

**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Goiás - IFG**

Câmpus Itumbiara

Bacharelado em Engenharia Elétrica



**Análise de projeto, acionamento e
desempenho dinâmico do Motor Síncrono de
Relutância através de simulação
computacional**

Paulo Henrique Alves da Silva e Silva

Itumbiara - GO

2021



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Paulo Henrique Alves da Silva e Silva

Matrícula: 20161040070201

Título do Trabalho: Análise de projeto, acionamento e desempenho dinâmico do Motor Síncrono de Relutância através de simulação computacional.

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO
Local

02/03/2021
Data

Paulo Henrique Alves da Silva e Silva

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Paulo Henrique Alves da Silva e Silva

Análise de projeto, acionamento e desempenho
dinâmico do Motor Síncrono de Relutância através de
simulação computacional

Trabalho de conclusão de curso apresentada
ao Curso de Bacharelado em Engenharia Elé-
trica do Instituto Federal de Goiás, Câmpus
Itumbiara, como requisito parcial para a ob-
tenção do título de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

Orientador: Dr. Josemar Alves dos
Santos Junior

Coorientador: Dr. Marcos Antônio Arantes
de Freitas

Itumbiara - GO
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S586a Silva, Paulo Henrique Alves da Silva e
Análise de projeto, acionamento e desempenho dinâmico do
Motor Síncrono de Relutância através de simulação
computacional. / Paulo Henrique Alves da Silva e Silva. --
Itumbiara, 2021.
84 f. : il. color.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia
Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2021.
Orientador: Prof. Dr. Josemar Alves dos Santos Júnior.
Coorientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Arantes de
Freitas.

1. Motores elétricos. 2. Motores síncronos. 3. Simulação
(Computadores).

I. Título. II. Santos Júnior, Josemar Alves dos. III.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 621.3



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA

TERMO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Análise de projeto, acionamento e desempenho dinâmico do Motor Síncrono de Relutância através de simulação computacional.

AUTOR: Paulo Henrique Alves da Silva e Silva.

ORIENTADOR: Josemar Alves dos Santos Júnior.

Aprovado como parte das exigências para obtenção do diploma de Engenheiro Eletricista, do Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

Itumbiara, 08 de fevereiro de 2021.

Josemar Alves dos Santos Júnior

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

Ghunter Paulo Viajante

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

Marcos Antônio Arantes de Freitas

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

Documento assinado eletronicamente por:

- Ghunter Paulo Viajante, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 15/02/2021 14:34:55.
- Josemar Alves dos Santos Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 09/02/2021 08:22:59.
- Marcos Antonio Arantes de Freitas, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/02/2021 19:17:47.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 08/02/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 129487

Código de Autenticação: 38a62abb9a



Avenida Furnas, nº 55, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5612 (ramal: 5612)

Este trabalho é dedicado aos meus pais.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus pela vida, saúde, força em lutar todos os dias a fim de realizar os propósitos preparados por ele para mim.

Aos meus pais Gilvan Henrique Alves da Silva e Tereza Alves da Silva e Silva pelo amor, cuidado, orações, perseverança, apoio nos projetos da vida e tornaram meus objetivos os seus objetivos. Ao meu irmão Geremias Pereira Neto e minha Irmã Clícia Alves Biberg pelo apoio e carinho a mim concedido.

Aos colegas da república Arco-Voltaico.

Aos professores Selma Zago da Silva Borges, Ghunter Paulo Viajante e Roberlam Gonsálves pela amizade e suporte durante minha trajetória acadêmica.

Ao professor Marcos Antônio Arantes de Freitas pela amizade, sabedoria, paciência, investimento em materiais didáticos, orientação e dedicação em direcionar minha trajetória acadêmica.

Ao professor Josemar Alves dos Santos Junior pela amizade, sinceridade, compreensão, investimento em equipamentos eletrônicos e incentivo ao progresso.

Ao amigo Leonardo Marques pelo suporte e ajuda em Latex.

Aos grupos de pesquisa do Instituto Federal de Goiás campus Itumbiara e ao setor do almoxarifado pela contribuição na realização deste curso.

Ao CNPq pela oportunidade de realizar, por três anos consecutivos, projetos de pesquisa e tecnologia como bolsista.

Aos envolvidos resta-me agradecer por todo esforço e dedicação para conclusão desta etapa importante da minha vida.

“Melhor é o fim das coisas do que o princípio
delas; melhor é o paciente de espírito do que
o ativo de espírito.”
(Eclesiastes 7:8)

Resumo

Silva, P. **Análise de projeto, acionamento e desempenho dinâmico do Motor Síncrono de Relutância através de simulação computacional**. 84 p. Trabalho de conclusão de curso – Câmpus Itumbiara, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG, 2021.

Este trabalho aborda o Motor Síncrono de Relutância sob os aspectos construtivos, operacionais e de funcionamento por meio de simulação computacional. Os primeiros modelos deste motor foram projetados no início do século XX. A popularização do SynRM tornou-se possível devido ao avanço das técnicas construtivas, operação em materiais ferromagnéticos e de sistemas microprocessados de alto desempenho. Com base nisso, o presente trabalho aborda o SynRM sob as características de projeto e desempenho dinâmico testes e ensaios em ambiente computacional.

Dessa forma, um estudo em elementos finitos é realizado, levando em consideração diferentes gerações de rotores do SynRM que permite definir a melhor geometria de rotor conforme a distribuição de fluxo magnético. Além disso, o modelo elétrico e mecânicos são implementados em ambiente computacional e cenários de aplicações reais como acionamento em rampa de velocidade e degrau de carga são implementados no ambiente de simulação.

A simulação computacional do motor permite estudá-lo sob diferentes pontos de aplicação e operação que validam comparações de desempenho entre modelos de geometrias do SynRM e em relação a outros motores presentes no mercado. Os resultados obtidos são apresentados e o desempenho dinâmico do motor é avaliado através da resposta a variação da velocidade, inserção ou retirada de carga no eixo.

Palavras-chave: Desempenho dinâmico. Densidade de conjugado. Motor Síncrono de Relutância.

Abstract

Silva, P. **Academic work template**. 84 p. Completion of course work – Federal Institute of Goiás, 2021.

This work addresses the Synchronous Reluctance Motor from the constructive, operational and operational aspects through computational simulation. The first models of this engine were designed in the early 20th century. The popularization of SynRM became possible due to the advancement of construction techniques, operation in ferromagnetic materials and high performance microprocessed systems. Based on this, the present work approaches SynRM under the characteristics of design and dynamic performance tests and tests in computational environment.

Thus, a finite element study is carried out, taking into account different generations of SynRM rotors that allow defining the best rotor geometry according to the magnetic flux distribution. In addition, the electrical and mechanical models are implemented in a computational environment and real application scenarios such as speed ramp and load step driving are implemented in the simulation environment.

Computer simulation of the engine allows it to be studied under different points of application and operation that validate performance comparisons between SynRM geometry models and in relation to other engines on the market. The results obtained are presented and the dynamic performance of the engine is evaluated through the response to speed variation, insertion or removal of load on the shaft.

Keywords: Conjugate density. Computer simulation. Synchronous Reluctance Engine.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fluxo magnético em material anisotrópico.	34
Figura 2 – Representação dos modelos de rotores gaiola de esquilo com corte na superfície. Fonte : (SANTOS JR, 2018).	35
Figura 3 – Modelos de rotores do SynRM. Fonte : Autor.	37
Figura 4 – Conjugado por ângulo de carga. Fonte : Autor.	38
Figura 5 – Fator de saliência máximo por taxa de saliência. Fonte : Autor.	39
Figura 6 – Indutância por posição do rotor. Fonte : Autor.	40
Figura 7 – Inversor trifásico de três braços. Fonte : Autor.	41
Figura 8 – Distribuição das correntes nos enrolamentos. Fonte : Autor.	42
Figura 9 – Representação vetorial do transformada de Park. Fonte : Adaptado de (PYRHONEN; HRABOVCOVA; SEMKEN, 2016).	44
Figura 10 – Estrutura de simulação. Fonte : Autor.	50
Figura 11 – Representação dos modelos de rotores do SynRM em elementos finitos. Fonte : Autor.	51
Figura 12 – Estrutura de simulação. Fonte : Adaptado de (SCALCON; PADILHA, 2019).	52
Figura 13 – Esquema de simulação computacional para as correntes de eixo direto e quadratura. Fonte : Autor.	54
Figura 14 – Esquema de simulação computacional para a malha de velocidade e corrente controlada do motor. Fonte : Autor.	54
Figura 15 – Comando do controlador de velocidade e conjugado. Fonte : Autor.	55
Figura 16 – Resultado de simulação computacional para rampa de velocidade (0 rpm a 1800 rpm). Fonte: Autor.	56
Figura 17 – Corrente trifásica do estator para partida em rampa. Fonte: Autor.	57
Figura 18 – Resultado de simulação computacional para rampa de aceleração (no instante de 1 segundo) e desaceleração (no instante de 3 segundos) da velocidade de 1800 rpm para 200 rpm. Fonte: Autor.	58

Figura 19 – Corrente trifásica do estator para partida suave e frenagem do motor de 1800 rpm para 200 rpm. Fonte: Autor.	58
Figura 20 – Resultado de simulação computacional para inversão do sentido de rotação de 1800 rpm para -200 rpm. Fonte: Autor.	59
Figura 21 – Corrente trifásica do estator para inversão do sentido de rotação de 1800 rpm para -200 rpm. Fonte: Autor.	59
Figura 22 – Resultado de simulação computacional para degrau de carga de 0 N.m para 10 N.m. Fonte: Autor.	60
Figura 23 – Corrente trifásica do estator para degrau de carga de 0 N.m a 10 N.m. Fonte: Autor.	60
Figura 24 – Resultado de simulação computacional para degrau de carga de 0 N.m a -10 N.m. Fonte: Autor.	61
Figura 25 – Corrente trifásica do estator para degrau de carga de 0 N.m a -10 N.m. Fonte: Autor.	61
Figura 26 – Curva BxH	77

Lista de tabelas

Tabela 1 – Consumo de energia por classe do Brasil no ano de 2020. Fonte: (ENERGÉTICA, 2020)	25
Tabela 2 – Comparativo entre SynRM e IM.	34
Tabela 3 – Parâmetros do SynRM.	50
Tabela 4 – Valores dos Parâmetros dos modelos de rotores.	53
Tabela 5 – Curva BxH para frequência de 60 Hz.	78

Lista de abreviaturas e siglas

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DSP	Dispositivo Processador de Sinal - (<i>Digital Signal Processor</i>)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FEM	Força Eletromotriz
IM	Motor de Indução - <i>Induction Motor</i>
MSR	Maquina Síncrona de Relutância
PI	Proporcional-Integral
PWM	Modulação por Largura de Pulso - <i>Pulse Width Modulation</i>
Pma-SynRM	Motor Síncrono de Relutância Auxiliado por Ímãs - <i>Permanent Magnet assisted Synchronous Reluctance Motor</i>
SRM	Motor de Relutância Variável - <i>Switch Reluctance Motor</i>
SynRM	Motor Síncrono de Relutância - <i>Synchronous Reluctance Motor</i>

Lista de símbolos

i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	Correntes trifásicas do estator
V_{as}, V_{bs}, V_{cs}	Tensões trifásicas do estator
R_s	Resistência do estator
L_s	Indutância do estator
M_{ab}, M_{ac}, M_{bc}	Indutância mútua entre os enrolamentos do estator das fases ab, ac e bc
$\Psi i_{a,b,c}$	Fluxo das fases do estator
T_{em}	Torque eletromagnético
T_m	Torque mecânico
T_L	Torque de carga
n_p	Número de polos
$L_{d,q}$	Indutâncias de eixo d e q
$i_{d,q}$	Correntes de eixo d e q
$i_{dref,qref}$	Correntes de eixo d e q de referência
$v_{d,q}$	tensões de eixo d e q
w_e	Velocidade angular elétrica
w_{ref}	Velocidade angular de referência
w_r	Velocidade angular do rotor
B	Coefficiente de atrito viscoso

J	Coeficiente de inércia do motor
θ_e	Posição angular elétrica
K_{im}	Ganhos integrais de malha
K_{pm}	Ganhos proporcionais de malha
K_{imec}	Ganhos integrais mecânicos
K_{pmec}	Ganhos proporcionais mecânicos
G_{cm}	Função de transferência
G_{cmf}	Ganho do controlador em malha fechada
ξ_3	Coeficiente de amortecimento
W_{mec}	Frequência angular da malha mecânica
δ_s	Ângulo de carga

Sumário

1	Introdução	25
1.1	Visão geral	25
1.2	Revisão bibliográfica	26
1.2.1	Motores de relutância	26
1.2.2	Motor de Relutância Variável	27
1.2.3	Motores Síncronos de Relutância	28
1.2.4	Motores Síncronos Auxiliados por Ímãs Permanentes	29
1.2.5	Motores de Indução	30
1.3	Objetivos	30
1.3.1	Objetivos específicos	30
1.4	Justificativa	31
1.5	Organização do trabalho	31
2	Motor Síncrono de Relutância	33
2.1	Introdução	33
2.2	Conceito de Relutância	33
2.3	Aspectos construtivos	34
2.4	Modelos de rotores	35
2.4.1	Rotor gaiola de esquilo	35
2.4.2	Rotores do SynRM	36
2.5	Relação conjugado por ângulo de carga	37
2.6	Fator de potência máximo e taxa de saliência	39

2.7	Perfil das indutâncias	40
2.8	Acionamento do Motor Síncrono de Relutância	40
2.9	Representação matemática do modelo elétrico e mecânico	41
2.9.1	Sistema de coordenadas abc	41
2.9.2	Transformada de Park	43
2.9.3	Sistema de coordenadas direto e quadratura (d-q)	44
2.9.3.1	Tensão do estator	45
2.9.3.2	Correntes do estator	45
2.9.3.3	Conjugado eletromagnético	45
2.9.4	Modelo mecânico	46
2.10	Projeto do controlador para o Motor Síncrono de Relutância	46
2.10.1	Projeto do controlador para malha de velocidade via <i>Indirect Field Oriented Control</i> -IFOC	47
3	Simulação computacional e análise dos resultados obtidos	49
3.1	Metodologia e representação do SynRM em elementos finitos	49
3.2	Estrutura de simulação do modelo elétrico e mecânico	52
3.2.1	Resposta à variação de velocidade	56
3.2.1.1	Rampa de Velocidade de 0 rpm para 1800 rpm	56
3.2.1.2	Rampa de Velocidade de 1800 para 200 rpm	57
3.2.1.3	Inversão do sentido de rotação: 1800 para -200 rpm	57
3.2.2	Resposta ao degrau de carga	59
3.2.2.1	Degrau de Conjugado de 0 N.m para 10 N.m	60
3.2.2.2	Degrau de Conjugado de 0 N.m para -10 N.m	61
4	Conclusão	63
4.1	Sugestão de trabalhos futuros	64
	Referências	65

Apêndices	71
APÊNDICE A Artigos publicados	73
 Anexos	 75
ANEXO A Características do Aço-Silício.	77
A.0.1 Valores de referência da curva BXH	77
A.0.2 Rotina computacional para simulação em elementos finitos.	78

Introdução

1.1 Visão geral

O aumento do consumo de energia do Sistema Elétrico de Potência (SEP) incentiva a diversificação da matriz energética brasileira através do incremento de fontes renováveis de energia como usinas eólicas e fotovoltaicas (MALTA et al., 2020), (BERNARDO et al., 2020). Nesse cenário, os consumidores industriais exigem maiores níveis de potências para atividades de manufaturas seguidos, em menor proporção, de consumidores do setor residencial, comercial e outros. A Tabela 1 apresenta o nível de consumo por classe dos consumidores no Brasil para o ano de 2020.

Tabela 1: Consumo de energia por classe do Brasil no ano de 2020. Fonte: (ENERGÉTICA, 2020)

Setor	Consumo (GWh)	%
Industrial	167,81	34,80
Residencial	142,73	29,60
Comercial	92,58	19,10
Outros	79,56	16,50

Dentro da parcela de consumo destacam-se as cargas que possuem como princípio de funcionamento a Força Eletromotriz (FEM). Cerca de 85% das cargas da indústria são máquinas elétricas rotativas (GERADA et al., 2013). Neste cenário, os motores de indução dominam as aplicações no setor industrial devido a robustez e disponibilidade no mercado. No entanto, o comprometimento do desempenho deste motor ao operar em altas velocidades e a complexidade do controle de velocidade possibilitou ascensão de modelos alternativos como os motores de relutância, capazes de atender as necessidades industriais com elevado rendimento e densidade de conjugado a baixo custo de construção e operação (BETZ et al., 1992).

A consolidação e avanço dos motores de relutância foi mediada pelo progresso das tecnologias embarcadas e microprocessadas de alto desempenho como processador digital de sinal (do inglês *Digital Signal Processor*-DSP) e inversores de frequência, capazes de ampliar a capacidades de operação destes através das técnicas de acionamento e controle (TOLBERT; PENG; HABETLER, 1999).

As principais aplicações são encontrados em sistemas de tração (veículos elétricos de mobilidade reduzida), indústria têxtil, içamento de cargas, sistemas de bombeamento e ventilação industrial (CAVALEIRO, 2015), (SILVA JR, 2018).

1.2 Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica tem objetivo de apresentar uma abordagem das principais obras sobre motores de relutância e motor de indução, considerando a classificação destes por grupos, características de projeto e operação a fim de comparar o desempenho e princípio de funcionamento.

1.2.1 Motores de relutância

Os motores de relutância são caracterizados pelo alinhamento magnético entre rotor e alimentação do estator. Estes motores tiveram sua produção em larga escala a partir do início do século XX. A construção destes motores foi motivada pela necessidade de alcançar modelos de máquinas elétricas rotativas capazes de fornecer níveis elevados de conjugado com possibilidade de operar em velocidades variáveis (MATSUO; LIPO, 1994), (PYRHONEN; HRABOVCOVA; SEMKEN, 2016). A classificação dos Motores de Relutância é realizada a partir do tipo da característica da fonte de energia fornecida aos enrolamentos do estator, contínua ou alternada (BONNETT; ALBERS, 2000).

