e em quadratura. Assim obtendo o maior aproveitamento do torque de relutância. No caso da máquina de relutância síncrona, o rotor apresenta

barreiras² em camadas de isolamento, como as mostradas no rotor da máquina da Figura 4, com o objetivo de oferecer um caminho de alta relutância para o fluxo do estator. Neste caso, havendo campo girante produzido pelo estator, o eixo de baixa relutância do rotor tenderá a se alinhar com ele.

1.4 Tipos de Rotor

As máquinas de relutância síncrona tiveram várias propostas de design de rotor ao longo dos anos, é válido citar três delas. O que as três possuem em comum são suas estruturas anisotrópicas, o que significa que dependendo da direção da medição o campo medido é diferente.

O primeiro tipo é o rotor de polos salientes simples que pode ser visto na Figura 5(a). Ele possui um *design* simples que é obtido removendo partes transversais do rotor de polos lisos.

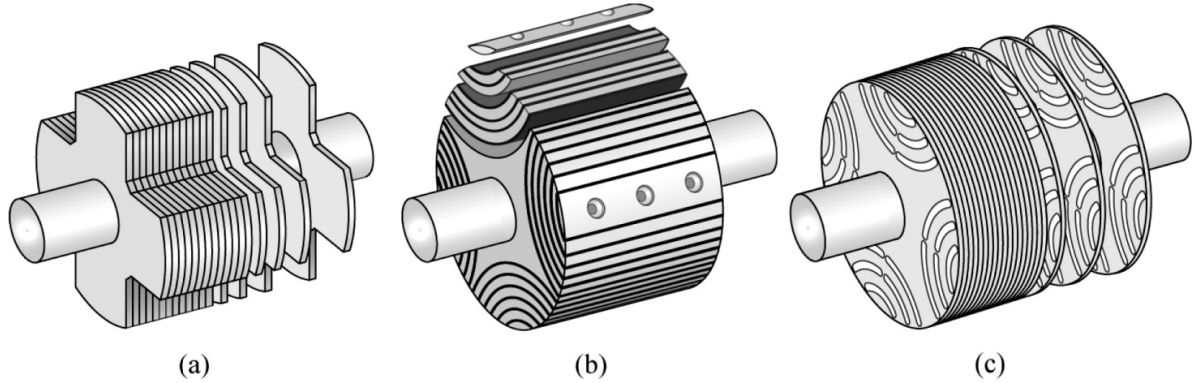
Em segundo, o rotor Axialmente laminado (ALA), é feito em camadas de materiais magneticamente e eletricamente passivos (isolantes), de modo a fazer a barreira de alta relutância no eixo em quadratura. As camadas são fixas por hastes que vão da região central às margens como na Figura 5(b). Este modelo é alvo de muitos estudos e alguns deles apontam que, para o mesmo estator que o de um motor de indução, este produz maior eficiência. Este modelo também é capaz de gerar alta saliência (ξ), o que permite alcançar alto fator de potência e minimizar as perdas RI^2 no estator (ABRAMENKO et al., 2020).

No terceiro modelo, o Transversalmente laminado (TLA) pode ser visto na Figura 5(c). Ele é montado de maneira mais tradicional, o que facilita a sua fabricação em relação ao ALA. Além disso, estudos comprovam que a maior parte de perdas ocorrem no rotor do ALA devido aos harmônicos do fluxo magnético causados por corrente parasita, o que pode ser facilmente corrigido no TLA com *skewing*³ (CHALMERS; MUSABA, 1997).

² As barreiras no motor de relutância síncrona são a parte do rotor que definem o meio de maior relutância, ou seja, o eixo em quadratura. No caso do motor deste estudo serão utilizadas barreiras de ar. Na figura 4 é representada pela parte branca no rotor.

³ Skewing consiste em inclinar ou deslocar as ranhuras do rotor ou do estator em relação ao eixo longitudinal da máquina. Essa inclinação é aplicada de forma que as ranhuras não estejam perfeitamente alinhadas ao longo do comprimento do rotor ou estator, mas sim deslocadas ao longo de um pequeno ângulo. Como em MI com gaiola de esquilo.

Figura 5 - Exemplos de rotor para SynRM



Fonte: (FUKAMI et al., 2008)

1.5 Teoria Aplicada

Talvez esse não seja o melhor título para esta seção (vê aí).

Esta seção deve apresentar aquelas definições de torque e de indutância que você me mostrou nas últimas reuniões. É para ser algo didático.

Os dados foram majoritariamente obtidos através das simulações, sem muitos cálculos empregados. Mas há algumas equações importantes a se considerar. A equação do torque a ser considerada é a equação 4:

$$\begin{aligned}
 T_{em-g} &= \frac{3p}{2} (\lambda_m \times i_m) = \frac{3p}{2} |\lambda_m| \cdot |i_m| \sin \beta \\
 &= \frac{3p}{2} (\lambda_{dm} i_{qm} - \lambda_{qm} i_{dm}) = \frac{3p}{2} (L_{dm} i_{dm} - L_{qm}) \cdot i_{dm} i_{qm} \\
 &= \frac{3p}{2} (L_{dm} (i_{dm}) - L_{qm}) \cdot I_m^2 \sin(2\theta)
 \end{aligned} \tag{4}$$

É possível ver a alta dependência do torque da máquina às diferenças de indutância ($L_{dm} - L_{qm}$) para uma determinada corrente no estator. E além disso, é possível ver que o torque é máximo quando o ângulo da corrente é de $\frac{\pi}{4}$.

Um termo que será empregado é a saliência do air gap, visto na relação 5. Quanto maior essa razão, maior o torque médio produzido pela máquina. Estudos apontam que para uma máquina de 4 polos essa razão se aproxima de $\xi \approx 10$ (MOGHADDAM, 2010).

$$\xi = \frac{L_{dm}(i_{dm})}{L_{qm}} \quad (5)$$

Para realizar os cálculos de indutância própria das bobinas do estator, será seguida a definição de autoindutância mostrada no Capítulo 1 do (UMANS, 2014).

$$\lambda_A = L_{AA} \cdot I_A + L_{AB} \cdot I_B + L_{AC} \cdot I_C \quad (6)$$

Colocar equações de cálculo de indutância

1.6 Conclusões Parciais

Neste capítulo foram feitas as demonstrações básicas para a compreensão do funcionamento do motor de relutância síncrona. Foi visto o conceito de torque de relutância, que se manifesta quando um objeto ferromagnético é imerso em um campo magnético de modo que os dois se alinhem, para que o sistema esteja em seu menor nível energético. Além disso, foi demonstrado através da derivada da fórmula da co-energia que mesmo sem enrolamento de campo, uma máquina síncrona é capaz de gerar torque. Também foi apresentada a definição da máquina de relutância síncrona e em como ela se difere de outras máquinas síncronas. Foram também apresentados alguns *designs* de rotor empregados em máquinas de relutância síncrona, como o TLA, ALA e polos salientes simples, e a motivação de o rotor ALA ter sido escolhido para este estudo. Finalmente, foram mostradas as equações que fazem parte da teoria aplicada ao motor *SynRM* que será utilizada neste estudo. cabe umas 2 ou 3 frases com conclusões desta última informação (a razão de saliência influencia a capacidade de torque!? e etc)

2 PREPARAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Neste capítulo serão feitas as convenções e considerações para a simulação da máquina a ser estudada. Serão vistas algumas das características técnicas da máquina, como diâmetro, número de fases e polos por exemplo. Também será feita uma breve explicação sobre o programa a ser utilizado para efetuar as simulações e o que é esperado pelo levantamento em métodos dos elementos finitos. Além disso, será explicado como será a integração entre o programa de simulação e a linguagem de programação Python 3 (ROSSUM; DRAKE, 2009), o que vai ser importante para a automação de algumas das simulações realizadas. Há também uma breve explicação dos preparativos feitos no FEMM 4.2 (MEEKER, 2019), operação em blocos, materiais utilizados e como a geometria do motor foi desenvolvida.

