
Estimador de Conjugado Eletromagnético em tempo real a partir da Indutância Instantânea da Máquina a Relutância Variável

Ricardo Tirone Fidelis



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Uberlândia
2025

Ricardo Tirone Fidelis

**Estimador de Conjugado Eletromagnético em
tempo real a partir da Indutância Instantânea
da Máquina a Relutância Variável**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Luciano Coutinho Gomes
Coorientador: Ghunter Paulo Viajante

Uberlândia
2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

F451 Fidelis, Ricardo Tirone, 1986-
2025 Estimador de Conjugado Eletromagnético em tempo real a
partir da Indutância Instantânea da Máquina a Relutância
Variável [recurso eletrônico] / Ricardo Tirone Fidelis.
- 2025.

Orientador: Luciano Coutinho Gomes.
Coorientador: Ghunter Paulo Viajante.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2025.285>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia elétrica. I. Gomes, Luciano Coutinho ,
1972-, (Orient.). II. Viajante, Ghunter Paulo,1976-,
(Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia.
Pós-graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP
38400-902

Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - cobel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica			
Defesa de:	Tese de Doutorado, 347 , PPGEELT			
Data:	Vinte e nove de Maio de Dois mil e vinte e cinco	Hora de início:	9h00	Hora de encerramento: 11h30
Matrícula do Discente:	11923EEL001			
Nome do Discente:	Ricardo Tirone Fidelis			
Título do Trabalho:	Estimador de Conjugado Eletromagnético em tempo real a partir da Indutância Instantânea da Máquina a Relutância Variável			
Área de concentração:	Sistemas de Energia Elétrica			
Linha de pesquisa:	Sistemas Elétricos de Potência			
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Luciano Coutinho Gomes . Título do projeto: Modelagem Dinâmica no Domínio da Fase e Otimização da Estratégia de Controle Direto de Potência de Geradores Eólicos Baseados na Máquina de Indução Duplamente Alimentada Operando sob Distúrbios de Tensão no Ponto de Conexão. Agência financiadora: FAPEMIG. Número do processo na agência financiadora: APQ-01989-22. Vigência do projeto: 13/09/2022 a 12/09/2025.			

Reuniu-se através de videoconferência, a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

Doutores: Darizon Alves de Andrade (UFU), Ghunter Paulo Viajante (IFG), João Onofre Pereira Pinto (ORNL), João Paulo Bonifácio (ZF) e Luciano Coutinho Gomes, orientador do discente.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

APROVADO.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor. O

competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Luciano Coutinho Gomes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/05/2025, às 11:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Joao Paulo Vieira Bonifacio, Usuário Externo**, em 29/05/2025, às 11:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ghunter Paulo Viajante, Usuário Externo**, em 29/05/2025, às 11:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Joao Onofre Pereira Pinto, Usuário Externo**, em 29/05/2025, às 11:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Darizon Alves de Andrade, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/05/2025, às 11:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6295653** e o código CRC **E32E7C9E**.

Agradecimentos

A realização deste trabalho foi possível graças ao apoio e à dedicação de muitas pessoas, às quais sou eternamente grato.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), meu agradecimento pelo ambiente acolhedor e pela estrutura oferecida, fundamentais para esta etapa da minha trajetória.

Ao Laboratório de Acionamentos Elétricos e Eletrônicos (LAcE), minha gratidão pelo suporte técnico, pela infraestrutura e por se tornar um espaço de aprendizado e crescimento.

Aos amigos e colegas Marcos José de Moraes Filho e Vitor Henrique da Cunha Faria, agradeço não apenas pela colaboração e pelas ideias, mas principalmente pela parceria e apoio em todos os momentos.

Agradeço aos amigos e companheiros Fabrício Ferreira Mendonça e Luis Carlos Martins Pereira, pelo incentivo e motivação constante que, em momentos decisivos, foram determinantes para a continuidade desta jornada.