Os Motores de Relutância Síncronos e os Auxiliados por Ímãs necessitam de fonte de energia alternada trifásica, enquanto os Motores de Relutância Variável (do inglês *Switched Reluctance Motor*-SRM) realizam magnetização dos enrolamentos elétricos por meio de fonte contínua de energia (PYRHONEN; HRABOVCOVA; SEMKEN, 2016), (ARAFAT, 2018). O SRM possui as seguintes características construtivas:

- Ausência de fontes de excitação no rotor;
- Elementos de conversão CA/CC para enrolamentos do estator;
- Rotor e estator com polos salientes.

Os motores de corrente alternada, PMa-SynRM e SynRM, possuem as seguintes características construtivas.

- Estator e rotor lisos;
- Rotor laminado;
- Ranhuras presentes na geometria das lâminas do rotor;
- Ausência de fontes de excitação no rotor.

Os modelos PMa-SynRMs possuem ímãs permanentes inseridos nas ranhuras do rotor, tornando-os capazes de fornecer níveis de potência por área maiores que os modelos dos SynRMs (FRATTA; VAGATI, 1992). O interesse em máquinas de alto rendimento e o avanço das tecnologias de tratamento de terras raras como Neodímio-Ferro-Boro (NeFeB) e Samário Cobalto (SmCo) tornou os sistemas de excitação no rotor, gradualmente, obsoletos devido o incremento de materiais magnéticos em motores elétricos (GABBI; VIEIRA, 2015).

Essas máquinas apresentam elevada densidade de potência e podem ofertar níveis satisfatórios de conjugado em diferentes faixas de velocidade através de estruturas físicas de motores menores. Embora a implementação das técnicas de controle possuam elevada complexidade, a utilização de controles de velocidade podem agregar distintas aplicações ao motor. As técnicas de controle podem ocorrer por meio de sensores mecânicos ou estratégias de estimação de velocidade (SCALCON; PADILHA, 2019).

A utilização de sensores mecânicos (*encoder*) diminuem a robustez do sistema completo, tornando-os suscetíveis as falhas e aumentam o valor de investimento do sistema completo do motor. Os modelos de motores com tecnologia *sensorless*, por sua vez, tornam-se mais atrativos às aplicações industriais e sistemas de tração devido a redução dos custos, menor possibilidade de falhas mecânicas e grande capacidade de processamento dos sistemas embarcados ao controle do motor (CASTAGNINI et al., 2015).

1.2.2 Motor de Relutância Variável

As primeiras aplicações dos Motores de Relutância Variável são datados a partir da segunda metade do século XIX (BERNARDELI et al., 2008). Este motor possui elevada robustez devido a capacidades de operação em altas temperaturas e faltas de fase (LAWRENSON et al., 1980). Os SRMs possuem como característica dupla saliência (rotor e estator) e o comportamento do sinal de energização é pulsante. A construção exige que o número de pares de polos do estator sejam maiores que os do rotor e os principais modelos presentes em aplicações possuem as seguintes disposições: 6x4, 8x6 e 12x8 (LAWRENSON et al., 1980), (DIAS, 2012).

Os polos do rotor e estator do SRM são compostos por enrolamentos elétricos que são magnetizados conforme a posição do rotor em relação ao estator e esta técnica permite que ocorra o acionamento do motor com máximo rendimento.

A energização das fases da máquina ocorre por corrente contínua, chaveadas por dispositivos eletrônicos e conversores de potência. Junto a isso, sensores mecânicos *encoorder* acompanham-as devido a necessidade do monitoramento da posição do rotor em relação ao estator. Durante décadas, a aplicação deste motor foi suprimida devido indisponibilidade de dispositivos de potência para acionamento da máquina como chaves semicondutoras de alto desempenho.

A partir de 1960, a produção destes motores tornaram-se viáveis devido o avanço e progresso da eletrônica de potência em aplicações de chaveamento elétrico em alta frequência (BIANCHI; ANDRADE, 2015). O avanço de técnicas de controle e acionamento permitiram a ascensão gradual do SRM em sistemas de tração elétrica, devido aos níveis de conjugado fornecidos.

As aplicações destes motores são notadas em sistemas de tração, ventilação e aeroespaciais. A característica não-linear do SRM faz com que o incremento de técnicas de controle possuam extrema complexidade devido a mudança de parâmetros durante operação e representam grande desafio aos projetistas do motor quanto a oscilação de conjugado (SCALCON; PADILHA, 2019). Estes motores possuem ampla área de aplicação e mostram-se como alternativa aos IMs para atuações em velocidades variáveis ou sistemas de baixa fiabilidade como falta de fase.

1.2.3 Motores Síncronos de Relutância

Os Motores Síncronos de Relutância foram criados em 1923 (KOSTKO, 1923). Os primeiros modelos construtivos assemelhavam-se aos Motores de Indução (do inglês *Inductions Motors*-IMs), devido a possibilidade de partida do motor conectado a rede, sem a necessidade de conversores de potência. Os materiais destes motores assemelhavam-se aos IMs e a geometria dos rotores eram salientes com a presença de cortes nas extremidades do rotor. No entanto, o nível reduzido da taxa de saliência do motor tornava-o menos eficiente, comprometendo seu fator de potência e produção de conjugado (KOSTKO, 1923).

Em virtude disso, as características construtivas destes motores direcionaram-se a modelos com geometria de rotor lisa e com a presença de ranhuras ou cortes nas lâminas que compõem o rotor. A extinção de rotores salientes possibilitou melhores resultados de fator de potência e rendimento do motor e o aprimoramento do tratamento de materiais magnéticos contribuiu para o surgimento de técnicas construtivas de rotores laminados, tornando estes motores robustos e competitivos aos IMs (GERADA et al., 2013).

O SynRM apresenta-se como concorrente aos IMs devido a inexistência de escorregamento, níveis de temperatura e corrente menores para mesma potência, tamanho dos motores menores e técnicas de controle com menor grau de complexidade se comparado ao IM (HAATAJA, 2003). Ainda neste comparativo, os SynRMs apresentam melhor

rendimento e podem ser solução para aplicações com níveis de velocidades variáveis com conjugado constante (ALMEIDA; FERREIRA; BAOMING, 2013).

Os trabalhos atuais dedicados ao SynRM direcionam-se ao estudo de modelos de rotores e seu desempenho. KOSTKO (1923) direcionou seus estudos ao progresso e princípio de funcionamento do SynRM em relação a modelos de rotores com características aos motores de indução. MOGHADDAM (2007) analisa o efeito de desempenho a partir da mudança da geometria dos rotores. Nesse trabalho, são abordados os espaçamentos e quantidades de barreiras de fluxo e a distinção de diferentes gerações de rotores.

MUTEBA (2016), por sua vez, realiza um estudo baseado no método de elementos finitos a com objetivo de obter geometria dos rotores do SynRM com valores mínimos de oscilação de conjugado. SANTOS JR (2018) realiza um estudo direcionado ao projeto e construção do modelo transversalmente laminado com objetivo de obter desempenho dinâmico e produção de conjugado em malha aberta e com aplicação de controle de velocidade. SCALCON (2019), em sua dissertação, aborda o controle de velocidade do SynRM através do controle de campo orientado indireto e aplica o acionamento em malha fechada em bancada experimental. FELLANI (2010) realiza um estudo voltado a implementação computacional do SynRM aplicando controle *sensorless*.

1.2.4 Motores Síncronos Auxiliados por Ímãs Permanentes

O estudo de novas técnicas de construção de motores e manuseamento de materiais magnéticos tornou possível a produção de máquinas elétricas com tamanhos reduzidos e valores de potência elevados. Os Motores Síncronos Assistidos por Ímãs (PMA-SynRM) são modelos similares aos SynRM's com o incremento de terras raras no interior do rotor, a fim de elevar a razão entre as indutâncias de eixo direto e quadratura, que representam a dinâmica de operação do motor. Nos modelos de SynRMs as barras de Neodímio (NdFB) ou ferrite são inseridas nas ranhuras presentes nas geometrias do rotor. Estes materiais facilitam o direcionamento do fluxo para a sincronização entre rotor e campo magnético do estator, possibilitando níveis elevados de fator de potência se comparado ao SynRM (JEONG et al., 2012).

Os PMA-SynRM possuem boa produção de conjugado em larga faixa de velocidades que é possibilitada devido a diferença de relutância causado pela geometria do rotor e posição angular dos materiais magnéticos presentes no rotor. Uma das desvantagens envolvidas na produção deste motor são os custos dos materiais magnéticos que podem chegar a 65 % do valor total do projeto (PANCORBO et al., 2015). Além disso, esse motor possui elevado grau de complexidade quanto a posição e o tipo do material magnético no rotor utilizado.

A inserção destes materiais magnéticos podem ser híbridos ou não, havendo a

possibilidade de um ou mais tipos de materiais magnéticos presentes no interior do rotor. A complexidade envolvida quanto ao uso desses motores é desmagnetização dos materiais magnéticos em função do tempo e o incremento de técnicas de controle para o acionamento *sensorless*. Apesar disso, estes motores conferem características interessantes em aplicações veiculares, sobretudo em veículos de mobilidade reduzida como *scooters*, por apresentar elevada densidade de conjugado e capacidade de operação em elevadas temperaturas devido ausência de enrolamentos elétricos no rotor.

1.2.5 Motores de Indução

No cenário industrial as cargas são predominantemente motores elétricos. Dentro desta parcela, 85% são compostos por IMs (RANGEL-MAGDALENO et al., 2017). Os IMs possuem suas primeiras implementações a partir do Século XIX, este possui elevada robustez, projeto construtivo simples com baixos custos de operação. O IM possui as seguintes características construtivas:

- Rotor e estator lisos;
- Rotor curto-circuitado por barras de alumínio;
- Conexão direta com a fonte de energia da rede.

Os IMs possuem capacidade de operar em sobrecarga garantindo níveis de conjugados e fator de potência satisfatórios. No entanto, a velocidade de operação é abaixo do valor nominal a fim de garantir o assincronismo entre campo magnético do estator e campo gerado pela tensão induzida no rotor. Esses motores, possuem ampla abrangência de aplicações industriais como exaustores, sistemas de bombeamento e, em algumas aplicações, correção do fator de potência. Em aplicações, no entanto, que exigem variação de velocidade e conjugado constante tornam a inserção destes motores impraticáveis sem a presença de sistemas de controle. A aplicação de controles vetoriais elevam a complexidade da implementação deste motor em situações práticas devido as técnicas de controle e eletrônica de potência envolvida para acionamento.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma visão geral sobre o SynRM, considerando técnicas de projeto em relação a operação dinâmica. Através disso, relacionar seu desempenho e características de operação através de resultados de simulação computacional.

1.3.1 Objetivos específicos

Entre os objetivos específicos destacam-se os seguintes tópicos:

- Apresentar características de projeto do SynRM;
- Construção de uma estrutura de simulação computacional;
- Avaliar o desempenho do SynRM operando em velocidades variáveis e operação com grau de carga.

1.4 Justificativa

Os Motores Síncronos de Relutância tiveram seu uso intensificado graças ao desenvolvimento de tecnologias relacionadas a construção dos rotores e, sobretudo, devido à evolução da eletrônica de potência para o acionamento do SynRM. A evolução da eletrônica abriu caminho para a aplicação dos inversores de frequência, fundamental para aplicação em faixa de velocidade e operação de alto desempenho. A evolução da eletrônica de potência e dispositivos de processamento digital de sinais, proporcionou um crescente aumento na aplicação das técnicas de controle digitais em sistemas de acionamento de máquinas elétricas.

A utilização dos inversores de frequência justifica-se pela necessidade da partida suave do motor, visto que o mesmo opera em sincronismo com a frequência da rede e a única conexão existente entre rotor e estator é magnética. A aplicação de técnicas de controle aplicadas aos SynRMs permitem o acionamento e alto desempenho em aplicações com velocidades variáveis, possibilitando boa produção de conjugado em níveis elevados de velocidade. Em virtude disso, o modelo matemático e implementação computacional permitem avaliar o desempenho do motor e, comparativamente, avaliá-lo operando dinamicamente em condições de variação de velocidade e produção de conjugado.

1.5 Organização do trabalho

O trabalho está organizado como segue: No capítulo 2 o projeto do motor síncrono de relutância é apresentado, seguido do princípio de funcionamento e a influência do desempenho do motor em relação as características de projeto. Uma abordagem sobre as coordenadas de eixos dq é realizada a fim de dar suporte a modelagem matemática, estratégia de controle e simulação computacional; No capítulo 3 é apresentada a metodologia adotada para implementação da simulação em elementos finitos e do modelo matemático, seguido dos resultados obtidos via simulação, considerando diferentes cenários de aplicação; No capítulo 4, portanto, o trabalho é concluído, considerações são realizadas em relação aos resultados obtidos e propostas para trabalhos futuros são abordadas nesse capítulo.

Motor Síncrono de Relutância

2.1 Introdução

Os Motores de Relutância Síncrono representam o avanço das tecnologias de processamento de terras raras, ligas metálicas e técnicas de acionamento. Os primeiros modelos de SynRMs eram acionados através da conexão direta com a fonte de energia da rede (*Line-Start*) (KOSTKO, 1923), (GAMBA et al., 2013). Estes motores possuem baixa relutância relativa entre os eixos em quadratura do motor, característica que afeta o nível de fator de potência e produção de conjugado.

Os SynRMs atuais, necessitam de conversores CA para acionamento, a fim de garantir a partida suave do motor velocidade nominal de operação. A energização do motor conectado direto a rede não é possível, pois a conexão entre estator e rotor é puramente magnética, essa é obtida através de baixas frequências para conexão magnético entre campo eletromagnético do estator com áreas de baixa relutância do motor (KOSTKO, 1923), (BETZ et al., 1992), (GAMBA et al., 2013), (SANTOS JR, 2018).

2.2 Conceito de Relutância

O conceito de relutância no cenário dos motores de relutância referem-se a oposição a passagem do campo magnético (FITZGERALD et al., 2003). O desenvolvimento do projeto dos SynRMs baseiam-se na construção de áreas de baixa e alto armazenamento de energia. Em materiais de alta anisotropia o campo magnético oriundo do estator percorre caminho de menor resistência magnética e enlaça as barreiras de fluxo presentes no rotor (BETZ; JOVANOVIĆ, 2002). A Figura 1 apresenta a passagem de campo magnético em material anisotrópico.

O material do rotor possui elevada anisotropia e não altera o percurso do campo magnético, devido a boa permeabilidade magnética. Esses materiais fazem parte da classe de materiais compostos por Grãos-Magnéticos não orientados que permitem o

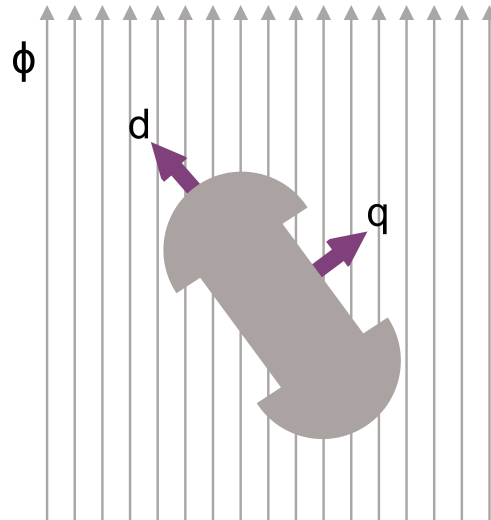


Figura 1: Fluxo magnético em material anisotrópico.

escoamento do fluxo pelo caminho de menor relutância (SPARGO; MECROW; WIDMER, 2014), (SANTOS JR, 2018).

2.3 Aspectos construtivos

Os primeiros modelos de SynRM são resultados de modificações realizadas em IMs. Inicialmente o rotor foi reprojetoado com cortes na superfície com número equivalente ao número de polos do motor, enquanto a estrutura do estator foi mantida (FERRARI et al., 2015). A construção destes motores de relutância tornaram-se possíveis devido as técnicas relacionadas ao manuseio e tratamento de materiais magnéticos não orientados. A estrutura do motor síncrono de relutância consiste, na parte estática, de três enrolamentos espacialmente defasados em 120° , rotor liso e laminado, processo obtido através do empilhamento de chapas magnéticas (FRATTA; VAGATI, 1992).

A característica construtiva destas chapas aumentam a resistência mecânica, ponto de saturação da temperatura e tamanhos de motores menores com mesma potência em relação aos IMs (KRISHNAN, 2001). A Tabela 2 apresenta as características construtivas do SynRM em relação ao IM.

Tabela 2: Comparativo entre SynRM e IM.

	Custo	Estrutura do rotor	Complexidade da geometria do rotor
IM	Moderado	Laminada com barras	Baixa
SynRM	Moderado	Laminada	Elevada

A inserção de chapas laminadas com a presença de ranhuras aumentam a fiabilidade do motor em altas velocidades e temperatura dos SynRMs em relação aos modelos de motores com rotor gaiola de esquilo com cortes na superfície (KOSTKO, 1923).

2.4 Modelos de rotores

Neste capítulo são apresentados os modelos de rotores do SynRM. Dentre esses, listam-se rotor gaiola de esquilo e modelos convencionais do SynRM.

2.4.1 Rotor gaiola de esquilo

A construção dos primeiros rotores gaiolas de esquilo são datados a partir da segunda metade do século XIX (GAMBA et al., 2013). Estes motores fazem parte da classe dos motores de indução, possuem elevada robustez e sua construção possui baixa complexidade. Estes modelos de rotores permitem que a partida do motor seja realizada através da conexão direta com a rede (acionamento *Line-start*). A construção deste possui barras condutoras em formato cilíndrico curto-circuitadas em ambas as extremidades conforme é apresentado na Figura 2.