2.1 FEMM

O FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) (MEEKER, 2019) é um software gratuito de análise de campo magnético utilizando o método dos elementos finitos (FEM). Ele foi desenvolvido por David Meeker e é amplamente utilizado para resolver problemas bidimensionais (2D) de eletromagnetismo, incluindo eletrostática, magnetostática e análise de corrente alternada (AC). Ele é particularmente útil em aplicações de engenharia elétrica, como o projeto de motores elétricos, transformadores, sensores magnéticos e outros dispositivos que dependem de campos magnéticos e elétricos.

O FEMM fornece uma interface gráfica de usuário (GUI) intuitiva para a criação e modificação de geometrias de problemas, definição de propriedades materiais e configuração de condições de contorno. Após a configuração do problema, o software realiza a discretização da área de interesse em uma malha de elementos finitos, resolve as equações que regem cada elemento e combina os resultados para fornecer uma solução global. Além da interface gráfica, o FEMM inclui um mecanismo de *scripting* que permite automatizar tarefas repetitivas e realizar análises paramétricas (MEEKER, 2020).

Um breve tutorial de utilização do FEMM está disponível em (FREITAS, 2020).

2.2 Definição da Máquina a ser estudada

Algumas das especificações técnicas da máquina podem ser vistas na tabela 1. Para a metodologia utilizada para a simulação, alguns parâmetros terão influência mínima ou praticamente nula. Como o comprimento da máquina por exemplo.

Tabela 1 - Parâmetros Físicos da Máquina Simulada

Parâmetro da Máquina	Valor
Número de par de polos	2
Número de fases	3
Ângulo entre fases (Graus)	30
Ranhuras no estator	36
Número de voltas nas bobinas	12
Diâmetro do rotor (cm)	19.93
Diâmetro interno do estator (cm)	20
Diâmetro externo do estator (cm)	27
Comprimento do Entreferro (mm)	35
Corrente Nominal (A)	8
Material do Rotor	Aço M-36
Material do Estator	Aço M-15
Material do Enrolamento do Estator	14 AWG

Fonte: O Autor

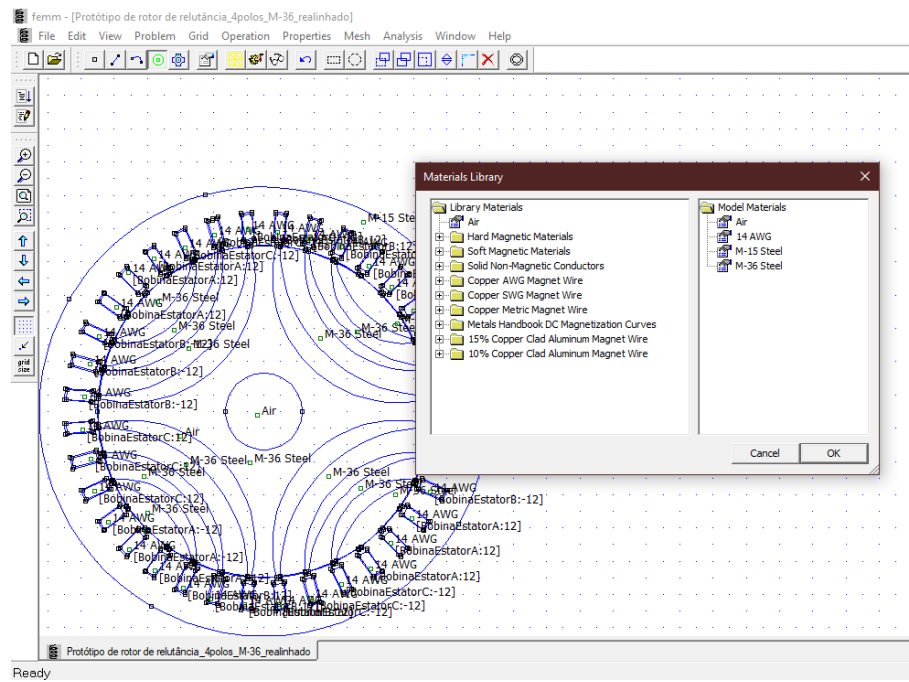
Com o desenho pronto, é possível adicionar os materiais que os componentes da máquina são constituídos. Para o rotor, foi escolhido o Aço M-36 e para o estator o Aço M-15. Já para o enrolamento das bobinas foi utilizado o 14 AWG. Vale mencionar que o estator utilizado no projeto foi baseado no estator utilizado na experiência (FREITAS, 2021) do curso de conversão eletromecânica de energia. Para o material isolante que constitui as barreiras do rotor, poderia ter sido escolhido um material diamagnético qualquer, mas para diminuir a complexidade da máquina e facilitar as simulações foi escolhido o ar. A atribuição dos materiais no FEMM pode ser feito no menu *Properties/Materials Library*, como pode ser visto na Figura 6.

Foi criado um rotor com 4 polos pois é uma geometria popular e didática para o estudo (vide figura 7). É importante mencionar que a geometria do rotor foi desenhada e importada de um arquivo DXF criado no software GStarCad 2024 (GSTARCAD..., 2024), enquanto a estrutura do estator foi obtida em (FREITAS, 2021).

O estator também possui quatro polos e suas bobinas foram configuradas com 12 espiras. Para o enrolamento da máquina, foi utilizado como referência a Figura 4.10.b do (UMANS, 2014). A diferença é que o estator do exemplo possui 12 bobinas, enquanto o da máquina a ser estudada possui 36. Então para cada bobina do exemplo, foram associadas 3 bobinas para a máquina deste estudo.

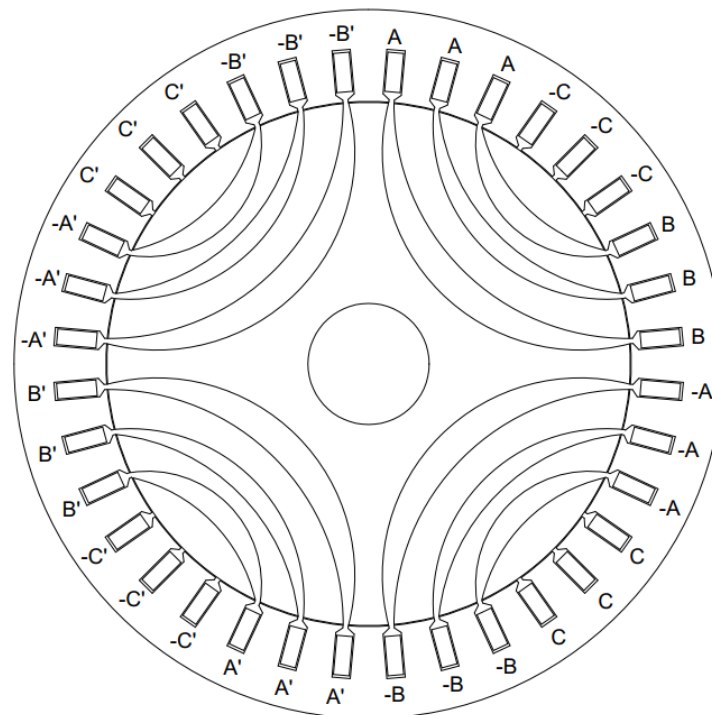
Para facilitar, é importante ter atenção aos grupos de blocos escolhidos. As linhas do rotor, assim como os blocos de material que o constituem, foram colocados em um mesmo grupo. Isso é importante, pois para rotacionar o rotor usando um *script* Python precisaremos usar uma função de seleção de grupo de componentes. Os demais processos serão elaborados nos próximos capítulos.