Ao SENAI, minha gratidão sincera por acreditar no meu potencial, apoiar esta jornada e flexibilizar minha rotina de trabalho, permitindo que eu me dedicasse verdadeiramente a este sonho.

Sou especialmente grato aos professores e mentores Luciano Coutinho Gomes e Ghunter Paulo Viajante, por toda a orientação, confiança e ensinamentos que deixaram marcas profundas em minha formação.

À minha família, agradeço pelo amor, compreensão e apoio incondicional, que foram essenciais para que eu pudesse enfrentar e vencer os desafios dessa caminhada.

A todos que, de alguma maneira, estenderam suas mãos, seu tempo e seu carinho durante esta caminhada, deixo meu mais sincero "muito obrigado".

*“E se você me perguntasse,
depois de tudo o que passamos,
"Ainda acredita em magia?"
Oh, sim, eu acredito.”*

COLDPLAY, *Magic*, 2014

Resumo

Esta tese propõe uma metodologia inovadora para a estimação do conjugado eletromagnético em Máquinas a Relutância Variável (MRVs) em tempo real, utilizando a indutância instantânea como parâmetro chave. O método baseia-se na modelagem da superfície de indutância gerada pela variação angular do rotor e corrente de excitação, resultando em uma expressão polinomial diferenciável capaz de ser implementada de forma eficiente em processadores de baixo desempenho. A partir da indutância estimada, é possível calcular, em tempo real, o fluxo magnético, a potência e o rendimento da máquina. O trabalho inclui o desenvolvimento de modelos analíticos, simulações computacionais e validação experimental em bancada dedicada, abrangendo diferentes condições de carga, velocidade e tensão de alimentação. Os resultados demonstram a viabilidade e a precisão do método proposto, reforçando seu potencial para aplicações industriais em controle de MRVs. A tese também discute as limitações do método e propõe direções para pesquisas futuras.

Palavras-chave: Máquina a Relutância Variável; Estimativa de Conjugado; Modelagem de Indutância; Instrumentação Virtual; Controle em Tempo Real..

Abstract

This thesis proposes an innovative methodology for real-time estimation of electromagnetic torque in Switched Reluctance Machines (SRMs), using instantaneous inductance as the key parameter. The method is based on modeling the inductance surface generated by the rotor's angular position and excitation current, resulting in a differentiable polynomial expression suitable for implementation on low-performance processors. From the estimated inductance, magnetic flux, power, and efficiency can also be calculated in real time. The work includes the development of analytical models, computational simulations, and experimental validation on a dedicated test bench under varying load, speed, and supply voltage conditions. The results confirm the feasibility and accuracy of the proposed method, highlighting its potential for industrial SRM control applications. The thesis also addresses the method's limitations and suggests directions for future research.

Keywords: Switched Reluctance Machine; Torque Estimation; Inductance Modeling; Virtual Instrumentation; Real-Time Control..

Lista de ilustrações

Figura 1 – Estrutura de uma MRV 8x6.	35
Figura 2 – Perfil de indutância típico de uma MRV.	36
Figura 3 – Perfil de fluxo em função da posição angular.	38
Figura 4 – Perfil de fluxo em função da posição angular para diversos valores de corrente.	39
Figura 5 – Perfil do conjugado em função da posição angular para diversos valores de corrente.	39
Figura 6 – Representação do circuito de uma fase da MRV.	41
Figura 7 – Superfície de Indutância de uma MRV; (a) MRV 6x4; (b) MRV 8x6 . .	46
Figura 8 – Curvas de Indutância; (a) MRV 6x4; (b) MRV 8x6	47
Figura 9 – Curvas de Indutância; (a) MRV 6x4; (b) MRV 8x6	47
Figura 10 – Circuito eletromagnético	48
Figura 11 – Circuito eletromagnético	49
Figura 12 – Circuito eletromagnético - Caminho preferencial do fluxo magnético . .	51
Figura 13 – Representação do circuito magnético da MRV.	52
Figura 14 – Representação simplificada do circuito magnético da MRV.	52
Figura 15 – Comportamento do entreferro.	53
Figura 16 – Determinação de lg para o momento de alinhamento dos polos do rotor e estator.	54
Figura 17 – Dimensões físicas da MRV.	55
Figura 18 – Dimensões da MRV e área considerada para o entreferro.	55
Figura 19 – Análise do angulo da base do polo do rotor.	56
Figura 20 – Representação do rotor.	56
Figura 21 – Curvas do rotor no formato polar e cartesiano.	57
Figura 22 – Área de interesse, considerada na determinação do entreferro.	58
Figura 23 – Variação do entreferro.	59
Figura 24 – Divisão da área do entreferro.	59
Figura 25 – Circuito equivalente com a divisão do entreferro em regiões.	60