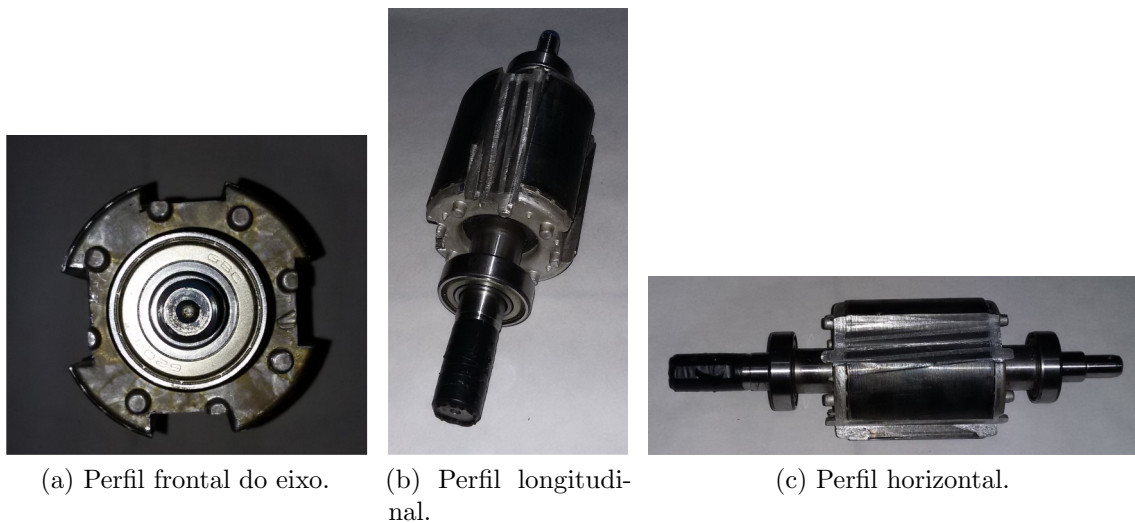


Figura 2: Representação dos modelos de rotores gaiola de esquilo com corte na superfície. Fonte : (SANTOS JR, 2018).

O rotor gaiola opera em sincronismo quando cortes axiais são produzidos ao longo do rotor e que o processo de indução ocorre, necessariamente, durante a partida (BONNETT; ALBERS, 2000). Em virtude disso, o campo magnético oriundo da tensão induzida contribui para produção de conjugado de relutância, possibilitado pela diferença de indutância em relação a superfície do rotor (DIAS, 2006).

O modelo de rotor gaiola com cortes ao longo do eixo compromete a produção de conjugado e fator de potência, devido a baixa relação entre as indutâncias L_d e L_q .

2.4.2 Rotores do SynRM

Desde o início do século XX a tecnologia de operação das ligas metálicas e materiais magnéticos é ampliada, garantindo a diversificação na produção de lâminas e chapas, comumente utilizadas em máquinas elétricas. A inserção de terras raras na produção de rotores confere a capacidade de expansão de novas características de operação dos motores elétricos, garantindo sincronismo e escorregamento nulo devido a inexistência de tensões induzidas na região do rotor (IM et al., 2009).

O progresso no desenvolvimento de produção de rotores foi sentida, sobretudo, nos SynRMs através do incremento de materiais magnéticos grãos não orientados capazes de direcionar o sentido do fluxo magnético através da característica anisotrópica (PARK et al., 2010), (MOGHADDAM, 2007). Inicialmente, os modelos desses rotores diversificaram quanto a geometria e matéria prima. O incremento de ranhuras de ar e construção de um rotor composto por lâminas ferro-magnéticas modificaram as técnicas de construção e possibilitaram níveis de conjugado elevados com magnitude de oscilação reduzida (MUTEBA; TWALA; NICOLAE, 2016).

Cada geometria de rotor possui barreira de fluxo é constituída por cortes nas chapas laminadas do rotor e possuem a função de direcionar o sentido do campo magnético. O par de barreiras de fluxo diz respeito à quantidade de pares de polos do motor. As topologias de rotores apresentadas na Figura 3 são compostas pelos modelos: Polo saliente convencional, Barreira dupla, Transversalmente laminado e Transversalmente laminado moderno.

As geometrias dos rotores são aplicadas conforme a aplicação prática e a quantidade das ranhuras norteiam a eficiência do motor. O direcionamento de aplicação do motor é definido a partir do fator de potência, magnitude e oscilação de conjugado (FONG; HTSUI, 1970).

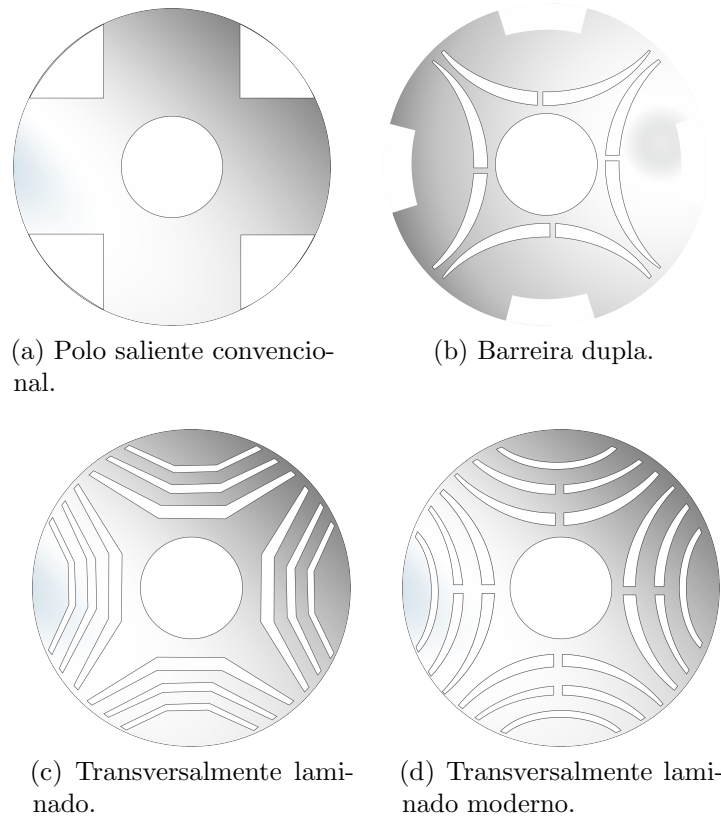


Figura 3: Modelos de rotores do SynRM.

Fonte : Autor.

2.5 Relação conjugado por ângulo de carga

A produção de conjugado do SynRM depende de características construtivas de projeto como geometria, quantidade das lâminas do rotor e tipo do material ferromagnético. Estes fatores interferem diretamente na relação de indutâncias de quadratura do motor (FRATTA; VAGATI, 1992), (KRISHNAN, 2001). Valores elevados da relação L_d/L_q confere ao motor elevada magnitude de conjugado. A Equação (2.1) apresenta a relação entre o perfil do conjugado em função dos parâmetros e características de carregamento do motor.

$$T_e = \frac{1 - \frac{1}{L_d L_q}}{2 \cdot L_q} \cdot \sin(\delta_s) \quad (2.1)$$

A Figura 4 apresenta o comportamento da Equação (2.1):

O máximo valor de conjugado produzido pelo SynRM possui ângulo de carregamento igual a 45° , enquanto modelos com auxílio de ímãs o ângulo de carga é 90° (NEUMANN et al., 2020). Essa relação entre produção de conjugado em função do carregamento pode ser potencializada através modelos de rotores com elevada densidade de conjugado, fato evidenciado através da magnitude elevada entre as indutâncias em quadratura (HOFMANN; SANDERS; EL-ANTABLY, 2004). Vale ressaltar que para relações de indutância L_d/L_q superiores a 10 a construção das lâminas do rotor tornam-se

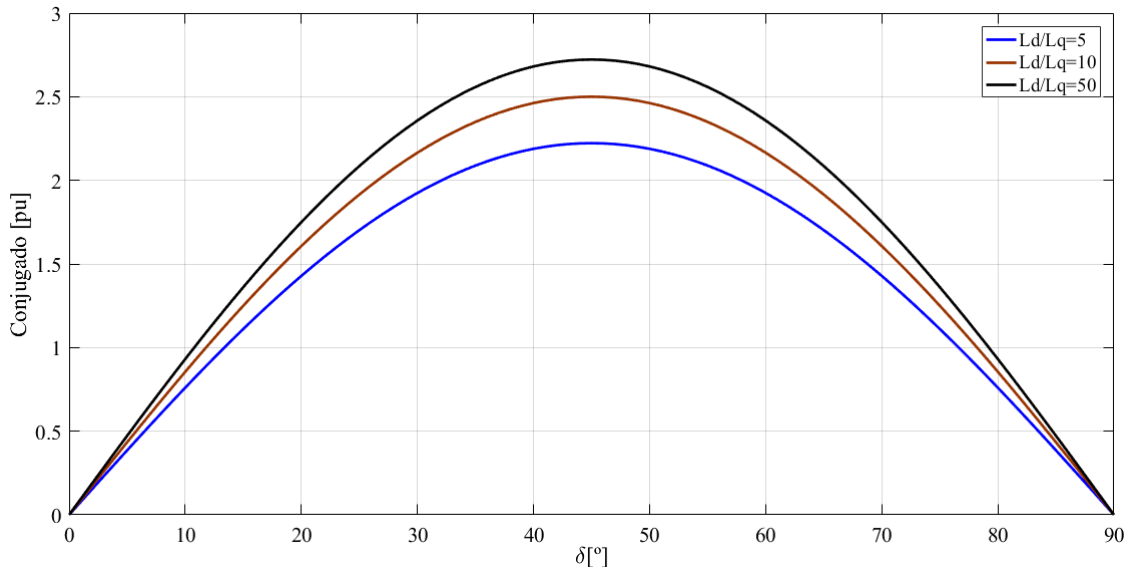


Figura 4: Conjugado por ângulo de carga.

Fonte : Autor.

impraticáveis devido a impossibilidade atender as necessidades de projetos com geometrias complexas com comprimentos de baixa espessura (SANTOS JR, 2018).

2.6 Fator de potência máximo e taxa de saliência

O fator de potência máximo representa a capacidade do motor absorver níveis reduzidos de reativo. Esta característica depende da qualidade dos enrolamentos do estator e do rotor da máquina, em especial o tipo de material, geometria das ranhuras e dimensão física. Essas características dizem respeito a capacidade de escoamento do campo magnético sobre a geometria do rotor. Isso é evidenciado através do nível de armazenamento de energia no rotor que é verificado através das indutâncias do motor (BETZ et al., 1992). As indutâncias são analisadas em sistemas de eixo direto e quadratura e a relação entre essas indutâncias compõem o fator/taxa de saliência (PYRHONEN; HRABOVCOVA; SEMKEN, 2016). O fator de potência máximo em função da taxa de saliência é apresentada na Equação (2.2) .

$$\cos \Phi = \frac{\frac{L_d}{L_q} - 1}{\frac{L_d}{L_q} + 1} \quad (2.2)$$

A análise desta Equação para diferentes níveis de taxa de saliência resultam fatores de potência proporcionais ao aumento da relação L_d/L_q , como se nota na Figura 5:

A taxa de saliência dos SynRMs apresentam níveis cada vez maiores a partir da evolução das técnicas construtivas e domínio na produção das geometrias dos rotores. Desde os primeiros modelos projetados (modelo de rotor gaiola) até os transversalmente laminados a relação de conjugado produzido obteve acréscimo em magnitude e menores

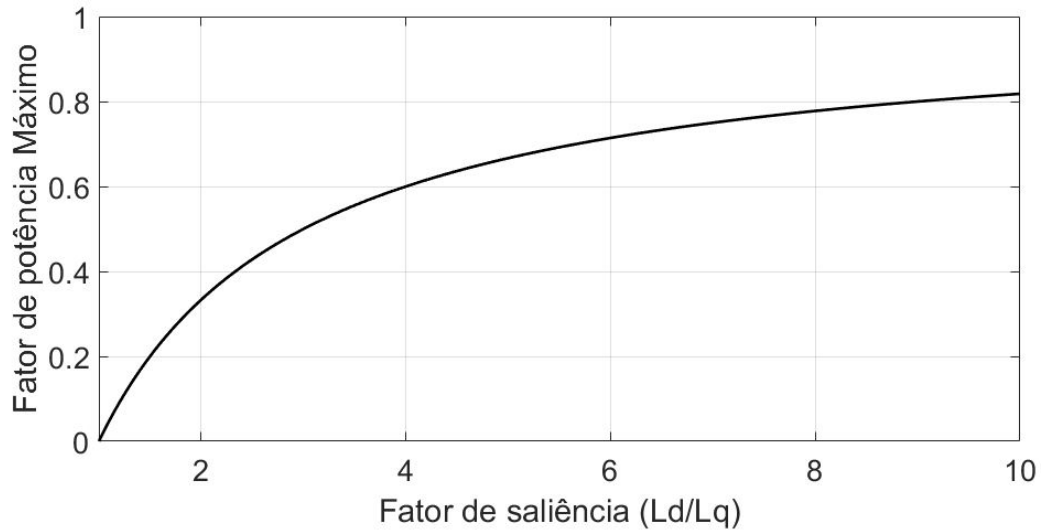


Figura 5: Fator de saliência máximo por taxa de saliência.

Fonte : Autor.

níveis de oscilação, haja visto que os modelos de rotor gaiola possuem valores de L_d e L_q próximos bem como nos motores de indução, enquanto os modelos de lâminas de rotor transversais laminado alta relação entre L_d/L_q e, dessa forma, maior fator de potência (HAATAJA, 2003).

2.7 Perfil das indutâncias

Em projeto de máquinas elétricas a indutância pode ter características lineares ou não lineares. As indutâncias do SynRM são consideradas constantes, devido a pequena variação de magnitude em regime permanente (PYRHONEN; HRABOVCOVA; SEMKEN, 2016). O SynRM possui regiões de baixa e alta relutância, essas regiões são definidas conforme a posição do rotor em relação ao estator. Essas regiões de baixa relutância representam o sentido do fluxo e a magnitude do armazenamento de energia é denominado L_d , por outro lado o sentido de alta relutância é denominado L_q . A Figura 6 representa a composição das indutâncias L_d e L_q em relação a posição do rotor.

Com objetivo de observar o efeito das zonas de baixa e alta relutância o SynRM foi modelado no *software* FEMM. A simulação em elementos finitos, baseada em SANTOS JR (2018), leva em consideração os seguintes itens:

- Material do rotor: Aço de grão não orientado M470-50A;
- Geometria das lâminas do rotor: o modelo transversalmente laminado moderno;
- Três ranhuras;
- Modelagem das indutâncias em função do tempo.

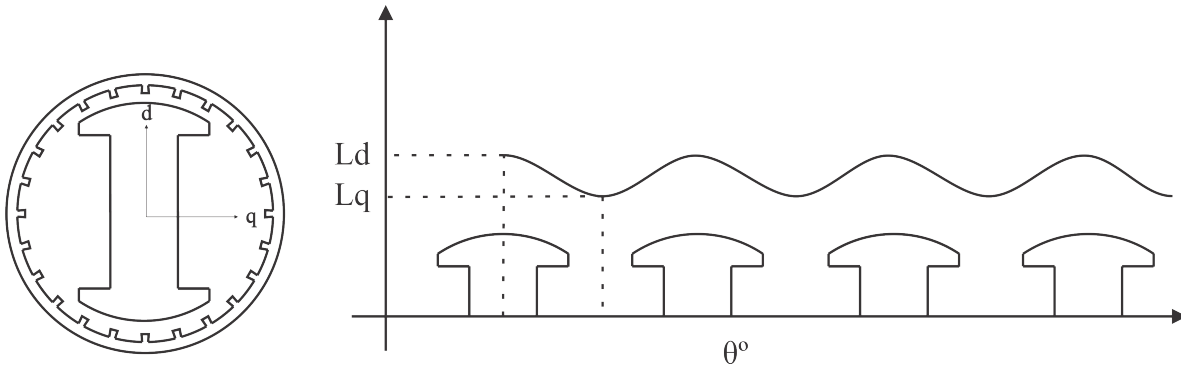


Figura 6: Indutância por posição do rotor. Fonte : Autor.

A Figura 6 apresenta o perfil da indutância do SynRM em comportamento dinâmico que representa a posição do rotor em função do campo magnético produzido pelos enrolamentos elétricos do estator.

2.8 Acionamento do Motor Síncrono de Relutância

O desenvolvimento da eletrônica de potência e sistemas microprocessados de alto desempenho tornaram possível a implementação de técnicas de controle e acionamento nos SynRMs. Os primeiros modelos de SynRMs permitiam conexão direta com a rede (KOSTKO, 1923). A conexão direta com a rede do SynRM foi mediada pelas características do rotor e acionamento semelhantes ao IM.

O progresso das tecnologias que envolvem as geometrias e tipos de materiais tornaram o SynRM dependente de inversores de frequência. Essa estratégia permite que o motor produza conjugado suficiente para suprir as perdas por inércia e atingir velocidade nominal. Dessa forma, a partida do motor ocorre com a mudança da frequência até o valor nominal de velocidade.

A aplicação de técnicas de controle exigem o incremento de sensores mecânicos para o monitoramento da velocidade em tempo real. A estrutura do inversor possui chaves semicondutoras que alteram a frequência de operação da tensão da rede. A Figura 7 apresenta a estrutura de acionamento do inversor trifásico de três braços.

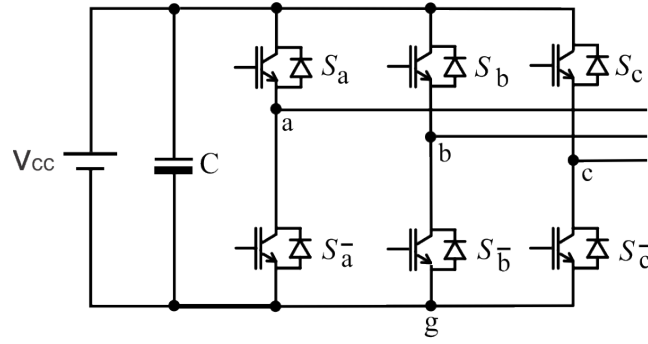


Figura 7: Inversor trifásico de três braços.

Fonte : Autor.