Figura 6 - Biblioteca de Materiais do FEMM



Fonte: O Autor

Figura 7 - Vista do motor a ser estudado



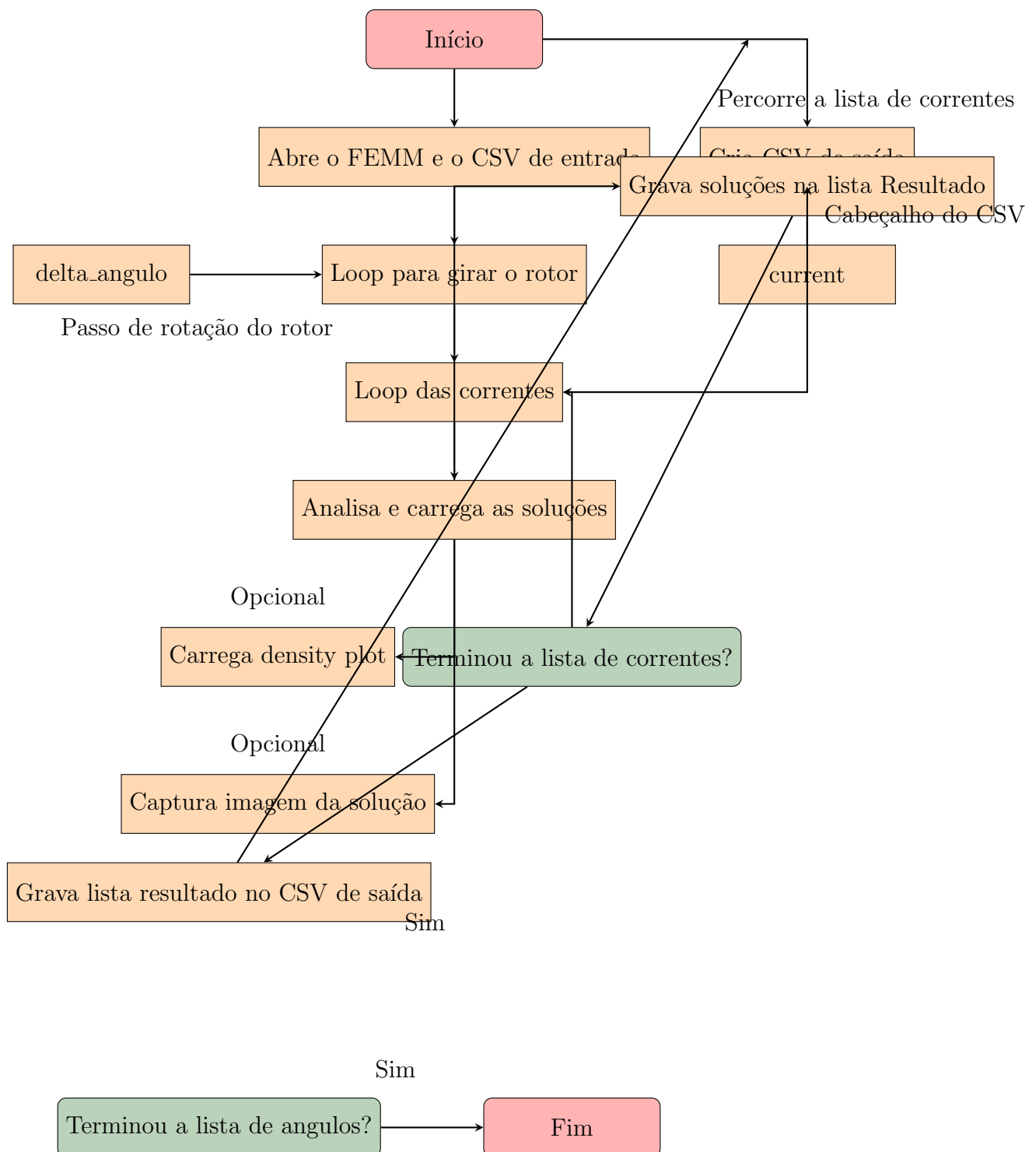
Fonte: O Autor

2.3 Metodologia de automação das simulações

Para conduzir os estudos, foi necessário integrar o software FEMM com uma linguagem de programação, uma vez que a rotação do rotor e a alteração manual dos valores de corrente se mostram inviáveis. O software FEMM é compatível com a linguagem de programação LUA (IERUSALIMSKY; FIGUEIREDO; CELES, 2000), no entanto, para este estudo, será utilizada a biblioteca *pyFEMM* (ROSSUM; DRAKE, 2009), que permite a integração de um código Python com o FEMM. Também foi utilizada a biblioteca CSV, com a finalidade de ler os valores de corrente associadas as bobinas nos processos iterativos do script. Em resumo, a biblioteca *pyFEMM* é responsável por interagir com o FEMM automaticamente, alterando valores, lendo dados e rotacionando o rotor. Enquanto a biblioteca *csv* faz a ponte entre os dados de corrente e os circuitos do estator dentro do arquivo FEMM.

Coloca um/uns fluxogramas indicando oque os seus programas fazem.

Não



Veja um exemplo. só não vai colocar nada muito grande. É só para demonstrar. Os códigos completos, com todos os detalhes pode ser colocado nos apêndices.

```

1 # Indutância Própria de um máquina síncrona de polos salientes
2 import numpy as np

```

```

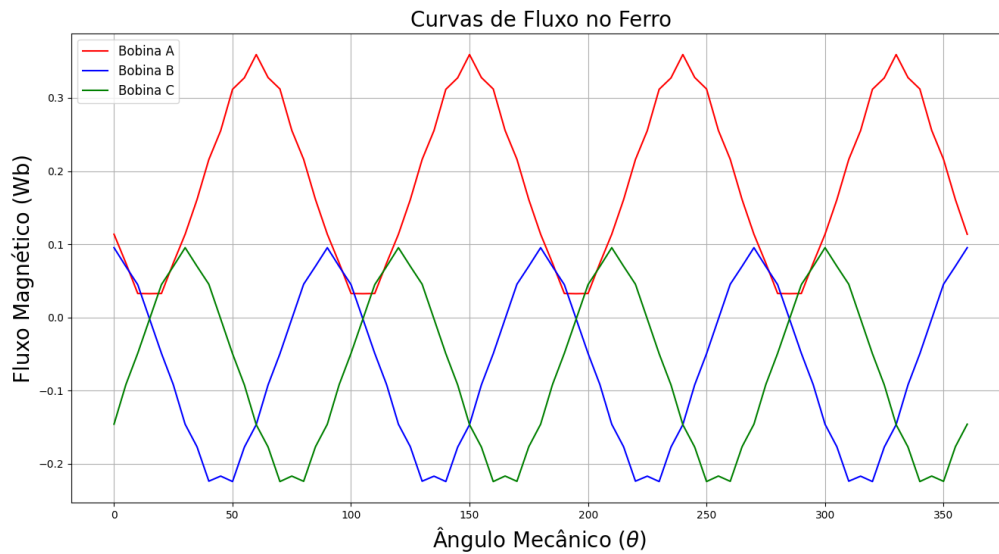
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 from scipy.optimize import curve_fit
5
6 # Vetor ângulo do rotor
7 teta = np.array([0,15,30,45,60,75,90,
8                 105,120,135,150,165,180,195,210,225,240,255,270])
9
10 # Indutância Própria
11 L = np.array([0.22,0.25,0.25,0.24,0.17,0.11,0.084,
12              0.05,0.064,0.07,0.14,0.18,0.23,0.25,0.24,0.23,0.17,0.13,0.082])
13
14 # Interpolação (curve fitting)
15 def func(x,a,b,c,d):
16     return a + b*np.sin(c*x+d)
17
18 popt, pcov = curve_fit(func, teta*np.pi/180, L)
19 tetainterp = np.linspace(0, 360, 100)
20 Linterp = func(tetainterp*np.pi/180, *popt)
21
22 # Plota os Gráficos
23 fig = plt.figure()
24 ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
25 ax.plot(teta,L,'ro',label='Valores Medidos', markersize=8)
26 ax.plot(tetainterp, Linterp,'b',label='Curva Aproximada')
27 plt.xlim([0,360])
28 plt.ylim([0,0.3])
29 plt.xlabel('Ângulo - graus', fontsize=12)
30 plt.ylabel('Indutância - H', fontsize=12)
31 plt.grid()
32 ax.legend()
33 plt.show()