Figura 26 – Relutância magnética com a variação do entreferro.	62
Figura 27 – Relutância magnética com a variação da corrente.	62
Figura 28 – Superfície de Indutância obtida pelo método analítico.	63
Figura 29 – Interface do software FEMM.	64
Figura 30 – Cluster de computadores para calculo dos elementos finitos.	66
Figura 31 – Tela apresentada no pós processamento.	67
Figura 32 – Curva obtida com o FEM.	67
Figura 33 – Interface do algoritmo desenvolvido para calculo da indutância.	68
Figura 34 – Resultado obtido - Maquina 01. (a) Curva obtida por elementos finitos; (b) Curva obtida pelo algoritmo; (c) Superfície obtida por elementos finitos; (d) superfície obtida pelo algoritmo	70
Figura 35 – Superfície de Indutância de uma Máquina a Relutância Variável 8/6 obtida por Elementos Finitos	72
Figura 36 – Curvas de nível obtida a partir da superfície de Indutância	72
Figura 37 – (a) Superfície obtida por F.E.M e $L_p(i)$; (b) Superfície normalizada e $l_p(\theta)$	74
Figura 38 – (a) $L_p(i)$; (b) $l_p(\theta)$; (c) $[L_p(i)]^T \times [l_p(\theta)]$	74
Figura 39 – Forma geral do método de interpolação	75
Figura 40 – Pontos de Entrada para obtenção dos coeficientes; (a)Curva $L_p(i)$; (b) Curva $l_p(\theta)$	79
Figura 41 – (a) $L_r(i, \theta)$; (b) $L_r(i, \theta)$; (c) $L_r(\theta)$.(d) $l_r(i)$	80
Figura 42 – Fluxo Magnético Obtido	82
Figura 43 – Tela principal da simulação	86
Figura 44 – Tela principal da simulação	87
Figura 45 – Diagrama de blocos da fonte	88
Figura 46 – Topologia do conversor half-bridge para a MRV 8x6	89
Figura 47 – Conversor Half Bridge	90
Figura 48 – Diagrama de blocos para acionamento da MRV na simulação	91
Figura 49 – Sensor de posição	92
Figura 50 – Controle de corrente	93
Figura 51 – Diagrama de blocos do sistema de controle implementado	93
Figura 52 – Diagramas de Blocos para Instrumentação	94
Figura 53 – Diagrama de blocos simplificado da estratégia de controle implementada	96
Figura 54 – Representação da atuação do controlador de corrente; (a) sinais de tensão, corrente e pulsos de ativação das chaves IGBT; (b) Corrente nas fases da máquina.	97
Figura 55 – Formas de onda para a tensão e corrente nas fases da MRV; (a) Tensão; (b) Corrente.	98