2.9 Representação matemática do modelo elétrico e mecânico

Os estudos direcionados a sistemas elétricos e dispositivos de potência tem como fundamento os efeitos causados pela fonte de energia. Os efeitos da energização nos enrolamentos de motores elétricos são analisada através da tensão, corrente e conjugado de giro produzido no eixo da máquina. Nesta sessão, o motor é modelado elétrico e mecanicamente.

2.9.1 Sistema de coordenadas abc

Em máquinas elétricas e dispositivos de potência, os sistemas são energizados por fontes senoidais equilibradas e defasados de 120° elétricos (FITZGERALD et al., 2003), (KRAUSE et al., 2002), (KRISHNAN, 2001). O modelo matemático do motor é obtido através das Leis de Kirchhoff de tensão e corrente, levando em consideração os seguintes fatores:

- Perdas no ferro são desconsideradas;
- Efeitos de saturação magnética são desconsideradas;
- Componentes harmônicas oriundas do inversor escalar *Pulse Width Modulation* (PWM) não alteram a dinâmica do sistema;
- As resistências do enrolamento do estator são equivalentes.

A partir disso, o esquema de conexão elétrico é apresentado na Figura 8.

Dessa forma, o circuito representa um circuito RL e pode ser representado através da tensão do circuito, representado pela Equação, genérica, (2.3):

$$V_{abc} = R_{abc} \cdot i_{abc} + L_{abc} \cdot \frac{di_{abc}}{dt} \quad (2.3)$$

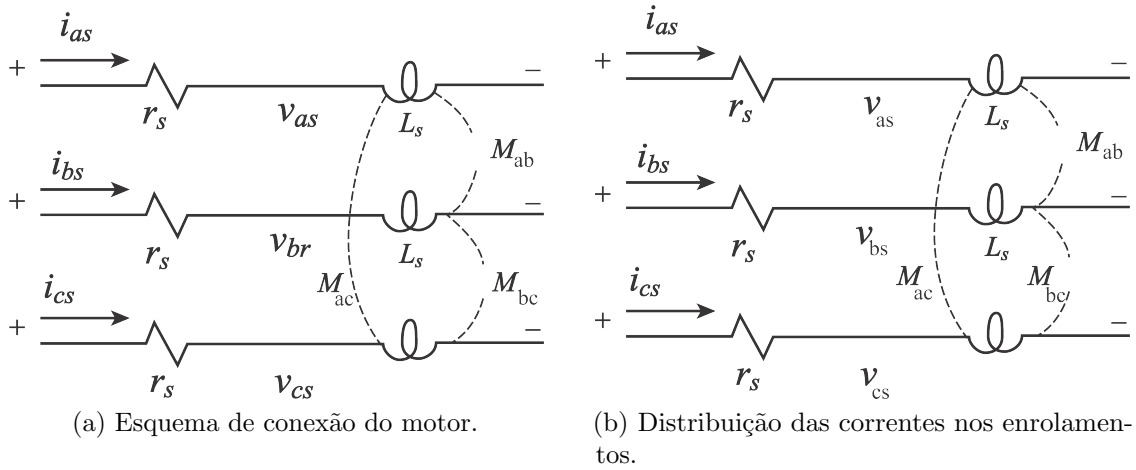


Figura 8: Distribuição das correntes nos enrolamentos. Fonte : Autor.

Aplicando a Equação (2.3), a tensão do sistema obtida equivale a Equação (2.4):

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \cdot \left[\frac{d}{dt} \right] \quad (2.4)$$

Em que a resistência do enrolamento R_{abc} é dada pela Equação (2.5):

$$R_{abc} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

A indutância do enrolamento, por sua vez, é composta por parcela de indutâncias próprias e mútuas, que é dado pela Equação (2.6):

$$L_{abc} = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

A indutância mutua entre as fases são definidas na Equação (2.7):

$$\begin{aligned} M_{ab} &= M_{ba} \\ M_{ac} &= M_{ca} \\ M_{bc} &= M_{cb} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Por fim, o fluxo do estator é expresso pela Equação (2.8):

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

2.9.2 Transformada de Park

A transformação de Park consiste na substituição de vetores temporais por um sistema bifásico (direto e quadratura) estacionário no tempo (LIMA, 2018). Essa técnica foi desenvolvida com objetivo de reduzir os esforços na modelagem de sistemas rotativos que dependam de indutâncias instantâneas na diminuição das representações matriciais e simulações computacionais. A transformada de Park, embora fictícia, representa os fenômenos físicos reais do sistema (ÖNEL; BENBOUZID, 2008). A Figura 9 representa a transformação do sistema trifásico (abc) em direto e quadratura, estacionários no tempo. A Equação (2.9) apresentada a seguir representa as tensões trifásicas de um sistema abc

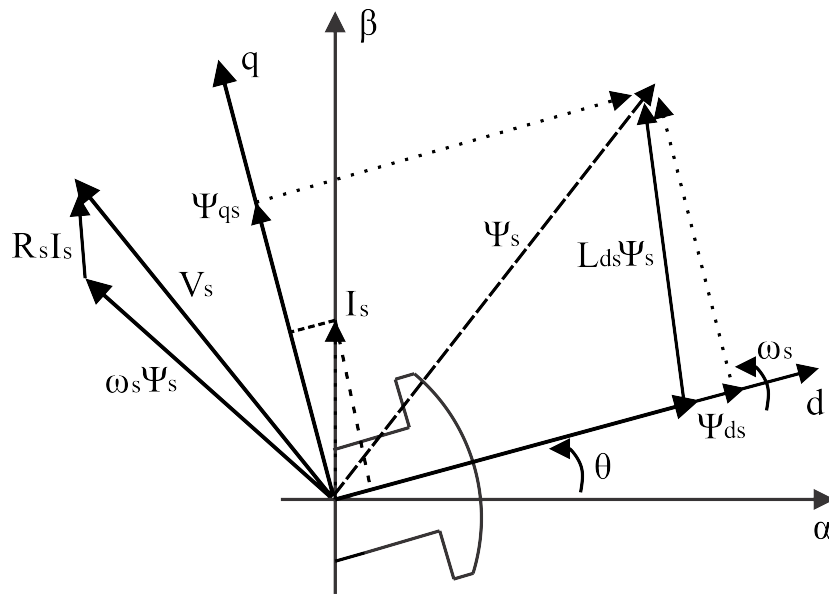


Figura 9: Representação vetorial do transformada de Park. Fonte : Adaptado de (PYRHONEN; HRABOVCOVA; SEMKEN, 2016).

equilibrado:

$$\begin{bmatrix} V_a(t) \\ V_b(t) \\ V_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} \cdot V \cdot \cos(\omega \cdot t) \\ \sqrt{2} \cdot V \cdot \cos(\omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}) \\ \sqrt{2} \cdot V \cdot \cos(\omega \cdot t - \frac{4 \cdot \pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

A transformação desse sistema para o sistema direto e quadratura (dq) envolve a relação do número de espiras do enrolamento; Em que N representa o número de espiras do enrolamento de cada fase e N_{eq} a equivalência das três fases do circuito. Essa transformação exige o ângulo elétrico que, em máquinas elétricas, representa a posição em tempo real da posição do rotor (ÖNEL; BENBOUZID, 2008).

A transformação de sistemas de coordenadas torna o processo de modelagem matemática do motor e controle menos complexa, possibilitando a implementação da simulação com menor capacidade de processamento computacional.

2.9.3 Sistema de coordenadas direto e quadratura (d-q)

Em máquinas elétricas e sistemas de potência a mudança de eixos no domínio do tempo para o sistema estacionário d-q dependem da posição angular do rotor em relação ao rotor e quantidade de espiras presente no motor. Esta relação é expressa na Equação (2.10) através da transformação do sistema trifásico para os eixos direto e quadratura:

$$\begin{bmatrix} \frac{N_{eq}}{2} \cdot I_d \\ \frac{N_{eq}}{2} \cdot I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{N_1}{2} \cdot \left[I_{as} \cdot \cos(\theta_e) + I_{bs} \cdot (\theta_e - \frac{2\pi}{3}) + I_{cs} \cdot (\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \right] \\ \frac{N_1}{2} \cdot \left[I_{as} \cdot \cos(\theta_e) + I_{bs} \cdot (\theta_e - \frac{2\pi}{3}) + I_{cs} \cdot (\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \right] \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

As correntes oriundas da transformação é dada pela Equação (2.11):

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K \cdot \left[I_{as} \cdot \cos(\theta_e) + I_{bs} \cdot (\theta_e - \frac{2\pi}{3}) + I_{cs} \cdot (\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \right] \\ K \cdot \left[-I_{as} \cdot \cos(\theta_e) - I_{bs} \cdot (\theta_e - \frac{2\pi}{3}) - I_{cs} \cdot (\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \right] \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

A constante K representa a relação entre enrolamento de fase com o equivalente, como expresso na Equação (2.12):

$$K = \frac{N_1}{N_{eq}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2.12)$$

Portanto, a Equação final para corrente no sistema de eixo direto e quadratura é dado pela Equação(2.13):

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin(\theta_e) & -\sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{as}(t) \\ I_{bs}(t) \\ I_{cs}(t) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

A partir da estrutura de transformação de eixos abc para direto e quadratura, o modelo matemático do SynRM é apresentado como segue:

2.9.3.1 Tensão do estator

A tensão do estator é obtida através da Figura 8 e 9 como mostra a Equação (2.14) e (2.15):

$$v_d = R_s \cdot i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_e \cdot \Psi_q \quad (2.14)$$

$$v_q = R_s \cdot i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \omega_e \cdot \Psi_d \quad (2.15)$$

2.9.3.2 Correntes do estator

A corrente do SynRM representa a intensidade do fluxo magnético que atravessa o rotor pela indutância do motor como é apresentado nas equações (2.16) e (2.17):

$$I_d = \frac{\Psi_d}{L_d} \quad (2.16)$$

$$I_q = \frac{\Psi_q}{L_q} \quad (2.17)$$

Substituindo as equações (2.16) e (2.17) nas equações das tensões d-q do estator, encontra-se:

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} \cdot \Psi_d + \omega_e \cdot \Psi_q + v_d \quad (2.18)$$

$$\frac{d\Psi_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} \cdot \Psi_q + \omega_e \cdot \Psi_d + v_q \quad (2.19)$$

Aplicando a integral nas equações (2.18) e (2.19) temos a Equação da corrente considerando resistência e tensão do estator como está exposto nas equações (2.20) e (2.21):

$$i_d = -\frac{R_s}{L_d} \cdot i_d + \frac{1}{L_d} \cdot v_d + \omega_e \cdot \frac{L_q}{L_d} \cdot i_q \quad (2.20)$$

$$i_q = -\frac{R_s}{L_q} \cdot i_q + \frac{1}{L_q} \cdot v_q + \omega_e \cdot \frac{L_d}{L_q} \cdot i_d \quad (2.21)$$

2.9.3.3 Conjugado eletromagnético

Por fim, a Equação para conjugado eletromagnético do SynRM é apresentado na Equação (2.22):

$$T_{em} = -\frac{3}{2} \cdot n_p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q \quad (2.22)$$

2.9.4 Modelo mecânico

O modelo mecânico de máquinas rotativas envolvem velocidade e conjugado no eixo do motor. O modelo dinâmico da velocidade para o SynRM é expressa na Equação (2.23):

$$\dot{\omega}_r = -\frac{B}{J} \cdot \omega_r + \frac{1}{J} \cdot T_m \quad (2.23)$$

Em que B e J representam, respectivamente, o coeficiente de atrito viscoso e a inércia do motor. O conjugado mecânico T_m relaciona a parcela produzida pelo motor com a carga acoplada ao eixo e é definido como mostra a Equação (2.24):

$$T_m = T_{em} - T_L \quad (2.24)$$

Em que T_{em} representa o conjugado eletromecânico e T_L o conjugado de carga do SynRM.

2.10 Projeto do controlador para o Motor Síncrono de Relutância

No contexto atual de máquinas elétricas as aplicações industriais necessitam de motores capazes de operar em diferentes faixas de velocidades e boa produção de conjugado. As técnicas de controle surgem como medidas para potencializar a usabilidade do motor em diferentes aplicações (FRATTA; VAGATI, 1992). Nos SynRMs as técnicas de controle podem ser aplicadas a partir do monitoramento da posição do rotor, seja por instrumentos físicos ou técnicas de estimação de velocidade (PYRHONEN; HRABOVCOVA; SEMKEN, 2016).

Os principais métodos utilizados para o controle são realizados por meio da estimativa de fluxo, tensão do enrolamentos, conjugado e monitoramento da posição do rotor (HASEGAWA; KITAHARA; MATSUMOTO, 2012), (CHEN et al., 2004), (GABBI; VIEIRA, 2015), (SANTOS JR, 2018), (BOLOGNANI; PERETTI; ZIGLIOTTO, 2010), (SCALCON; PADILHA, 2019) e (BRANCO, 2015). As principais técnicas de controle aplicadas as SynRMs são apresentadas a seguir:

- Máximo Torque por Âmpere (MTPA): Ocorre para situação de produção de conjugado máxima por corrente independente da situação de operação do motor (BOLOGNANI; PERETTI; ZIGLIOTTO, 2010);
- Controle de enfraquecimento de fluxo: Utilizado quando o campo perde sua intensidade e o aumento da velocidade do motor é compensada pelo incremento de corrente negativa I_d e a estimativa de fluxo que permite controlar o motor sem a necessidade de utilização de sensores mecânicos (LIU et al., 2018), (LEE et al., 2018), (XU et al., 1991). Essa técnica requer elevado processamento e incrementa níveis moderados de oscilação de conjugado em sua aplicação.

No entanto, este trabalho baseia-se na aplicação da técnica de monitoramento da posição real do motor, simulando a posição do rotor por *encoder*. Esta técnica é sensível a inserção ou retirada de carga ao eixo, pois a posição angular é modificada.

2.10.1 Projeto do controlador para malha de velocidade via *Indirect Field Oriented Control* -IFOC

O SynRM possui alta capacidade de produção de conjugado em condições nominais de operação. Em zonas de operação específicas o aumento da velocidade compromete o conjugado do motor. As regiões de operação são compostas em três etapas, apresentadas a seguir:

- Região I: Conjugado constante: Zona em que a velocidade base do motor opera com limite a nominal. Nesta região, a corrente e conjugado são constantes;
- Região II: Potência constante: Nessa região a potência é constante, no entanto o fluxo do estator é enfraquecido e, por fim, queda do conjugado ofertado. Esta região ocorre entre a velocidade de operação base e velocidade crítica;
- Região III: Ângulo de carga constante: Nessa região o ângulo de carga é constante, o fluxo do estator é enfraquecido, tendendo a zero. Nesta região, a velocidade está acima do valor crítico.

Nessa sessão é apresentado o projeto do controlador para malha de velocidade utilizando o controle orientado por fluxo indireto. Esta técnica permite ao controle aplicar ganhos para corrigir os erros do sistema. A implementação do controle é possível devido ao monitoramento da posição do rotor, este ângulo é responsável pela transformação das coordenadas elétricas (abc para d-q) e velocidade (SCALCON; PADILHA, 2019), (GABBI; VIEIRA, 2015). O ganho do controlador é expresso na Equação (2.25):

$$G_{cm} = K_{pm} + \frac{K_{im}}{s} \quad (2.25)$$

O ganho em malha fechada é obtida pela equação (2.26).

$$G_{cm} = \frac{G_{cm} \cdot G_m}{1 + G_{cm} \cdot G_m} \quad (2.26)$$

O ganho de malha do SynRM é apresentado na equação

$$G_m = \frac{\frac{1}{J}}{s + \frac{B}{J}} \quad (2.27)$$

Substituindo as Equações (2.26) e (2.27), obtem-se a Equação (2.28):

$$G_{cmf} = \frac{\frac{K_{pmec}}{J}s + \frac{K_{imec}}{J}}{s^2 + \frac{B + K_{pmec}}{J}s + \frac{K_{imec}}{J}} \quad (2.28)$$

A Equação obtida pode ser aproximada da função de transferência de segundo grau, com isso os ganhos de malha fechada podem ser obtidos através da Equação principal da função de transferência é apresentada na Equação (2.29):

$$G_{cm} = \frac{2 \cdot \xi_3 \cdot \omega_{c_{mec}} \cdot s}{s^2 + 2 \cdot \xi_{c_{mec}} \cdot \omega_{c_{mec}} \cdot s + \omega_{c_{mec}}^2} \quad (2.29)$$

Em que ξ e ξ_{mec} representam o coeficiente de amortecimento do numerador e mecânico. Os ganhos PI (K_{pm} e K_{im}) obtidos são apresentados nas Equações (2.30) e (2.31).

$$K_{pm} = 2 \cdot \xi_{c_{mec}} \cdot \omega_{c_{mec}} \cdot J \quad (2.30)$$

$$K_{im} = \omega^2 c_{mec} \cdot J \quad (2.31)$$

A modelagem dos ganhos das correntes em eixo direto e quadratura são obtidas de forma semelhante ao projeto do controle de velocidade. Devido a verosimilhança esta modelagem foi suprimida.

Simulação computacional e análise dos resultados obtidos

3.1 Metodologia e representação do SynRM em elementos finitos

O projeto de máquinas síncronas de relutância variam quanto a geometria dos rotores, espessuras das lâminas e tipo do material. Nesse processo, a investigação dos tipos de rotores e quantidade de ranhuras de ar são analisadas através do método em elementos finitos, a fim de compreender a dinâmica envolvida entre produção de conjugado e comportamento dos fenômenos eletromagnéticos em relação os modelos de rotores (MEEKER, 2010).

A projeção em elementos finitos possibilita determinar a eficiência do motor através dos parâmetros encontrados e, partir disso, identificação de possíveis falhas construtivas envolvidas (BALTZIS, 2008) e (BALTZIS, 2010). Para isso, foi utilizado o *software Finite Element Method Magnetics (FEMM)* com objetivo de analisar o comportamento dinâmico do campo magnético distribuído ao longo do rotor. O FEMM é um *software* de código aberto que permite representar problemas magnéticos, magnetostáticos e eletrostáticos através da representação 2D e 3D lineares ou não lineares de baixa frequência.