```

2.4 Testes iniciais da geometria

Para assegurar a precisão da simulação, adotamos uma abordagem progressiva, iniciando com estágios mais simples e gradualmente aumentando a complexidade da máquina. Nos estágios iniciais da configuração do motor, estabelecemos uma permeabilidade magnética linear de 2000x2000 nos eixos x e y. Essa configuração simplificada permite o estudo do rotor antes de introduzir um material ferromagnético real, que exibe

Figura 8 - Curvas de Fluxo Concatenado



Fonte: O Autor

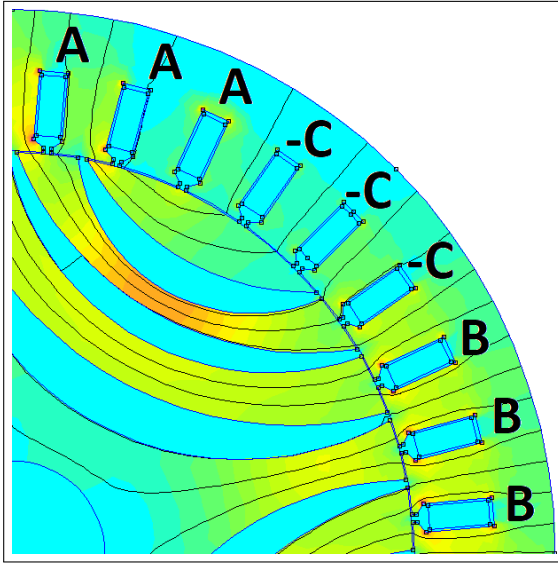
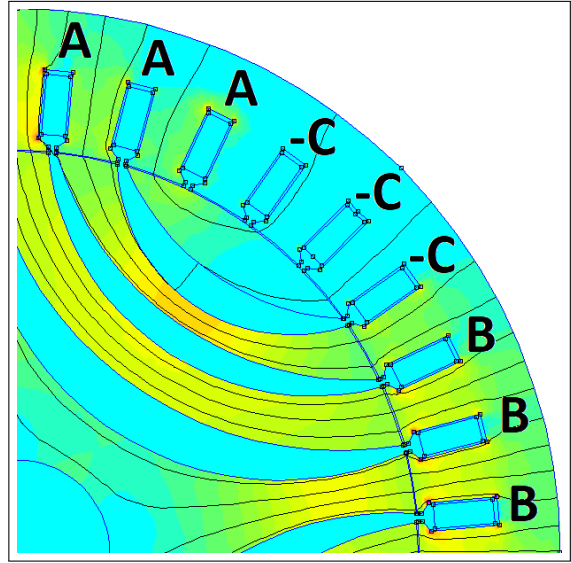
um comportamento não linear na relação $B \times H$ (Campo Magnético X Intensidade de Campo Magnético). O objetivo é verificar a coerência do comportamento do motor antes de avançar para etapas mais complexas, como a incorporação de atributos especiais, incluindo laminação, tipo de fio e material ferromagnético real.

Esta simulação foi configurada para manter uma corrente contínua de 5 A na bobina A, enquanto as bobinas B e C permanecem com corrente nula. Essa configuração permite a análise inicial do comportamento da máquina e facilita a detecção de eventuais discrepâncias ou inadequações no modelo. As curvas de fluxo concatenado das bobinas podem ser observadas no gráfico 8.

Ao observar o gráfico da Figura 8, é possível ver que as curvas de fluxo na bobina A atingem o máximo de 0,36 Wb e o mínimo de 0,0325 Wb. É possível ver o efeito do fluxo da bobina A passando pelas bobinas B e C, apresentando um comportamento trifásico. Na figura 10(b) é possível ver que as camadas do rotor oferecem um caminho de fluxo para a bobina A, fazendo-a atingir seu valor máximo. Enquanto isso o oposto ocorre a 15°, como mostrado na figura 10(c), onde as linhas de fluxo atravessam as barreiras do rotor na tentativa de fechar o caminho, resultando assim no fluxo mínimo da Bobina A.

É possível ver na Figura 8 que o fluxo concatenado máximo na Bobina C ($\lambda_C = 0,0953$ Wb) sob influência da corrente I_a acontece quando o rotor atinge 30° de revolução. Isso porque as camadas do rotor oferecem um caminho entre as bobinas A e C, enquanto o eixo de quadratura do rotor está alinhada com a bobina B. Isso pode ser observado na figura 11(a).

Figura 9 - Fluxo nas bobinas A e C

(a) Fluxo a $\theta = 75^\circ$ (b) Fluxo a $\theta = 80^\circ$ 

Fonte: O Autor

Quando o fluxo concatenado deveria ser o mínimo, em $\theta = 75^\circ$ (Figura.11.b), é possível ver um comportamento peculiar. Há uma distorção no fluxo concatenado que faz com que o mínimo seja deslocado para as posições de 70° e 80° . A Tabela 2) mostra os valores dos fluxos concatenados da Figura 8 para algumas posições selecionadas. Essa distorção no fluxo concatenado na Bobina C em $\theta = 75^\circ$ ocorre pois a camada mais externa do rotor agrupa dois lados de bobina A e dois lados de bobina $-C$ centrais⁴. Além disso, a segunda camada do rotor permite um caminho direto entre os lados de bobina A e $-C$ mais externas, favorecendo o fluxo entre as bobinas (Figura 9a). Por outro lado, quando o rotor está nos ângulos de 70° e 80° , respectivamente, a camada mais externa do rotor agrupa três lados de bobina: duas da A e uma da C a 70° , e uma da A e duas da C a 80° (Figura 9b). Dessa forma, é possível inferir que, nesses ângulos, a distribuição de fluxo de A para C não é uniforme.

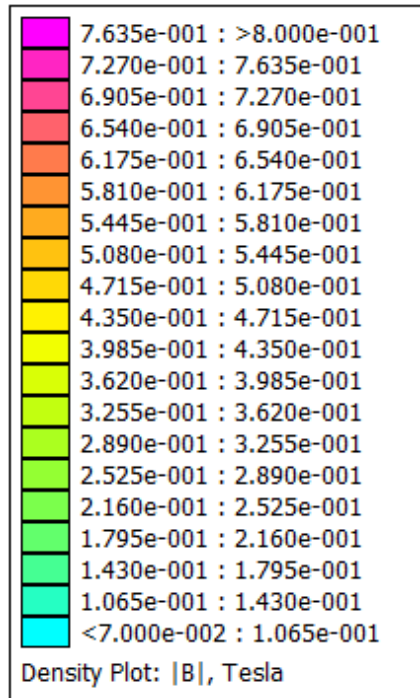
2.5 Conclusões parciais

Neste capítulo foi descrita a máquina que vai ser alvo desse estudo e a motivação

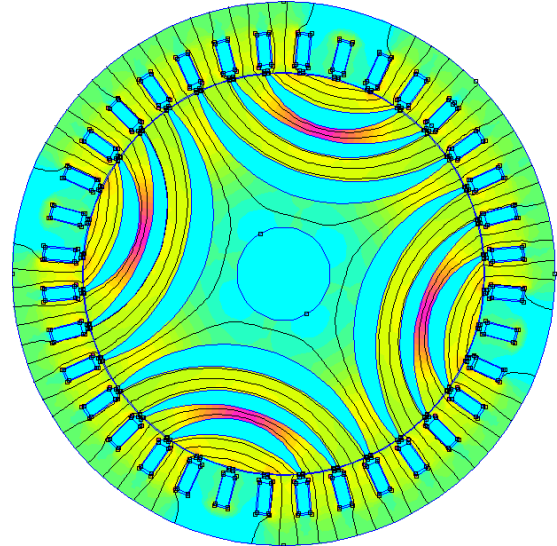
⁴ Lembrando que cada polo possui 3 bobinas e cada bobina 2 lados, um por onde a corrente sobe e outro por onde ela desce.