Figura 56 – Indutância calculada a partir do estimador; (a) Indutância para as quatro fases da MRV; (b) Derivada da indutância para as quatro fases.	99
Figura 57 – Comparação entre a indutância e fluxo estimado e simulado; (a) Indutância para as quatro fases da MRV; (b) Fluxo para as quatro fases.	99
Figura 58 – Conjugado instantâneo da MRV; (a) Conjugado instantâneo estimado para cada uma das fases da MRV; (b) Comparação entre o conjugado instantâneo estimado e simulado.	100
Figura 59 – Valores médios de conjugado, potência e rendimento; (a) Conjugado médio; (b) Potência média; (c) rendimento	101
Figura 60 – Perfil de velocidade durante a simulação.	102
Figura 61 – Comparação do conjugado instantâneo estimado e simulado.	103
Figura 62 – Valores Médios de Conjugado, potência e rendimento.	103
Figura 63 – Desempenho do estimador para variação da velocidade entre 500 e 3000RPM.	105
Figura 64 – Desempenho do estimador para variação da carga no eixo entre 1 e 6Nm.	106
Figura 65 – Diagrama de blocos com a nova estratégia de controle adotada para o controle de conjugado.	107
Figura 66 – Resultados obtidos para o controle de conjugado com variação na carga.	108
Figura 67 – Resultados obtidos para o controle de conjugado com degrau no set-point.	109
Figura 68 – Protótipo utilizado na plataforma experimental; (a) Visão geral da Máquina utilizada; (b) Vista interna da máquina.	112
Figura 69 – Módulo utilizado na construção do conversor de potência.	113
Figura 70 – Arranjo dos Módulos no conversor de potência.	114
Figura 71 – Circuito isolador optoacoplado.	114
Figura 72 – Fotografia da placa contendo os circuitos isoladores.	115
Figura 73 – Circuitos auxiliares do simulador de carga.	116
Figura 74 – Máquina a Relutância Variável acoplada do Motor/Gerador de Corrente Contínua.	116
Figura 75 – Controlador Utilizado na Plataforma Experimental; (a) Fotografia do controlador NI MyRIO 1900; (b) Esquema simplificado do controlador.	118
Figura 76 – Encoder Absoluto; (a) Fotografia do Encoder; (b) Placa condicionadora de sinais.	119
Figura 77 – Placa condicionadora de sinais para medição de corrente e tensão.	119
Figura 78 – Diagrama de blocos simplificado da estratégia de acionamento da MRV.	120
Figura 79 – Código embarcado para acionamento da MRV.	121
Figura 80 – Diagrama de blocos do sistema de controle de velocidade.	121
Figura 81 – Tensão utilizada durante o experimento	124

Figura 82 – Indutância estimada durante o acionamento	125
Figura 83 – Fluxo magnético estimado durante o acionamento	125
Figura 84 – conjugado instantâneo estimado	126
Figura 85 – Comparação entre os valores medidos e estimados para o conjugado médio.	126
Figura 86 – Comparação entre os valores obtidos para a potência de saída, medida e estimada.	127
Figura 87 – Comparação entre os valores obtidos para o rendimento, medido e estimado.	127
Figura 88 – Comparação entre os valores medidos e estimados com a variação da carga: (a) conjugado; (b) Potência; (c) Rendimento.	128
Figura 89 – Velocidade obtida para diferentes ângulos de ativação.	129
Figura 90 – conjugado instantâneo estimado para diferentes ângulos de ativação.	130
Figura 91 – conjugado médio estimado e medido para diferentes ângulos de ativação.	130
Figura 92 – Potência medida e estimada para diferentes ângulos de ativação.	131
Figura 93 – conjugado, potência e rendimento para diferentes ângulos de ativação.	132
Figura 94 – Velocidade da máquina durante o acionamento.	133
Figura 95 – Conjugado instantâneo estimado durante o experimento.	134
Figura 96 – Detalhamento do perfil pulsante do conjugado instantâneo estimado.	134
Figura 97 – Comparação entre o conjugado médio estimado e medido.	135
Figura 98 – Comparação entre a potência estimada e medida.	135
Figura 99 – Comparação entre o rendimento estimado e medido.	136
Figura 100–Conjugado durante o acionamento: comparação entre o conjugado estimado, conjugado medido e set-point.	137
Figura 101–Velocidade da máquina durante o acionamento.	138
Figura 102–Potência de saída: comparação entre valores estimados e medidos.	138
Figura 103–Comparação entre eficiência estimada e medida durante o experimento.	139
Figura 104–Conjugado durante o segundo experimento: comparação entre valores estimados, medidos e set-point.	140
Figura 105–Velocidade da máquina durante o segundo experimento.	140
Figura 106–Potência elétrica durante o segundo experimento: comparação entre valores estimados e medidos.	141
Figura 107–Comparação entre rendimento estimado e medido no segundo experimento.	141