O *software* possui implementação simplificada dos problemas magnéticos. A proposta da representação em elementos finitos é tornar simular os fenômenos presentes no motor através de elementos e nós. Dentro do ambiente de simulação os nós e elementos compõem as malhas do sistema. Quanto maior a quantidade de elementos e nós maior a precisão dos resultados.

Inicialmente deve-se desenhar o problema proposto em duas dimensões. Assim, para representação do motor o estator e rotor devem ser representados conforme duas dimensões físicas. A Figura 11 apresenta a distribuição de campo magnético através das

topologias de rotores comumente encontrados nos SynRMs e os parâmetros envolvidos são apresentados na Tabela 3:

Tabela 3: Parâmetros do SynRM.

Parâmetros construtivos	Valores
Velocidade nominal	1800 rpm
Polos	4
Frequência	60 Hz
Abertura de ar	1,57 mm
Ângulo de fase	120°
Diâmetro externo do estator	210 mm
Diâmetro interno do estator	141 mm
Diâmetro do rotor	140 mm
Número de ranhuras	Figura 11: 3(c)/4(d)(e)
Comprimento do motor	140 mm
Ligação elétrica do motor	Δ
Resistência do estator	4,25 Ω
Coefficiente de atrito viscoso	0,0180

A partir das dimensões físicas apresentadas o motor é desenhado de acordo com o tipo de material para cada parte do motor. A Figura 10 ilustra a formação das malhas no modelo transversalmente laminado moderno.

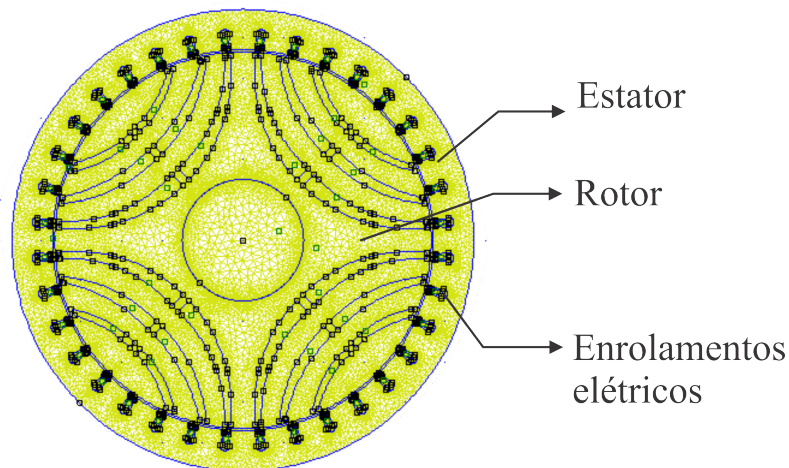


Figura 10: Estrutura de simulação.

Fonte : Autor.

A Figura 10 apresenta a formação das malhas na região do motor. As diferentes regiões do motor devem ser definidas conforme o tipo de material. No estator o material utilizado foi o M-19 Steel, o rotor com aço silício M470-50A e as barreiras de fluxo com ar. No Anexo A são apresentados o comportamento do magnético do material e *script* utilizado para simulação em elementos finitos. A partir disso, diferentes gerações de rotores são simulados e apresentadas na Figura 11. O desenvolvimento da simulação dinâmica de distribuição do campo magnético é obtida por meio do *script* e a curva BxH do material

do rotor utilizado em simulação, apresentados no Anexo A. Os modelos de rotores após simulação são apresentados na Figura 11:

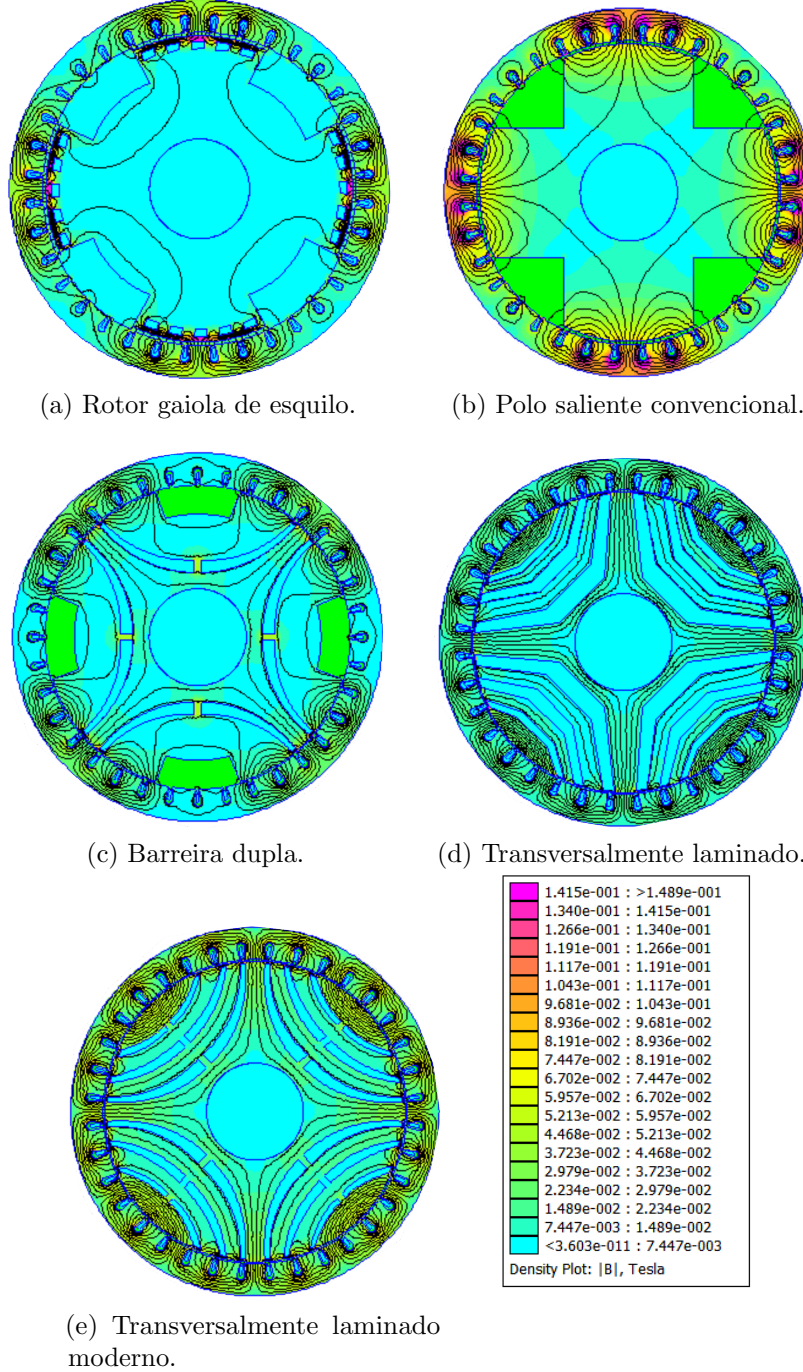


Figura 11: Representação dos modelos de rotores do SynRM em elementos finitos. Fonte : Autor.

As topologias de rotores com ranhura possuem concentração de campo magnético na região em que as barreiras alinham-se ao campo magnético gerado pelos enrolamentos do estator. Nesta situação, a direção do fluxo é obtida quando a intensidade do campo concentra-se tangencialmente nas barreiras de fluxo, enquanto o sentido perpendicular

as barreiras de fluxo representam regiões de alta relutância (HOFMANN; SANDERS; EL-ANTABLY, 2004). A intensidade de campo é distribuída com maior uniformidade no modelo transversalmente laminado. Em todos os casos a concentração de campo alinha-se ao sentido do fluxo que ocorre na região do material ferromagnético.

3.2 Estrutura de simulação do modelo elétrico e mecânico

A representação computacional do modelo elétrico do SynRM consiste em: Implementação do modelo matemático do motor no ambiente de simulação Matlab/Simulink e implementação dos ganhos do controlador. Esse *software* permite representar modelos matemáticos através de blocos dinâmicos como ganhos, somatórios, problemas diferenciáveis etc.

Inicialmente são realizadas as transformações de eixos abc para dq e, por conseguinte, obtenção das grandezas como tensões e correntes em eixo direto e quadratura (FELLANI; ABAID, 2010). A modelagem computacional possui três controladores PI's: Os Ganhos de malha fechada são aplicados nas correntes dq e na malha de velocidade. A apresentação dos projeto do controladores para as malhas de correntes são suprimidos devido a semelhança a malha de velocidade. As simulações realizadas baseiam-se nas regiões I e II, como se mostra no subcapítulo 2.10. Conforme apresenta a Figura 12, a mudança do sistema de coordenadas é realizado a partir da posição rotórica do ângulo θ_e . Dessa forma, a implementação computacional é realizada a partir dos valores de corrente e tensões d-q. O ambiente de simulação, realizado na plataforma Matlab[©]/SimulinkTM.

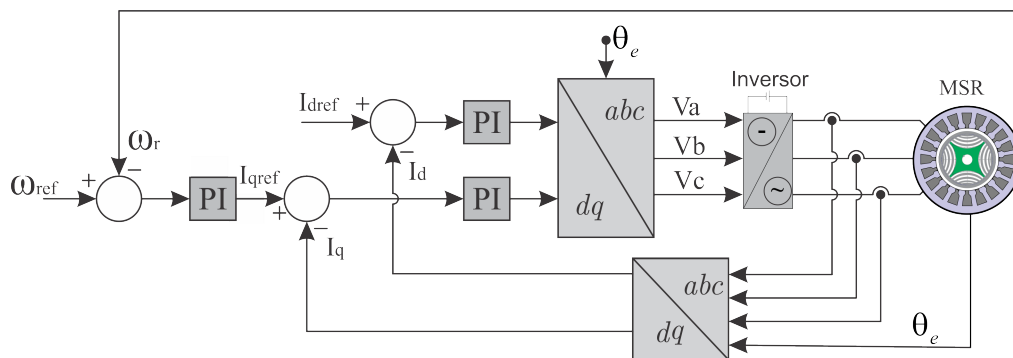


Figura 12: Estrutura de simulação.

Fonte : Adaptado de (SCALCON; PADILHA, 2019).

Para simulação o modelo do rotor adotado foi o transversalmente laminado moderno (Figura 11) devido a boa distribuição de fluxo magnético. A geometria do rotor escolhida baseia-se na melhor eficiência, isso reflete em relações de indutância L_d/L_q elevadas (SANTOS JR et al., 2019). Os valores de L_d e L_q são tomado como referência de SANTOS

JR (2018). Os valores apresentados na Tabela 4 representam os parâmetros do sistema completo do motor para implementação computacional:

Tabela 4: Valores dos Parâmetros dos modelos de rotores.

Parâmetros	Transversalmente laminado moderno
Velocidade nominal	1800 rpm
Potência nominal	2 cv
Indutância L_d	0,3540 Ω
Indutância L_q	0,18 Ω
R_s	4,25 Ω
B	0,0029
J	0,0380
p	2
K_{pm}	0,26388
K_{im}	0,012695
$\xi_{c_{mec}}$	0,9
ξ_3	0,9

A simulação trata o motor sob dois cenários de análise de desempenho dinâmico: O primeiro cenário consiste em aplicação de rampas no perfil da velocidade com conjugado constante e, em outra análise, aplicação de carga ao eixo em velocidades constantes. A implementação computacional do SynRM requer a transformação do sistema de coordenadas abc para os eixos direto e quadratura e a partir disso determinação das correntes do estator nos eixos dq . Na Figura 13 apresenta-se o esquema de simulação das correntes de eixo direto e quadratura:

Com base nas correntes I_d e I_q são aplicados ganhos nas malhas de corrente e velocidade para aplicação de ganhos durante a variação de velocidade ou carga. Na Figura 14 é apresentado o modelo mecânico do motor e sistema controlado:

A referência dos valores de velocidade e conjugado são definidos através do painel de comando apresentado na Figura 15:

Dessa forma, os valores para velocidade são modificados conforme o cenário de aplicação.

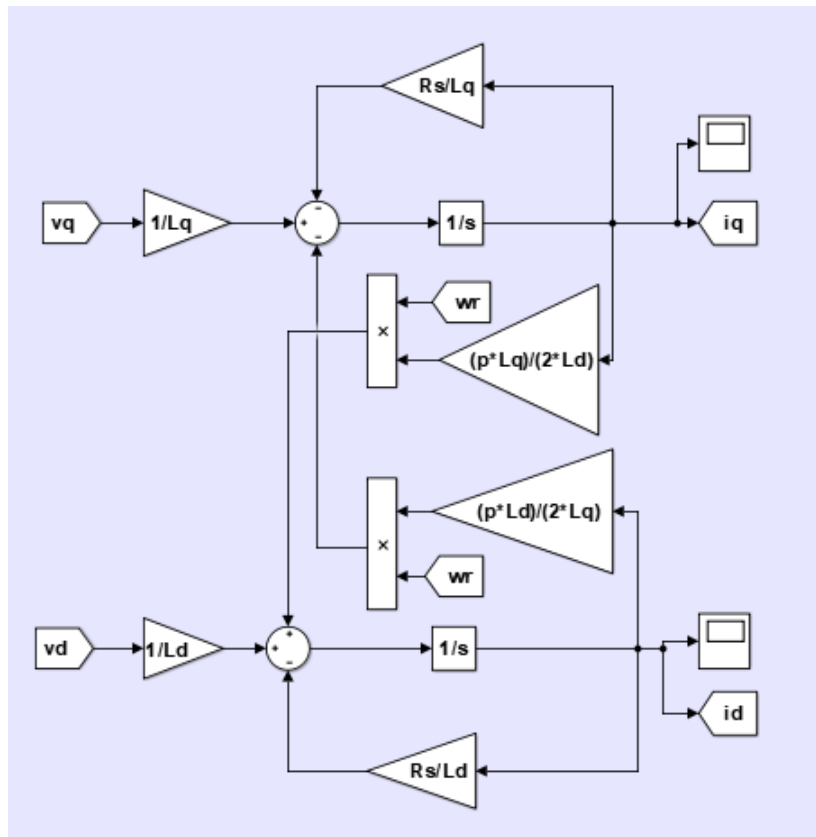


Figura 13: Esquema de simulação computacional para as correntes de eixo direto e quadratura.

Fonte : Autor.

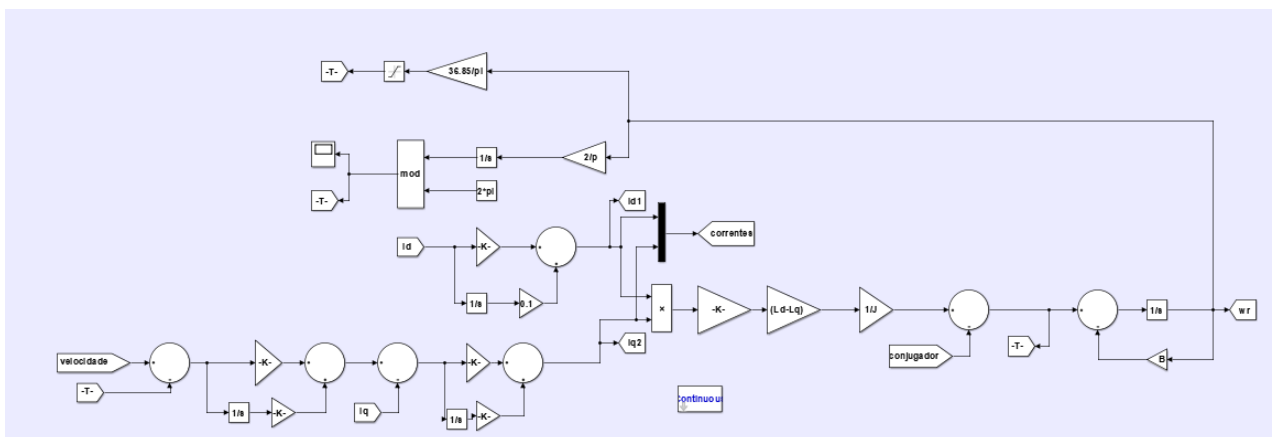
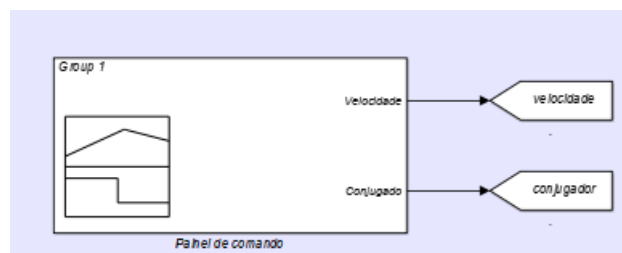
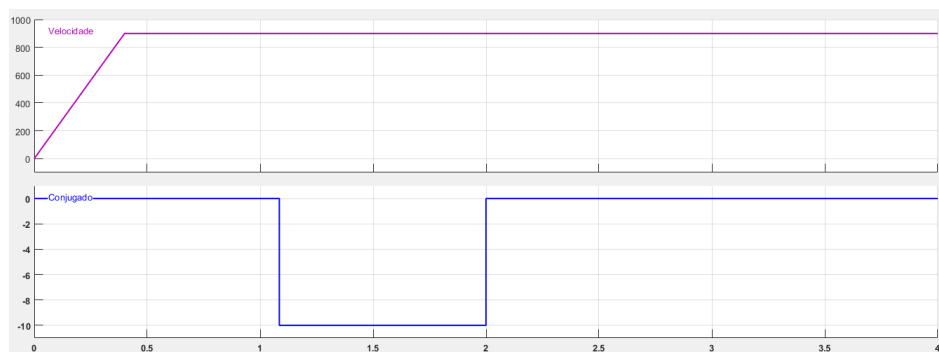


Figura 14: Esquema de simulação computacional para a malha de velocidade e corrente controlada do motor.

Fonte : Autor.



(a) Painel de comando para as referências de velocidade e conjugado.



(b) Área de comando interno do painel de comando.

Figura 15: Comando do controlador de velocidade e conjugado.

Fonte : Autor.