Figura 10 - Fluxo Concatenado no ferro do rotor

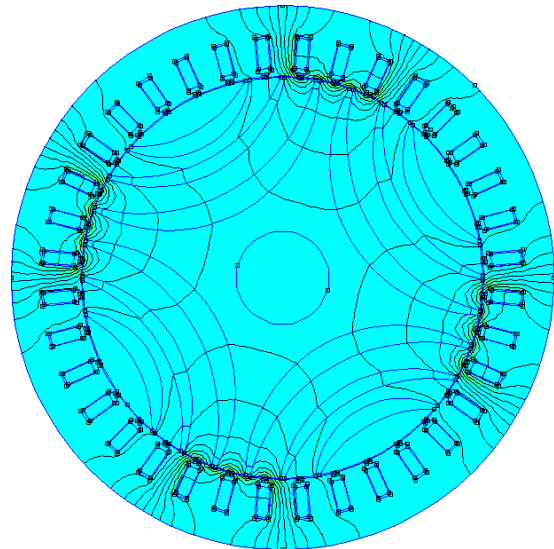
(a) Densidade de campo



(b) Fluxo Concatenado Máximo (60°)



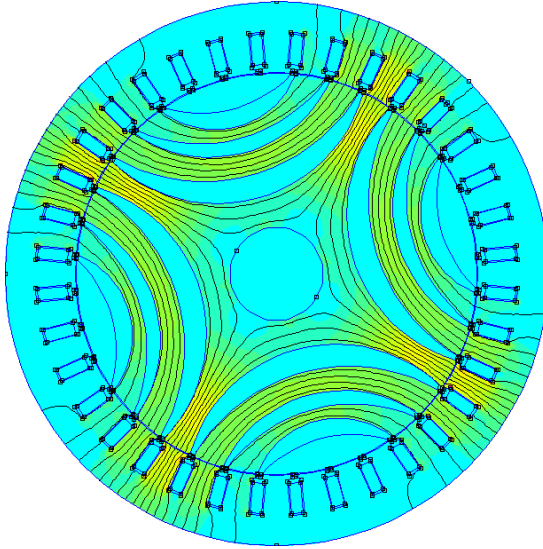
(c) Fluxo Concatenado Mínimo (15°)



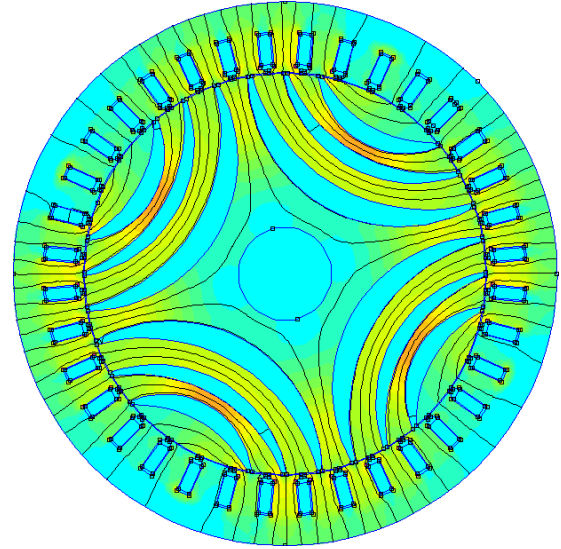
Fonte: O Autor

Figura 11 - Caminhos de Fluxo de A para C

(a) Fluxo máximo de C por I_a (30°)



(b) Fluxo mínimo de C por I_a (75°)



Fonte: O Autor

Tabela 2 - Valores de Fluxo no Ferro

Posição(Graus)	Fluxo Concatenado A	Fluxo Concatenado B	Fluxo Concatenado C
0	0,1137	0,095	-0,146
15	0,0325	-0,00205	-0,0021
30	0,114	-0,146	0,0953
45	0,255	-0,217	-0,002
60	0,359	-0,146	-0,146
70	0,312	-0,0495	-0,224
75	0,256	-0,002	-0,217
80	0,216	0,0454	-0,224

Fonte: O Autor

por trás da escolha dessa máquina e suas especificações. Se trata de uma máquina trifásica de 4 polos, com 36 bobinas (3 bobinas em série por polo por fase) e 12 voltas no enrolamento. Além disso, foi apresentado o software FEMM 4.2, que utiliza o método dos elementos finitos para simular as condições de operação da máquina. Também foi descrito a metodologia para desenhar o motor e alocar os blocos que o constitui, criando blocos com o material do estator, do rotor e do enrolamento das bobinas. Foi explicado a metodologia para a simulação da máquina. Utilizando a linguagem de programação Python 3 para efetuar múltiplas análises da máquina. Os scripts utilizados fizeram uso das bibliotecas femm e csv, tanto para abrir o programa, como para manipular os dados csv necessários para efetuar a simulação. Também foram efetuados os testes iniciais da geometria. Foram analisadas as curvas de fluxo concatenado nas três bobinas do estator em função da corrente I_A da bobina A. Foi visto que na figura 8 a curva dos fluxos apresenta um comportamento trifásico com os picos dos fluxos defasados de 30° , o que faz completo sentido com o que foi demonstrado na vista do rotor (Figura 7). Foi visto como a interação entre as camadas do rotor e as ranhuras do estator influenciam na curva de fluxos.

3 RESULTADOS

3.1 Levantamento dos vetores de campo magnético espaciais

Escrever um parágrafo dizendo o que será feito neste capítulo

É aquela discussão que tivemos: usar um semicírculo dentro do entreferro para calcular a distribuição de B. Levanta também o H. Coloquei dois exemplos de como devem ser estes resultados. O FEMM usa o comprimento como variável x. Na verdade, o eixo x é o ângulo. Nas figuras, temos o plot de 0 a 180 graus. Exporta os dados e plota no python que fica tudo certo. acho que é bom plotar o campo normal a meia lua. Foi definido um contorno no entreferro que começa em um eixo em quadratura passa pelo eixo direto e termina no outro eixo em quadratura, percorrendo o semicírculo superior do entreferro da máquina. Isso foi feito utilizando a ferramenta *Operation/Contours*, depois foi selecionado o contorno e escolhida a opção *(B · n) Normal Flux Density* na ferramenta *X-Y Plot of Field Values*.

Ferramentas que foram utilizadas para gerar as figuras 12 e 13.