3.2.1 Resposta à variação de velocidade

Neste cenário de aplicação a velocidade de operação do SynRM é alterada enquanto o conjugado do motor é mantido constante. A metodologia empreendida baseia-se em obras consolidadas dentro do escopo de referências dos SynRMs BRANCO (2015), SCALCON e PADILHA (2019). Neste processo, são utilizadas caixas de ferramentas (do inglês *toolbox*) presentes no Matlab®/Simulink™ a fim de determinar o comportamento da referência da velocidade. Os testes a serem implementados consistem em:

- Acionamento do motor partir de 0 rpm para 1800 rpm;
- Aplicação de rampa de velocidade reduzindo a velocidade de 1800 rpm até 200 rpm;
- Inversão do sentido de rotação de 1800 rpm a -200 rpm.

3.2.1.1 Rampa de Velocidade de 0 rpm para 1800 rpm

A Figura 16 apresenta a aplicação de degrau de velocidade com conjugado constante de 2 N.m. A partida do motor é realizada em rampa em 2 segundos até atingir velocidade nominal.

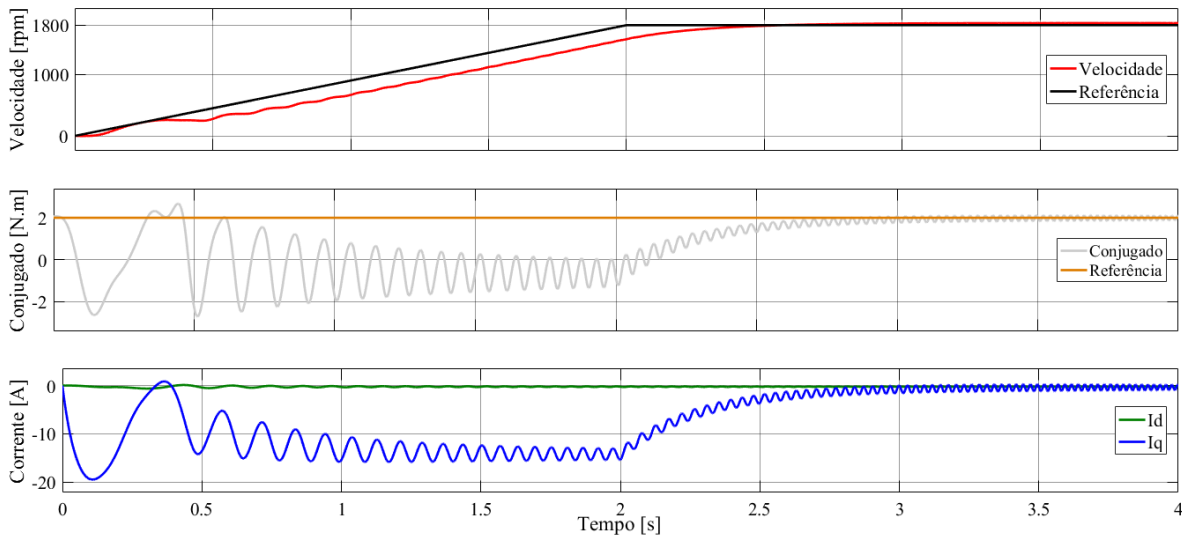


Figura 16: Resultado de simulação computacional para rampa de velocidade (0 rpm a 1800 rpm).

Fonte: Autor.

A corrente do estator trifásica, obtida através da transformação dq para abc, é apresentada na Figura 17:

A partida suave do motor resultou na produção de conjugado oscilante durante a partida do motor. A ação controle é notada com a estabilização da velocidade e redução da corrente de eixo direto e quadratura no momento em que o motor acompanha o valor

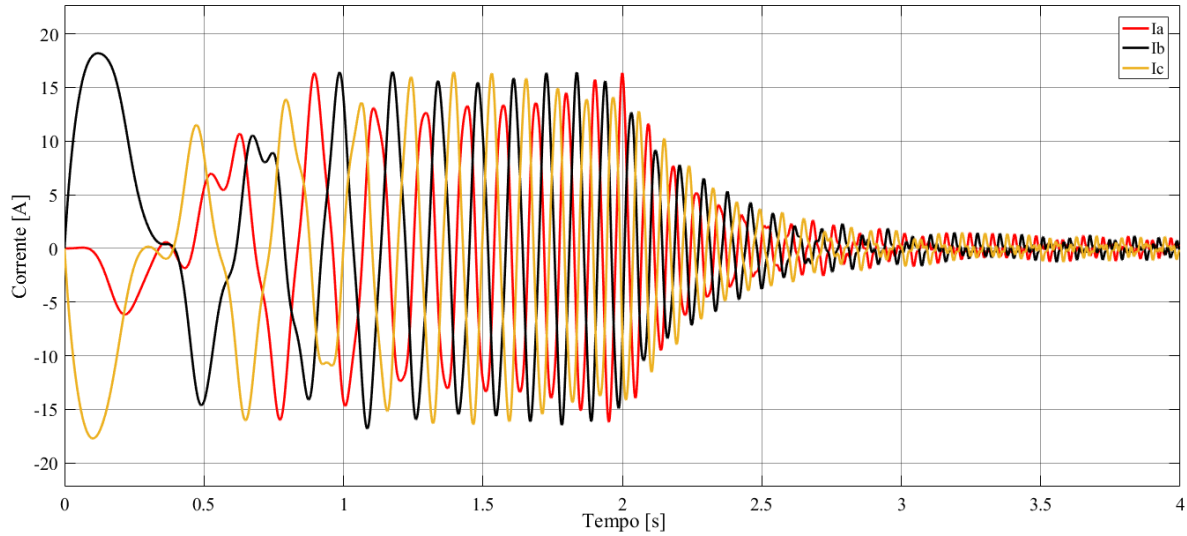


Figura 17: Corrente trifásica do estator para partida em rampa.

Fonte: Autor.

de referência da velocidade. A magnitude do conjugado é reduzida durante a partida e ao alcançar velocidade nominal o conjugado produzida é de 2 N.m. A corrente trifásica do estator, em coordenadas abc, apresenta pontos máximos de corrente na partida e redução gradativa em magnitude em relação a estabilidade da velocidade.

3.2.1.2 Rampa de Velocidade de 1800 para 200 rpm

A Figura 18 apresenta a partida em rampa e redução da velocidade com conjugado constante de 3 N.m. O motor atinge velocidade nominal de 1800 rpm no instante 1,5 segundos e redução de velocidade para 200 rpm no instante 3 segundos.

A corrente do estator trifásica para situação de partida e frenagem é apresentada na Figura 19:

Neste resultado, as características desempenho são mantidas em relação a partida suave apresentada na Figura 16. O nível de conjugado alcança valor nominal no instante que o motor mantém velocidade constante, com a redução da velocidade do motor o conjugado do SynRM eleva sua magnitude e, conseqüentemente, inversão do ângulo de fase entre as correntes I_a e I_b durante aumento e redução de velocidade.

3.2.1.3 Inversão do sentido de rotação: 1800 para -200 rpm

Neste cenário de aplicação, presente em sistemas de tração elétrica, as situações de frenagem regenerativa em que o motor deixa de consumir potência e passa a fornecer potência ao sistema envolvido. No entanto, os efeitos de regeneração de energia são desprezados neste trabalho. Assim, a velocidade, o conjugado e a corrente são avaliados

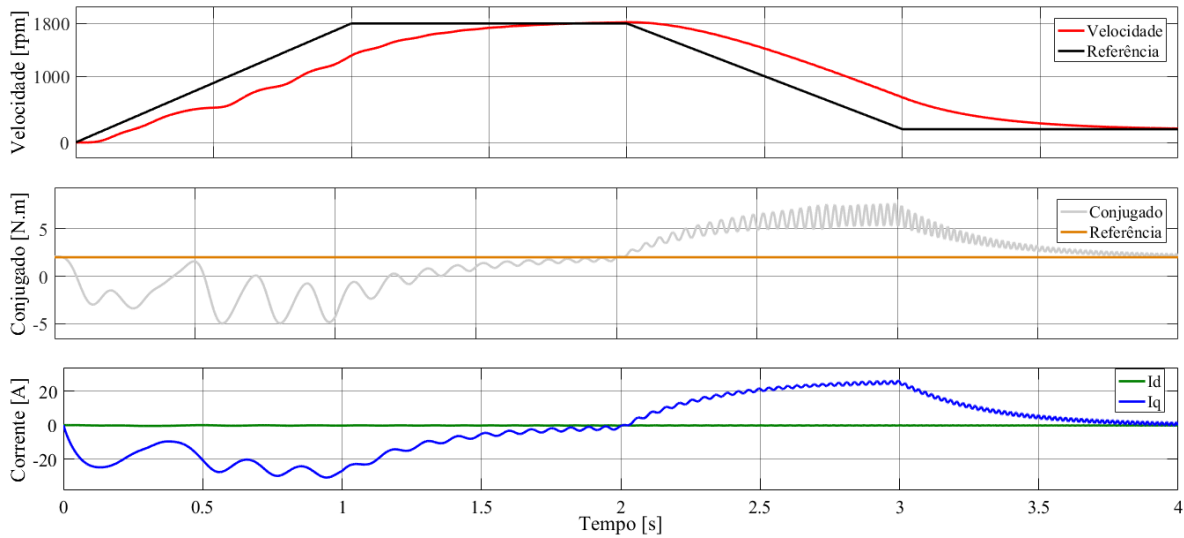


Figura 18: Resultado de simulação computacional para rampa de aceleração (no instante de 1 segundo) e desaceleração (no instante de 3 segundos) da velocidade de 1800 rpm para 200 rpm.

Fonte: Autor.

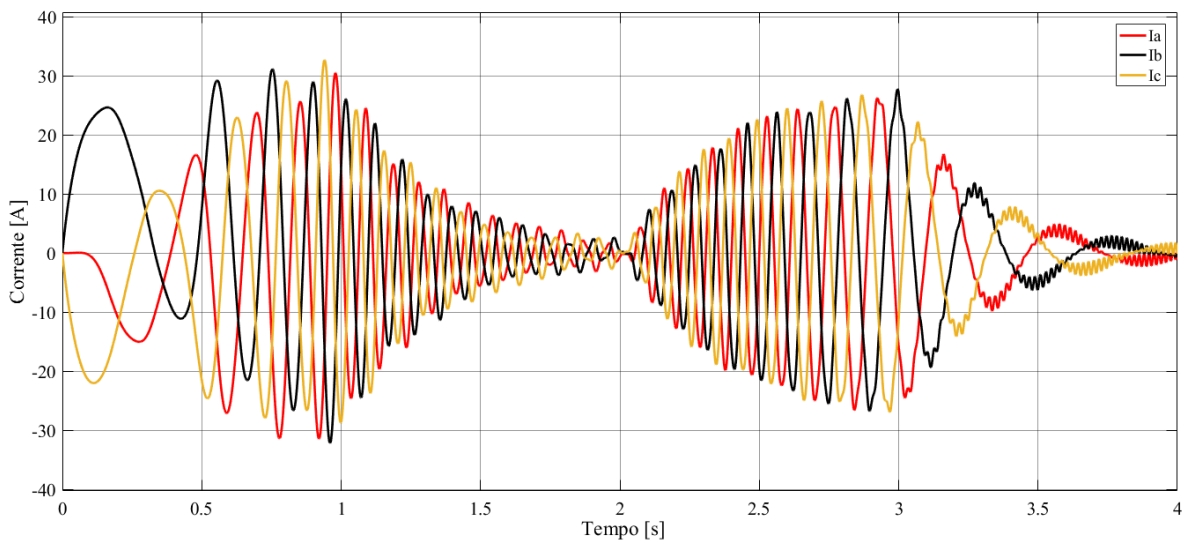


Figura 19: Corrente trifásica do estator para partida suave e frenagem do motor de 1800 rpm para 200 rpm.

Fonte: Autor.

para se analisar a resposta a ação de controle como mostra a Figura 18.

A corrente do estator trifásica para inversão do sentido de rotação do motor é apresentada na Figura 21:

A dinâmica de simulação apresenta as mesmas características da Figura 18 e 19. No entanto, o nível da velocidade é mantido até valores negativos, representando a inversão do sentido de rotação. Nota-se, que o ângulo de fase das correntes abc são alterados níveis

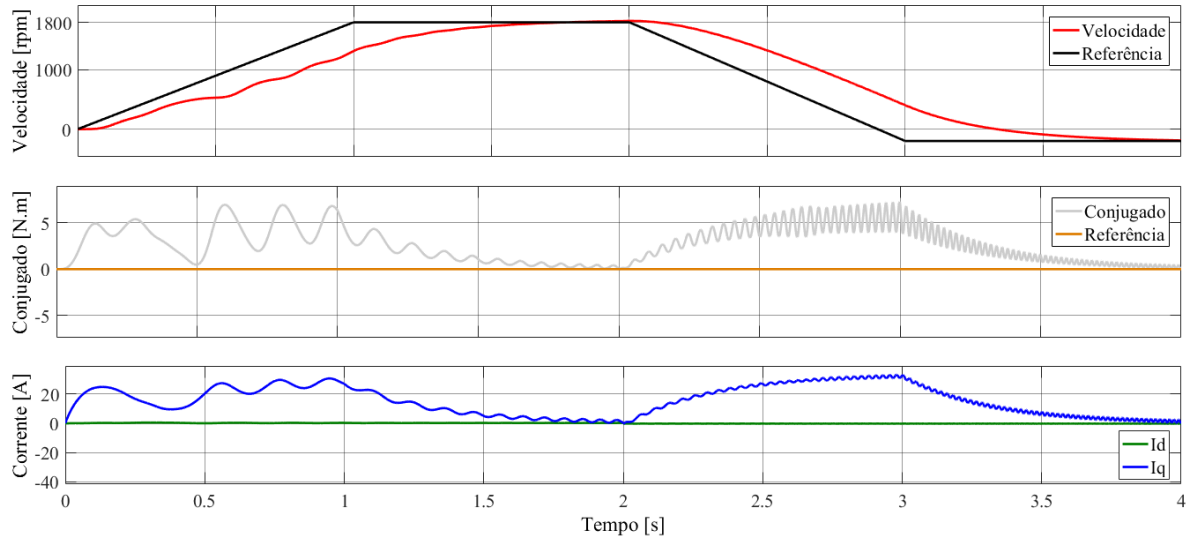


Figura 20: Resultado de simulação computacional para inversão do sentido de rotação de 1800 rpm para -200 rpm.

Fonte: Autor.

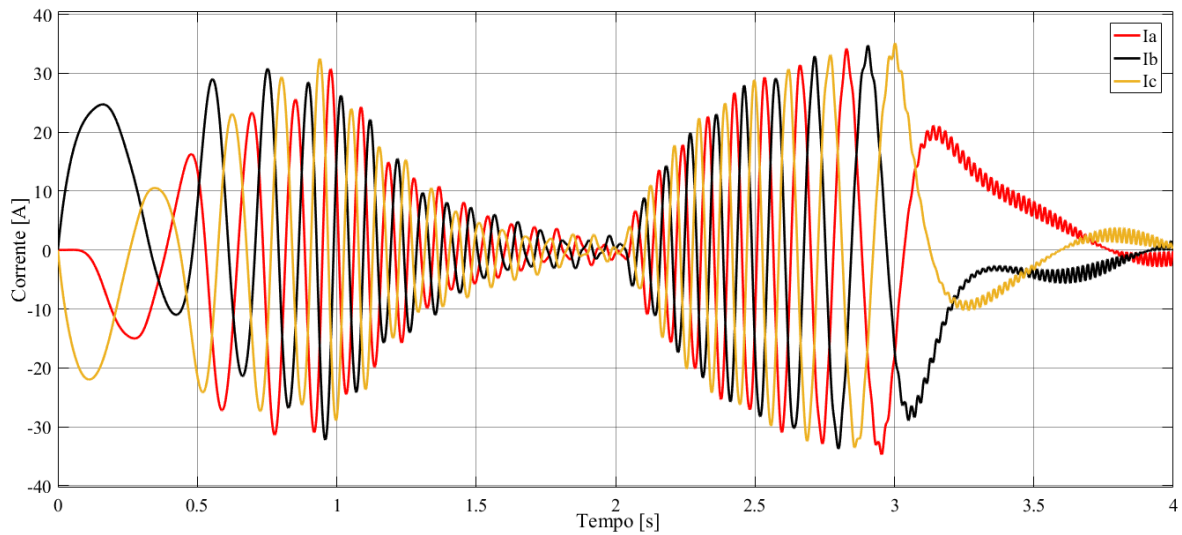


Figura 21: Corrente trifásica do estator para inversão do sentido de rotação de 1800 rpm para -200 rpm.

Fonte: Autor.

de conjugado e corrente diminuem sua magnitude em relação ao cenário de aplicação apresentado na Figura 18 para compensar a redução de velocidade do motor.

3.2.2 Resposta ao degrau de carga

Nesta sessão, a velocidade é mantida constante durante a inserção ou retirada de carga de conjugado. A análise de comportamento dinâmico de máquinas elétricas é avaliada a partir da resposta ao degrau de carga e operação de diferentes faixas de velocidade.

3.2.2.1 Degrau de Conjugado de 0 N.m para 10 N.m

Neste cenário de aplicação é ocorre inserção de carga ao eixo do SynRM de 0 N.m até 10 N.m entre os instantes de 2,5 a 3,5 segundos com velocidade constante de 1800 rpm.