3.2 Levantamento da Indutância

Agora, foi alterado o material do rotor da máquina, o Ferro criado foi substituído pelo aço M-36 que é semelhante ao criado anteriormente, tendo sua aproximação linear de permeabilidade magnética de 1616 nos eixos X e Y, mas adotaremos esse material levando em conta seu comportamento não linear na curva B-H. Que pode ser vista no gráfico 14:

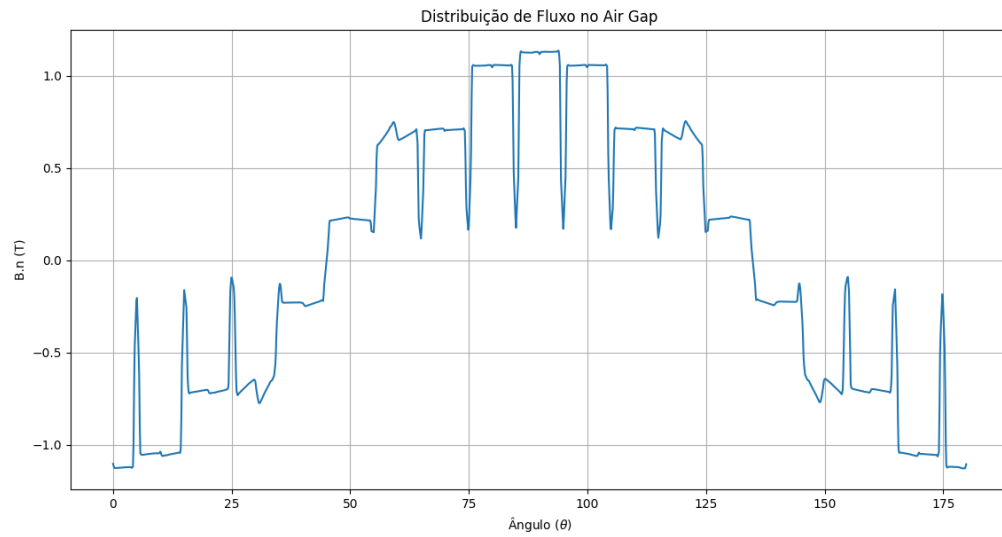
Aplicando a mesma corrente de 5 Amperes, pode ser visto o gráfico da figura 15:

Analizando o gráfico e os dados obtidos, é possível dizer que o comportamento foi muito próximo do material criado anteriormente, o que significa que os parâmetros do rotor estão de acordo com a curva de saturação, além disso, vale ressaltar que o resultado para L_d e L_q foram melhores. No ângulo para indutância no eixo direto (30°) o fluxo apresenta um valor de 0,38 Webers, já o valor de fluxo no eixo em quadratura (75°) é de 0,0325 Webers, resultado parecido com o anterior. Esses resultados nos dão um L_d - L_q de 0,0696 Henries e L_d/L_q de aproximadamente 11,7.

Foi criada uma lista de valores de corrente para calcular as curvas de indutância do rotor em questão, variando valores de 0,5A até 128A, ao passo de um valor sendo o dobro do anterior. As curvas de indutância podem ser vistas na figura 16, observe que a corrente de maior desempenho da máquina é de 8A.

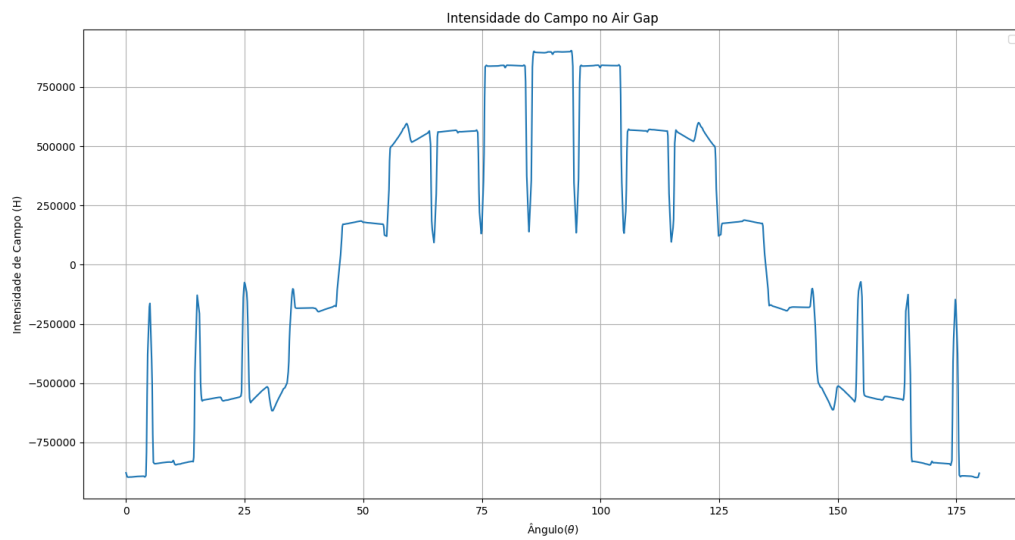
É possível observar uma saturação significativa na variação de 16A para 32A. Para a corrente de 8A, L_d - L_q é igual a 0,07 Henries, e L_d/L_q é igual a 11,73 o que revelou uma

Figura 12 - Curva de Fluxo no Air gap do Aço M-36



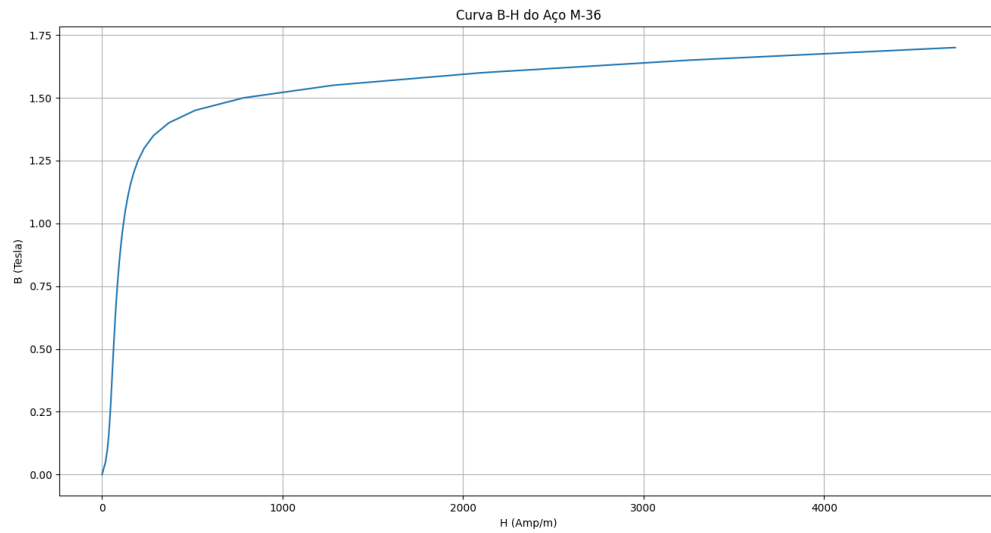
Fonte: O Autor

Figura 13 - Curva de Histerese no Air Gap do Aço M-36



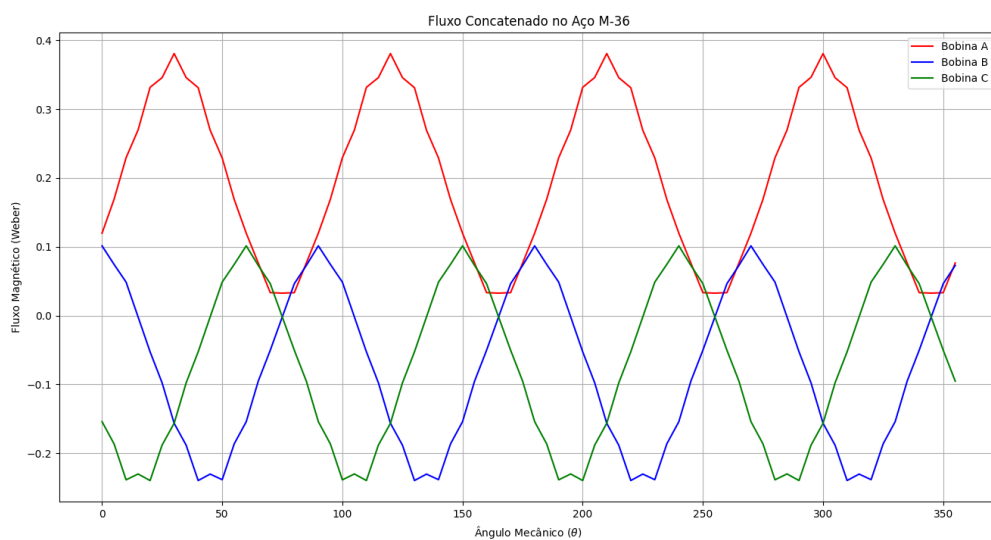
Fonte: O Autor

Figura 14 - Curva de Histerese do Aço M-36



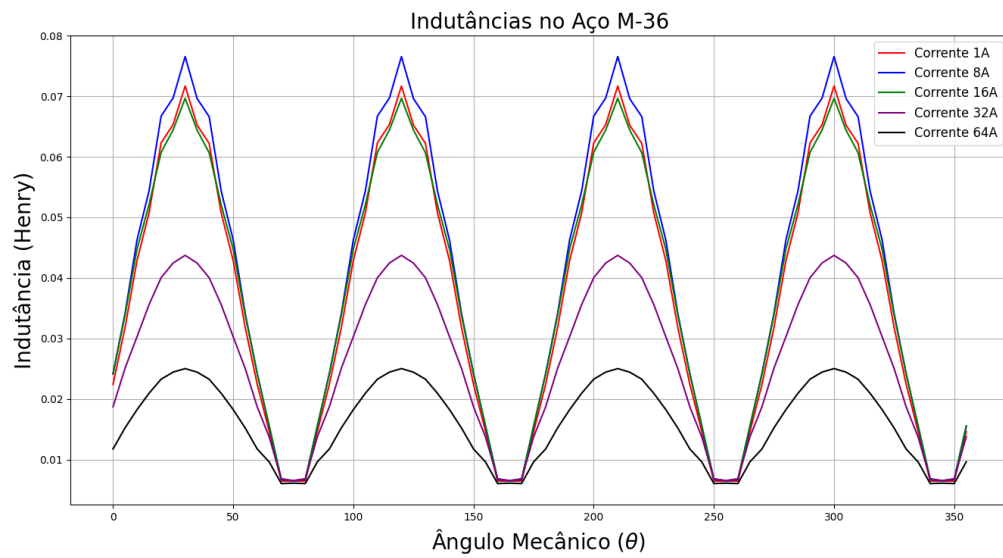
Fonte: O Autor

Figura 15 - Curvas de Fluxo Concatenado do Aço M-36



Fonte: O Autor

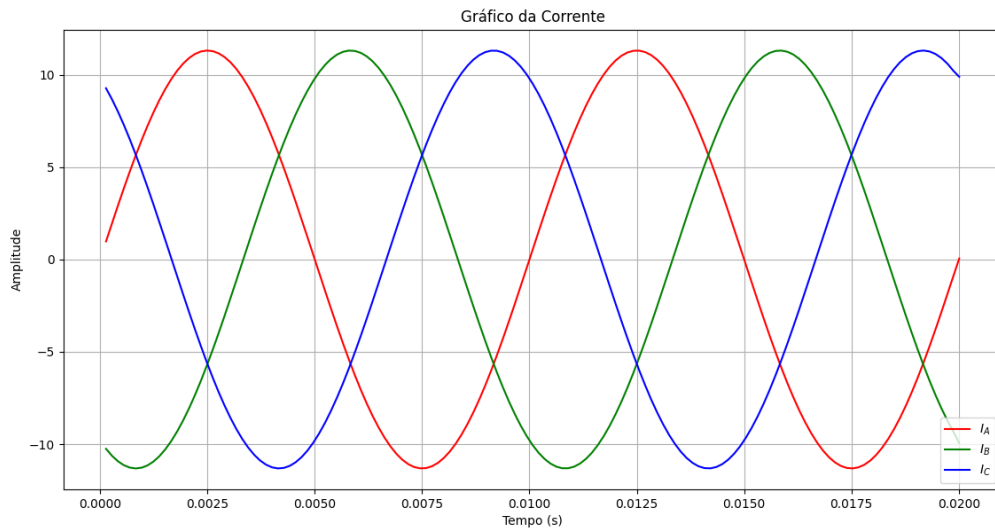
Figura 16 - Curva de Indutância do Aço M-36



Fonte: O Autor

melhoria de desempenho, mas não significativa.

Figura 17 - Dados utilizados para corrente da máquina



Fonte: O Autor

3.3 Levantamento do Torque

Como a corrente ótima é de 8A, iremos trabalhar com uma corrente senoidal com valor eficaz de mesmo valor. As correntes podem ser vistas no gráfico da figura 17:

O objetivo da simulação é representar um motor operando a uma frequência de 50 Hz. Contudo, caso essa frequência seja diretamente aplicada à corrente, o motor não funcionará conforme desejado devido ao seu número de polos. No caso, a corrente deve realizar duas revoluções a cada rotação do rotor. Portanto, é necessário estabelecer uma distinção entre os ângulos mecânicos e os ângulos elétricos.

Ao utilizar a rotação do rotor como referência, torna-se possível correlacionar os dados entre as revoluções completas. Por exemplo, quando o rotor atinge 180 graus, o valor associado da corrente também é equivalente a 180 graus, quando, na verdade, deveria ser associado a uma rotação completa de 360 graus. Isso permite uma representação precisa do comportamento do motor em relação aos ângulos elétricos, garantindo uma simulação mais fiel ao funcionamento real da máquina.

CONCLUSÃO

(UMANS, 2014)Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Excepteur sint occaecat cupidatat non proident, sunt in culpa qui officia deserunt mollit anim id est laborum.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Excepteur sint occaecat cupidatat non proident, sunt in culpa qui officia deserunt mollit anim id est laborum.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Excepteur sint occaecat cupidatat non proident, sunt in culpa qui officia deserunt mollit anim id est laborum.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Excepteur sint occaecat cupidatat non proident, sunt in culpa qui officia deserunt mollit anim id est laborum.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Excepteur sint occaecat cupidatat non proident, sunt in culpa qui officia deserunt mollit anim id est laborum.

REFERÊNCIAS

- ABRAMENKO, V. et al. Synchronous reluctance motors with an axially laminated anisotropic rotor as an alternative in high-speed applications. *IEEE Access*, v. 8, p. 29149–29158, 2020.
- BÁRTA, J.; ONDRŮŠEK, Č. Design and optimization of synchronous reluctance machine. p. 60–64, 2014.
- BOGLIETTI, A.; PASTORELLI, M. Induction and synchronous reluctance motors comparison. p. 2041–2044, 2008.
- CARMO, V. Pereira do; COELHO, F. C. R.; ÊVO, M. T. A. Determinação das capacitâncias parasitas do motor de indução utilizando o método dos elementos finitos. p. 1117–1124, 2023.
- CATÁLOGO Motor Síncrono de Relutância (SynRM) Eficiência super premium para a indústria. [S.l.], 2024.
- CHALMERS, B.; MUSABA, L. Design and field-weakening performance of a synchronous reluctance motor with axially-laminated rotor. In: *IAS '97. Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting*. [S.l.: s.n.], 1997. v. 1, p. 271–278 vol.1.
- FREITAS, C. M. *Simulações de Circuitos Magnéticos Utilizando o Software FEMM*. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://github.com/cleitoncmf/CEME-I-UERJ/tree/master/FEMM>.
- FREITAS, C. M. *Determinação de Indutâncias em Máquinas Rotativas*. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://github.com/cleitoncmf/CEME-I-UERJ/tree/master/Lab4>.
- FUKAMI, T. et al. Steady-state analysis of a dual-winding reluctance generator with a multiple-barrier rotor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 23, n. 2, p. 492–498, 2008.
- GSTARCAD 2024 - User Guide. [S.l.], 2024. <https://cdn-sg-gw.gstarcad.net/gstarsoft.pdf/GstarCAD-2024-User-Guide.pdf>. Acessado em 11 de junho de 2024.
- IERUSALIMSKY, R.; FIGUEIREDO, L. H. de; CELES, W. *Reference Manual for lua version 4.0*. [S.l.], 2000. Disponível em <https://www.lua.org/ftp/refman-4.0.pdf>. Acessado em 11 de Junho de 2024.
- KOSTKO, J. K. Polyphase reaction synchronous motors. *Journal of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 42, n. 11, p. 1162–1168, 1923.
- KRAUSE, P. *Analysis of electric machinery and drive systems Third Edition*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013.
- LIM, H. B. et al. Rotor design functional standard of synchronous reluctance motor according to torque/volume using fem & sumt. v. 1, p. 805–809, 2007.