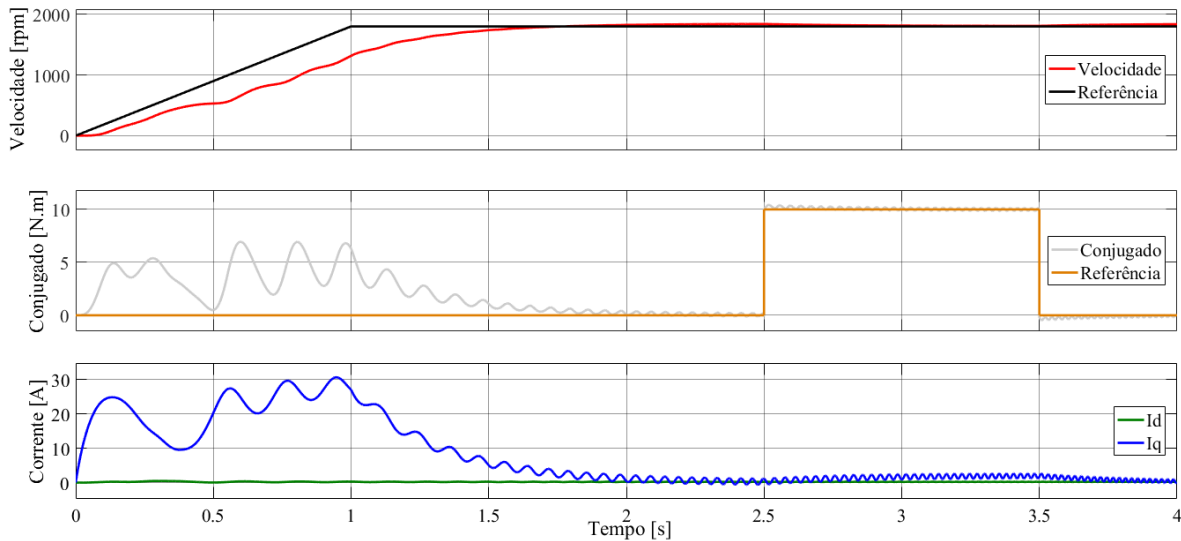


Figura 22: Resultado de simulação computacional para degraú de carga de 0 N.m para 10 N.m.

Fonte: Autor.

A corrente do estator trifásica para aplicação de carga é apresentada na Figura 23:

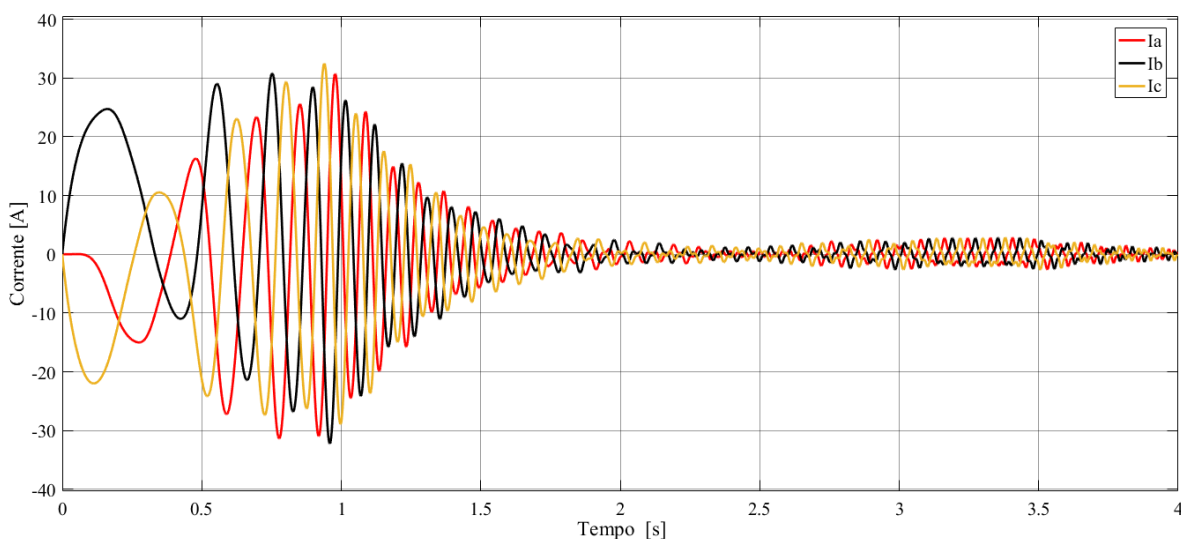


Figura 23: Corrente trifásica do estator para degraú de carga de 0 N.m a 10 N.m.

Fonte: Autor.

O motor, nesse cenário, apresenta redução na magnitude de velocidade com a resposta ao degraú de carga aplicada entre os instantes de 2,5 a 3,5 segundos de 0 N.m a 10 N.m. A aplicação do degraú de carga aumenta a magnitude de corrente trifásica e dq.

3.2.2.2 Degrau de Conjugado de 0 N.m para -10 N.m

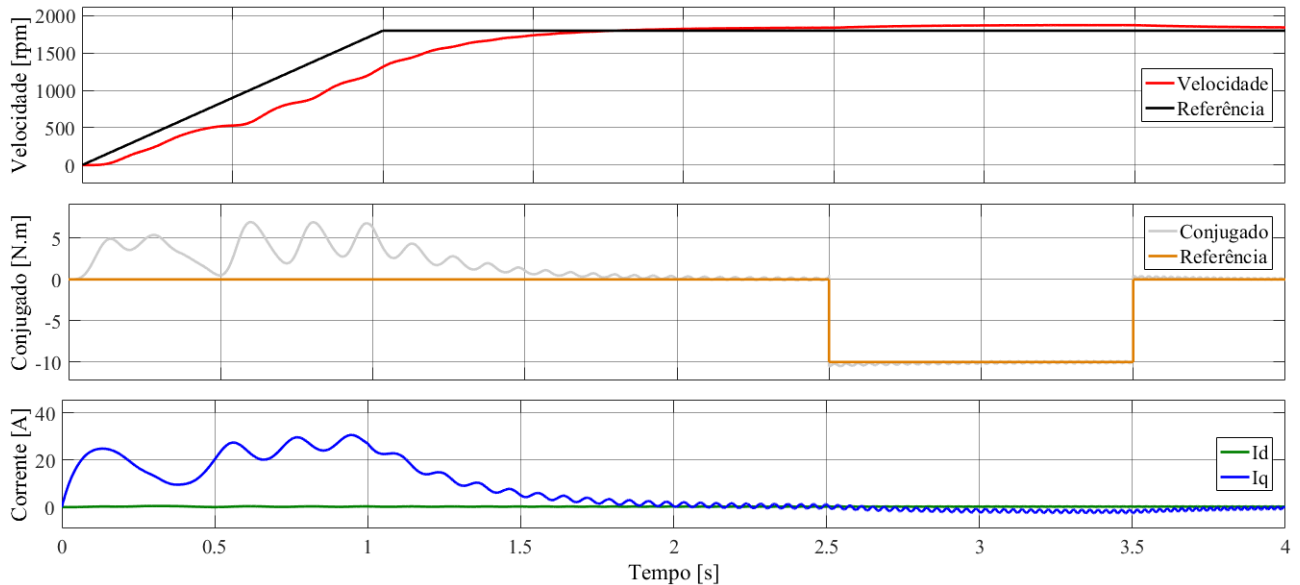


Figura 24: Resultado de simulação computacional para degraude carga de 0 N.m a -10 N.m.

Fonte: Autor.

A corrente do estator trifásica para retirada de carga é apresentada na Figura 25:

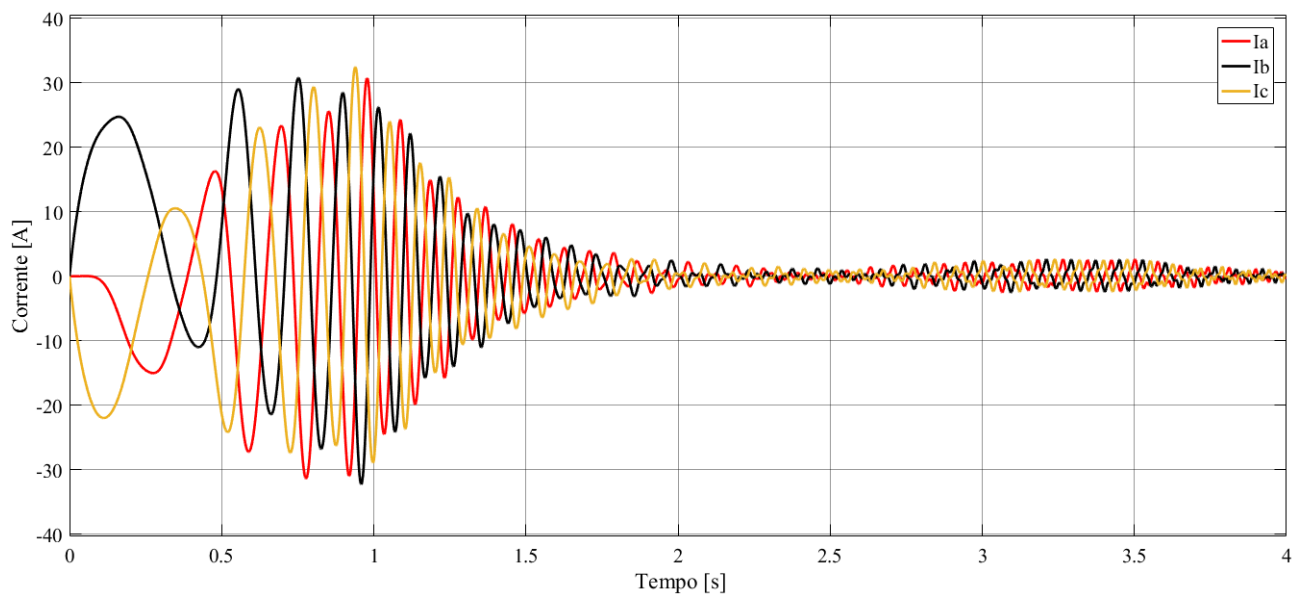


Figura 25: Corrente trifásica do estator para degraude carga de 0 N.m a -10 N.m.

Fonte: Autor.

Na Figura 24 a velocidade possui aumento em magnitude com efeito da retirada de carga do eixo do motor. O sistema de controle por sua vez atua para velocidade manter-se igual a referência, elevando, dessa forma, o nível da corrente do estator como apresenta a

Figura 25. A corrente de eixo direto e quadratura por sua vez apresenta comportamento semelhante ao obtido pela produção de conjugado.

Os resultados apresentados apresentaram boa resposta a variação de conjugado. A velocidade e conjugado possuem correlação nos resultados, para mudanças no perfil do conjugado a velocidade apresenta alterações em sua magnitude. Nos resultados apresentados a corrente de partida obteve, aproximadamente, 5 vezes o valor nominal e sua magnitude obteve valores conforme aceleração, desaceleração ou degrau de carga.

Conclusão

A popularização dos SynRMs nos estudos acadêmicos e ascensão nas aplicações de sistemas de bombeamento industrial e em sistemas de tração tornaram esse motor competitivo aos motores elétricos convencionais tais como Motores de Indução e de Corrente Contínua. Em virtude disso, estudos direcionados às técnicas de projeto e princípio de funcionamento tornam-se essenciais para contribuições e entendimento das mesmas.

Dessa forma, o presente trabalho apresenta o estudo de desempenho dinâmico do SynRM a partir da abordagem das técnicas de projeto e simulação computacional do modelo elétrico e matemático. Nesse sentido, o estudo sobre os rotores do SynRM baseou-se no desenvolvimento de simulação em elementos finitos. Esta etapa, permitiu analisar diferentes gerações de geometrias de rotores por meio da melhor distribuição de campo magnético na região do rotor. A geometria do rotor Transversalmente Laminado Moderno apresentou melhor distribuição e escoamento de fluxo magnético em relação aos outros modelos de geometrias.

Dentre as diferentes gerações de rotores, a escolha do tipo de rotor possibilita melhores desempenhos de produção de conjugado e fator de potência máximo, evidenciado pelas razões entre as indutâncias de eixo direto e quadratura.

A partir disso, o modelo matemático do motor é apresentado e utilizado como apoio para elaboração de uma simulação computacional. A representação do motor em ambiente computacional tornou possível o estudo do motor sobre diferentes cenários de aplicação.

Os resultados apresentaram boa produção de conjugado e boa resposta a rampa de velocidade e ao degrau de carga devido à eficiência do controlador IFOC. O monitoramento em tempo real da velocidade permitiu compensar a inserção ou retirada de carga bem como a operação do motor em velocidades variáveis.

O motor apresentou baixa magnitude de corrente durante partida, mudança de velocidade e variação de carga no eixo tornando-o capaz de operar em elevadas temperaturas. O SynRM apresentou, nos resultados obtidos, conjugado médio elevado com níveis

moderados de oscilação. Além disso, o motor mostrou-se favorável a operação em faixa de velocidade, mantendo boa produção de conjugado e, dessa forma, aspectos interessantes para aplicações em sistemas de bombeamento industrial, têxtil e veículos elétricos de mobilidade reduzida, aplicações que exigem elevado densidade de conjugado e boa resposta a variação da velocidade.

4.1 Sugestão de trabalhos futuros

Como sugestão de futuros trabalhos, destacam-se as atividades listadas a seguir:

- Implementação de simulação computacional em tempo discreto;
- Montagem de bancada de acionamento para o SynRM com técnica de controle IFOC;
- Análise comparativa de desempenho do SynRM em relação a diferentes gerações de rotores;
- Estudo de viabilidade do SynRM operando em faixa de velocidade e em veículos de mobilidade reduzida;
- Comparativo de eficiência entre o SynRM e IM como conjugado, correntes, componentes harmônicas e análise térmica.

Referências

- ALMEIDA, A. T. D.; FERREIRA, F. J.; BAOMING, G. Beyond induction motors—technology trends to move up efficiency. **IEEE transactions on industry applications**, IEEE, v. 50, n. 3, p. 2103–2114, 2013.
- ARAFAT, A. **ANALYSIS AND CONTROL OF FIVE-PHASE PERMANENT MAGNET ASSISTED SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR DRIVE UNDER FAULTS**. Tese (Doutorado) — University of Akron, 2018.
- BALTZIS, K. The femm package: A simple, fast, and accurate open source electromagnetic tool in science and engineering. **Journal of Engineering Science & Technology Review**, v. 1, n. 1, 2008.
- BALTZIS, K. B. The finite element method magnetics (femm) freeware package: May it serve as an educational tool in teaching electromagnetics? **Education and Information Technologies**, Springer, v. 15, n. 1, p. 19–36, 2010.
- BERNARDELI, V. R.; ALVES, D.; SOUSA, W. G.; FREITAS, D. Controle de conjugado em motores a relutância variável multifásicos. Universidade Federal de Uberlândia, 2008.
- BERNARDO, F.; SILVA, G.; GRITZ, M.; FERRO, M.; SCHULZE, B. Avaliação do consumo de energia e o impacto da emissão de co2 para algoritmos de inteligência artificial. In: SBC. **Anais do XIV Brazilian e-Science Workshop**. [S.l.], 2020. p. 81–88.
- BETZ, R.; JOVANOVIĆ, M.; LAGERQUIST, R.; MILLER, T. Aspects of the control of synchronous reluctance machines including saturation and iron losses. In: IEEE. **Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting**. [S.l.], 1992. p. 456–463.
- BETZ, R. E.; JOVANOVIĆ, M. G. Theoretical analysis of control properties for the brushless doubly fed reluctance machine. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, IEEE, v. 17, n. 3, p. 332–339, 2002.
- BIANCHI, R.; ANDRADE, D. Projeto, modelagem e levantamento de curva de indutância de máquina a relutância variável 8x6 utilizando elementos finitos. In: **XI Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica-XI CBQEE. Campina Grande-PB**. [S.l.: s.n.], 2015.

BOLOGNANI, S.; PERETTI, L.; ZIGLIOTTO, M. Online mtpa control strategy for dtc synchronous-reluctance-motor drives. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 26, n. 1, p. 20–28, 2010.

BONNETT, A. H.; ALBERS, T. Squirrel cage rotor options for ac induction motors. In: IEEE. **Conference Record of 2000 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (Cat. No. 00CH37111)**. [S.l.], 2000. p. 54–67.

BRANCO, R. M. L. R. **Modelação e simulação de motores síncronos de relutância**. Dissertação (Mestrado), 2015.

CASTAGNINI, A.; MAGGI, M.; TERMINI, P.; VETUSCHI, M. Efficiency and regulations: Pm-assisted synchronous reluctance motors as a sustainable industrial solution. In: IEEE. **2015 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)**. [S.l.], 2015. p. 72–78.

CAVALEIRO, D. E. S. **Motor síncrono de relutância para sistemas de tração de veículos elétricos**. Dissertação (Mestrado), 2015.

CHEN, C.-G.; LIU, T.-H.; LIN, M.-T.; TAI, C.-A. Position control of a sensorless synchronous reluctance motor. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 51, n. 1, p. 15–25, 2004.

DIAS, C. G. **Proposta de um novo método para detecção de barras rompidas em motores de indução com rotor de gaiola**. Tese (Doutorado) — Tese de doutorado, USP, 2006.

DIAS, R. J. Motores a relutância variável 6x4 e 6x6. estudo comparativo de operação e desempenho. Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

ENERGÉTICA, E. de P. Anuário estatístico de energia elétrica. In: EPE. **Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>**. [S.l.], 2020.

FELLANI, M. A.; ABAID, D. E. Matlab/simulink-based transient stability analysis of a sensorless synchronous reluctance motor. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 68, p. 1472–1476, 2010.

FERRARI, M.; BIANCHI, N.; DORIA, A.; FORNASIERO, E. Design of synchronous reluctance motor for hybrid electric vehicles. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, v. 51, n. 4, p. 3030–3040, 2015.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D.; JAMES, B. **Electric machinery**. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 2003. v. 5.

FONG, W.; HTSUI, J. New type of reluctance machine. **Proc. Inst. Elect. Eng**, v. 117, n. 3, p. 545–551, 1970.

FRATTA, A.; VAGATI, A. A reluctance motor drive for high dynamic performance application. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, v. 28, n. 4, p. 873–879, 1992.