MEEKER, D. C. *Finite Element Method Magnetics, Version 4.2 (21Apr2019 Build)*. 2019. Disponível em <https://www.femm.info>. Acessado em 11 de junho de 2024.

MEEKER, D. C. *Finite Element Method Magnetics - Version 4.2 - User Manual*. [S.l.], 2020. Disponível <https://www.femm.info/wiki/Files/files.xml?action=download&file=manual.pdf>. Acessado em 11 de junho de 2024.

MOGHADDAM, R. R. Theoretical and experimental reevaluation of synchronous reluctance machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 57, n. 1, p. 6–13, 2010.

MOGHADDAM, R. R.; MAGNUSSEN, F.; SADARANGANI, C. Theoretical and experimental reevaluation of synchronous reluctance machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 57, n. 1, p. 6–13, 2010.

MURATALIYEV, M. et al. Synchronous reluctance machines: A comprehensive review and technology comparison. *Proceedings of the IEEE*, v. 110, n. 3, p. 382–399, 2022.

ROSSUM, G. V.; DRAKE, F. L. *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009. ISBN 1441412697.

TECHNICAL data Selection data, synchronous-reluctance drive system with IE4 SIMOTICS Synchronous Reluctance Motors (VSD4000 line) and SINAMICS G120 for 50 Hz and 400 V line voltage. [S.l.], 2022.

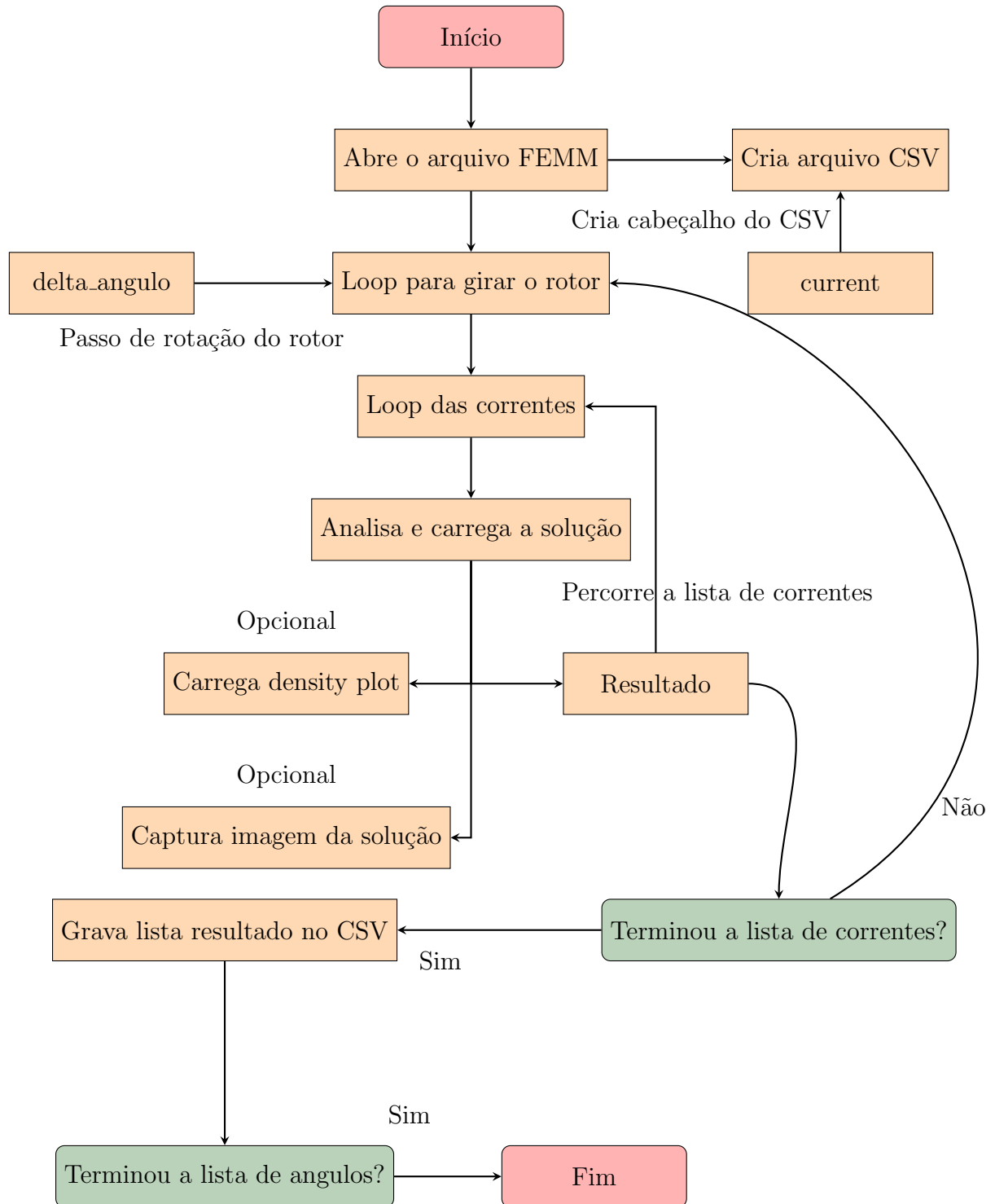
UMANS, S. D. Máquinas elétricas de fitzgerald e kingsley. v. 7, 2014.

GLOSSÁRIO

termo 1	significado
termo 2	significado
termo 3	significado

APÊNDICE A – Primeiro apêndice

A.1 Lógica do levantamento da curva de indutâncias



Texto da primeira seção.

A.1.1 Primeira subseção

Texto da primeira subseção.

A.1.1.1 Primeira subsubseção

Texto da primeira subsubseção.

APÊNDICE B – Segundo apêndice

B.1 Primeira seção

Texto da primeira seção.

B.1.1 Primeira subseção

Texto da primeira subseção.

B.1.1.1 Primeira subsubseção

Texto da primeira subsubseção.

ANEXO A – Primeiro anexo

Modelo de trabalho acadêmico utilizando classe repUERJ para elaboração de teses, dissertação e monografias em geral (projetos finais e trabalhos de conclusão de curso).

Este modelo foi criado por Dr. Luís Fernando de Oliveira, Professor Adjunto do Departamento de Física Aplicada e Termodinâmica, Instituto de Física Armando Dias Tavares da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

A classe repUERJ.cls foi criada a partir do código original disponibilizado pelo grupo CódigoLivre.Org (equipe coordenada por Gerald Weber). Foram feitas adequações para implementação das normas de elaboração de teses e dissertações da UERJ.

Os estilos repUERJformat.sty codificam os elementos pré-textuais e pós-textuais.

O estilo repUERJpseudocode.sty codifica a elaboração de algoritmos utilizando um glossário desenvolvido por mim (Luís Fernando), o mesmo usado em meu curso de Física Computacional.

Este arquivo está editado na codificação de caracteres UTF-8.

As referências estão baseadas no modelo bibtex e citação em autor-data.

Todo este material está disponível também no meu site (<http://sites.google.com/site/deoliveiralf>).

As normas da UERJ para elaboração de teses e dissertações pode ser obtidas no documento disponível no site (http://www.bdtd.uerj.br/roteiro_uerj_web.pdf).

Agradecimentos ao NPROTEC/Rede Sirius/UERJ e à Biblioteca Setorial da Física.

ANEXO B – Segundo anexo

B.1 Primeira seção

Texto da primeira seção.

B.1.1 Primeira subseção

Texto da primeira subseção.

B.1.1.1 Primeira subsubseção

Texto da primeira subsubseção.

ÍNDICE DE ASSUNTOS

Introdução
Capítulo, 47