- GABBI, T. S.; VIEIRA, R. Controle por modos deslizantes e observador de distúrbios aplicados ao motor síncrono de ímãs permanentes. Universidade Federal de Santa Maria, 2015.
- GAMBA, M.; PELLEGRINO, G.; VAGATI, A.; VILLATA, F. Design of a line-start synchronous reluctance motor. In: IEEE. **2013 International Electric Machines & Drives Conference**. [S.l.], 2013. p. 648–655.
- GERADA, D.; MEBARKI, A.; BROWN, N. L.; GERADA, C.; CAVAGNINO, A.; BOGLIETTI, A. High-speed electrical machines: Technologies, trends, and developments. **IEEE transactions on industrial electronics**, IEEE, v. 61, n. 6, p. 2946–2959, 2013.
- HAATAJA, J. A comparative performance study of four-pole induction motors and synchronous reluctance motors in variable speed drives. 2003.
- HASEGAWA, M.; KITAHARA, H.; MATSUMOTO, A. Position sensorless torque estimation of synchronous reluctance motors based on extended-flux model without core-loss measurement. **Journal of Energy and Power Engineering**, David Publishing Company, Inc., v. 6, n. 9, p. 1480, 2012.
- HOFMANN, H. F.; SANDERS, S. R.; EL-ANTABLY, A. Stator-flux-oriented vector control of synchronous reluctance machines with maximized efficiency. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 51, n. 5, p. 1066–1072, 2004.
- IM, J.-B.; KIM, W.; KIM, K.; JIN, C.-S.; CHOI, J.-H.; LEE, J. Inductance calculation method of synchronous reluctance motor including iron loss and cross magnetic saturation. **IEEE Transactions on Magnetics**, IEEE, v. 45, n. 6, p. 2803–2806, 2009.
- JEONG, Y.-H.; KIM, K.; KIM, Y.-J.; PARK, B.-S.; JUNG, S.-Y. Design characteristics of pma-synrm and performance comparison with ipmsm based on numerical analysis. In: IEEE. **2012 XXth International Conference on Electrical Machines**. [S.l.], 2012. p. 164–170.
- KOSTKO, J. Polyphase reaction synchronous motors. **Journal of the American Institute of Electrical Engineers**, IEEE, v. 42, n. 11, p. 1162–1168, 1923.
- KRAUSE, P. C.; WASYNCHUK, O.; SUDHOFF, S. D.; PEKAREK, S. **Analysis of electric machinery and drive systems**. [S.l.]: Wiley Online Library, 2002. v. 2.
- KRISHNAN, R. **Electric motor drives: modeling, analysis and control**. [S.l.]: Prentice Hall, 2001.
- LAWRENSEN, P.; STEPHENSON, J.; BLENKINSOP, P.; CORDA, J.; FULTON, N. Variable-speed switched reluctance motors. In: IET. **IEE Proceedings B (Electric Power Applications)**. [S.l.], 1980. v. 127, n. 4, p. 253–265.
- LEE, S.-H.; LEE, H.-J.; HONG, C.; YOON, Y.-D. Flux weakening control for synchronous reluctance machines based on parameters estimated at stand-still. In: IEEE. **2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**. [S.l.], 2018. p. 6128–6134.
- LIMA, K. Transformada de clarke e park. **Centro de Tecnologia Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Aplicações de Eletrônica de Potência em Sistemas de Potência**. Departamento de Engenharia Elétrica. Ceará, v. 6, 2018.

LIU, Y.-C.; LAGHROUCHE, S.; N'DIAYE, A.; CIRRINCIONE, M. Active-flux-based super-twisting sliding mode observer for sensorless vector control of synchronous reluctance motor drives. In: IEEE. **2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)**. [S.l.], 2018. p. 1–7.

MALTA, D. C.; SZWARCOWALD, C. L.; BARROS, M. B. d. A.; GOMES, C. S.; MACHADO, Í. E.; JÚNIOR, P. R. B. d. S.; ROMERO, D. E.; LIMA, M. G.; DAMACENA, G. N.; PINA, M. d. F. A pandemia da covid-19 e as mudanças no estilo de vida dos brasileiros adultos: um estudo transversal, 2020. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, SciELO Public Health, v. 29, p. e2020407, 2020.

MATSUO, T.; LIPO, T. A. Rotor position detection scheme for synchronous reluctance motor based on current measurements. In: IEEE. **Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting**. [S.l.], 1994. v. 1, p. 627–634.

MEEKER, D. Finite element method magnetics. **FEMM**, v. 4, p. 32, 2010.

MOGHADDAM, R. R. Synchronous reluctance machine (synrm) design. **Mater's Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden**, 2007.

MUTEBA, M.; TWALA, B.; NICOLAE, D. Torque ripple minimization in synchronous reluctance motor using a sinusoidal rotor lamination shape. In: IEEE. **2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)**. [S.l.], 2016. p. 606–611.

NEUMANN, J.; HENAU, C.; FADEL, M.; PRIETO, D.; FOURNIER, E.; YAMDEU, M. T. Improved dq model and analytical parameters determination of a permanent magnet assisted synchronous reluctance motor (pma-synrm) under saturation using frozen permeability method. In: IEEE. **2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)**. [S.l.], 2020. v. 1, p. 481–487.

ÖNEL, I. Y.; BENBOUZID, M. E. H. Induction motor bearing failure detection and diagnosis: Park and concordia transform approaches comparative study. **IEEE/ASME Transactions on mechatronics**, IEEE, v. 13, n. 2, p. 257–262, 2008.

PANCORBO, S. D.; UGALDE, G.; POZA, J.; EGEA, A. Comparative study between induction motor and synchronous reluctance motor for electrical railway traction applications. In: IEEE. **2015 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC)**. [S.l.], 2015. p. 1–5.

PARK, J.; KIM, B.; YANG, J.; LEE, S. B.; WIEDENBRUG, E. J.; TESKA, M.; HAN, S. Evaluation of the detectability of broken rotor bars for double squirrel cage rotor induction motors. In: IEEE. **2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition**. [S.l.], 2010. p. 2493–2500.

PYRHONEN, J.; HRABOVCOVA, V.; SEMKEN, R. S. **Electrical machine drives control: An introduction**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016.

RANGEL-MAGDALENO, J.; PEREGRINA-BARRETO, H.; RAMIREZ-CORTES, J.; CRUZ-VEGA, I. Hilbert spectrum analysis of induction motors for the detection of incipient broken rotor bars. **Measurement**, Elsevier, v. 109, p. 247–255, 2017.

SANTOS JR, J. A. Construção, acionamento, controle e análise de desempenho dinâmico de um motor síncrono a relutância. Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

SANTOS JR, J. A.; ANDRADE, D. A. D.; SOUSA, W. G.; FREITAS, M. A. A. D.; VIAJANTE, G. P.; FILHO, M. J. M.; OLIVEIRA, C. A. D.; OLIVEIRA SILVA, P. D. Construção e ensaio dinâmico de um motor síncrono a relutância sem gaiola de esquilo. **Anais da Sociedade Brasileira de Automática**, v. 1, n. 1, 2019.

SCALCON, F. P.; PADILHA, R. Contribuições ao acionamento e controle dos motores de relutância variável e síncrono de relutância. Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

SILVA JR, S. C. d. **Controlo de um motor síncrono de relutância numa gama alargada de velocidades**. Tese (Doutorado) — Universidade de Coimbra, 2018.

SPARGO, C.; MECROW, B.; WIDMER, J. Design of a synchronous reluctance motor with non-overlapping fractional-slot concentrated windings. In: IEEE. **2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**. [S.l.], 2014. p. 1393–1399.

TOLBERT, L. M.; PENG, F. Z.; HABETLER, T. G. Multilevel converters for large electric drives. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, v. 35, n. 1, p. 36–44, 1999.

XU, L.; XU, X.; LIPO, T. A.; NOVOTNY, D. W. Vector control of a synchronous reluctance motor including saturation and iron loss. **IEEE transactions on industry applications**, IEEE, v. 27, n. 5, p. 977–985, 1991.

Apêndices

Artigos publicados

O desenvolvimento desse trabalho possibilitou a publicação de artigos científicos em congressos nacionais e internacionais, dos quais destacam-se:

- SILVA, P. H. A. S. E. ; VIAJANTE, G. P. ; SANTOS Jr., J. A. ; FREITAS, M. A. A. ; CABRAL, M. M. ; WESZ, L. G. . Dynamic Performance Analysis of the Interior Permanent Magnet Synchronous Motor in Vehicle Applications. In: **18th International Conference on Renewable Energies and Power Quality - ICREPQ'20, 2020, Tenerife**. 18th International Conference on Renewable Energies and Power Quality - ICREPQ'20, 2020.
- SILVA, P. H. A. S. E.; SANTOS, J.A.; FREITAS, M. A. A.; VIAJANTE, G. P.; Simulação e análise de desempenho dinâmico do Motor Síncrono a Relutância. **XVIII CEEL – Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia-UFU**, ano 2019, v. XVIII, p. 1-6, 29 jan. 2020.
- SANTOS, J.A.; ALVES ANDRADE, DARIZON ; SOUZA, W. G. ; FREITAS, M. A. A. ; VIAJANTE, G. P. ; MORAES FILHO, M. J. ; OLIVEIRA, C. A. ; **SILVA, P. H. A. S. E.** ; OLIVEIRA, E. C. M. S. . CONSTRUÇÃO E ENSAIO DINÂMICO DE UM MOTOR SÍNCRONO A RELUTÂNCIA SEM GAIOLA DE ESQUILO. In: **XXII Congresso Brasileiro de Automática, 2018, João Pessoa**. Congresso Brasileiro de Automática, 2018.

Anexos

Características do Aço-Silício.

A.0.1 Valores de referência da curva BXH

A simulação do motor depende das características construtivas do material. O material do rotor utilizado é o aço-silício e possui alta permeabilidade magnética, capaz escoar o campo magnético no sentido do fluxo magnético. Foram adotados os seguintes valores de campo magnético em função do fluxo para frequência de 60 Hz:

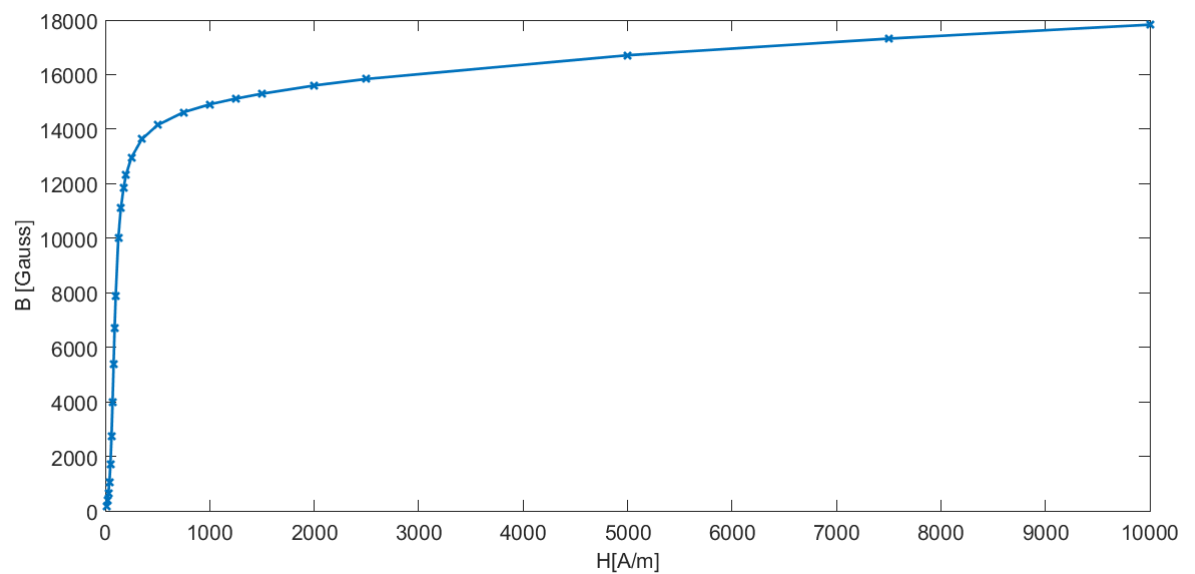


Figura 26: Curva BxH

Tabela 5: Curva BxH para frequência de 60 Hz.

B[Gauss]	H [A/m]
160	10
370	20
660	30
1060	40
1710	50
2720	60
3990	70
5370	80
6720	90
7890	100
10000	125
11130	150
11840	175
12340	200
12960	250
13630	350
14150	500
14620	750
14910	1000
15120	1250
15300	1500
15600	2000
15840	2500
16710	5000
17320	7500
17830	10000

A.0.2 Rotina computacional para simulação em elementos finitos.

A etapa de simulação em elementos finitos do SynRM foi utilizado o \textit{script} a seguir:

```
[Format]      = 4.0
[Frequency]   = 60
[Precision]   = 1e-008
[MinAngle]    = 30
[DoSmartMesh] = 1
[Depth]       = 1025
[LengthUnits] = millimeters
[ProblemType] = planar
[Coordinates] = cartesian
```

```

[ACSolver]      = 0
[PrevType]      = 0
[PrevSoln]      = ""
[PointProps]    = 0
[BdryProps]     = 1
<BeginBdry>
<BdryName> = "New Boundary"
<BdryType> = 0
<A_0> = 0
<A_1> = 0
<A_2> = 0
<Phi> = 0
<c0> = 0
<c0i> = 0
<c1> = 0
<c1i> = 0
<Mu_ssd> = 0
<Sigma_ssd> = 0
<innerangle> = 0
<outerangle> = 0
<EndBdry>
[BlockProps]    = 10
<BeginBlock>
<BlockName> = "air"
<Mu_x> = 1
<Mu_y> = 1
<H_c> = 0
<H_cAngle> = 0
<J_re> = 0
<J_im> = 0
<Sigma> = 0
<d_lam> = 0
<Phi_h> = 0
<Phi_hx> = 0
<Phi_hy> = 0
<LamType> = 0
<LamFill> = 1
<NStrands> = 0
<WireD> = 0

```

```
<BHPoints> = 0
<EndBlock>
<BeginBlock>
<BlockName> = "steel"
<Mu_x> = 30
<Mu_y> = 30
<H_c> = 0
<H_cAngle> = 0
<J_re> = 0
<J_im> = 0
<Sigma> = 3.7200000000000002
<d_lam> = 0
<Phi_h> = 0
<Phi_hx> = 0
<Phi_hy> = 0
<LamType> = 0
<LamFill> = 1
<NStrands> = 0
<WireD> = 0
<BHPoints> = 0
<EndBlock>
<BeginBlock>
<BlockName> = "Aluminum"
<Mu_x> = 1
<Mu_y> = 1
<H_c> = 0
<H_cAngle> = 0
<J_re> = 0
<J_im> = 0
<Sigma> = 37.200000000000003
<d_lam> = 0
<Phi_h> = 0
<Phi_hx> = 0
<Phi_hy> = 0
<LamType> = 0
<LamFill> = 1
<NStrands> = 0
<WireD> = 0
<BHPoints> = 0
```

```
<EndBlock>
<BeginBlock>
<BlockName> = "A+"
<Mu_x> = 1
<Mu_y> = 1
<H_c> = 0
<H_cAngle> = 0
<J_re> = 5.5370820559852998
<J_im> = -0.011266730972486389
<Sigma> = 0
<d_lam> = 0
<Phi_h> = 0
<Phi_hx> = 0
<Phi_hy> = 0
<LamType> = 0
<LamFill> = 1
<NStrands> = 0
<WireD> = 0
<BHPoints> = 0
<EndBlock>
<BeginBlock>
<BlockName> = "A-"
<Mu_x> = 1
<Mu_y> = 1
<H_c> = 0
<H_cAngle> = 0
<J_re> = -5.5370820559852998
<J_im> = 0.011266730972486389
<Sigma> = 0
<d_lam> = 0
<Phi_h> = 0
<Phi_hx> = 0
<Phi_hy> = 0
<LamType> = 0
<LamFill> = 1
<NStrands> = 0
<WireD> = 0
<BHPoints> = 0
<EndBlock>
```



```

<BeginBlock>
<BlockName> = "B+"
<Mu_x> = 1
<Mu_y> = 1
<H_c> = 0
<H_cAngle> = 0
<J_re> = -2.7555243665664491
<J_im> = 3.0707019732288372
<Sigma> = 0
<d_lam> = 0
<Phi_h> = 0
<Phi_hx> = 0
<Phi_hy> = 0
<LamType> = 0
<LamFill> = 1
<NStrands> = 0
<WireD> = 0
<BHPoints> = 0
<EndBlock>
<BeginBlock>
<BlockName> = "B-"
<Mu_x> = 1
<Mu_y> = 1
<H_c> = 0
<H_cAngle> = 0
<J_re> = 2.7555243665664491
<J_im> = -3.0707019732288372
<Sigma> = 0
<d_lam> = 0
<Phi_h> = 0
<Phi_hx> = 0
<Phi_hy> = 0
<LamType> = 0
<LamFill> = 1
<NStrands> = 0
<WireD> = 0
<BHPoints> = 0
<EndBlock>
<BeginBlock>

```

```
<BlockName> = "C+"
<Mu_x> = 1
<Mu_y> = 1
<H_c> = 0
<H_cAngle> = 0
<J_re> = -2.784787154306041
<J_im> = -3.0537863749489991
<Sigma> = 0
<d_lam> = 0
<Phi_h> = 0
<Phi_hx> = 0
<Phi_hy> = 0
<LamType> = 0
<LamFill> = 1
<NStrands> = 0
<WireD> = 0
<BHPoints> = 0
<EndBlock>
<BeginBlock>
<BlockName> = "C-"
<Mu_x> = 1
<Mu_y> = 1
<H_c> = 0
<H_cAngle> = 0
<J_re> = 2.784787154306041
<J_im> = 3.0537863749489991
<Sigma> = 0
<d_lam> = 0
<Phi_h> = 0
<Phi_hx> = 0
<Phi_hy> = 0
<LamType> = 0
<LamFill> = 1
<NStrands> = 0
<WireD> = 0
<BHPoints> = 0
<EndBlock>
<BeginBlock>
<BlockName> = "M-19 Steel"
```

```
<Mu_x> = 4416  
<Mu_y> = 4416  
<H_c> = 0  
<H_cAngle> = 0  
<J_re> = 0  
<J_im> = 0  
<Sigma> = 1.8999999999999999  
<d_lam> = 0.63500000000000001  
<Phi_h> = 0  
<Phi_hx> = 0  
<Phi_hy> = 0  
<LamType> = 0  
<LamFill> = 0.97999999999999998  
<NStrands> = 0  
<WireD> = 0  
<BHPoints> = 27  
<EndBlock>
```