Lista de tabelas

Tabela 1 – Dados de projeto para MRV 8x6	65
Tabela 2 – Dados de projeto para MRV 6x4	65
Tabela 3 – Tabela comparativa - Máquina 01	70
Tabela 4 – Coeficientes obtidos para $l_p(\theta)$	79
Tabela 5 – Coeficientes obtidos para $L_p(i)$	79
Tabela 6 – Coeficientes obtidos para $L_r(\theta)$	80
Tabela 7 – Coeficientes obtidos para $l_r(i)$	81
Tabela 8 – Resultados do MAPE (%) para diferentes condições operacionais . . .	143
Tabela 9 – Comparação entre os cenários avaliados.	145

Lista de siglas

A_c	Área da seção transversal do material
a_n	Coeficiente “a” para formação dos polinômios, índice “n”
b_n	Coeficiente “b” para formação dos polinômios, índice “n”
c_n	Coeficiente “c” para formação dos polinômios, índice “n”
d_n	Coeficiente “d” para formação dos polinômios, índice “n”
D	Coeficiente de atrito viscoso do sistema
e	Força contra eletro-motriz
FEM	<i>Finite Element Method</i> (Método dos elementos finitos)
$FEMM$	<i>Finite Element Method Magnetics</i>
i	Corrente elétrica
j	Momento de inércia do sistema
L	Indutância (Genérica)
L_p	Vetor / Curva da parcela principal da indutância, em Henry
l_p	Vetor / Curva representando a parcela principal da indutância, adimensional
L_r	Vetor / Curva da parcela residual da indutância, em Henry
l_r	Vetor / Curva representando a parcela residual da indutância, adimensional
l_c	Comprimento médio do núcleo de ferro
l_g	Comprimento do entreferro (gap)
$LAcE$	Laboratório de Acionamentos Elétricos
LUT	<i>Lookup table</i> (Consulta em tabelas)
MRV	Máquina a Relutância Variável
m	Número de polos no estator
μ	Permeabilidade Magnética (representação genérica)
μ_0	Permeabilidade Magnética no vácuo
μ_g	Representação da influência do entreferro na equação da relutância
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
NBR	Determinação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
n	Número de polos no rotor

N	Número de espiras em um enrolamento
ω	Velocidade angular (rad/s)
$p.u.$	por unidade
P_e	Potência na entrada do circuito (VA)
R	Resistencia elétrica
\Re	Relutância magnética
T_{emg}	Conjugado eletromagnético (torque)
τ	Conjugado eletromagnético (torque)
θ	Posição angular
u	Função degrau unitário
v	Tensão elétrica

Sumário

1	INTRODUÇÃO	25
1.0.1	Considerações Iniciais	25
1.1	Objetivo Geral	26
1.2	Estrutura do Trabalho	28
2	MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL	31
2.0.1	Contextualização	31
2.0.2	Máquina a Relutância Variável	34
2.1	Características operacionais da Máquina a Relutância Variável	37
2.1.1	Equações Elétricas e Mecânicas	40
2.2	Conclusão	44
3	LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE INDUTÂNCIA	45
3.1	Modelagem analítica da Indutância	46
3.1.1	Análise da Indutância	48
3.1.2	Análise da Relutância	50
3.1.3	Análise do Entreferro	53
3.1.4	Determinação da Indutância	61
3.2	Obtenção das Curvas através de Elementos Finitos	63
3.3	Conclusão	67
4	ESTIMADOR DE INDUTÂNCIA	71
4.1	Análise preliminar da superfície de indutância	71
4.1.1	Normalização da superfície de Indutância.	73
4.2	Modelagem Polinomial Utilizando Splines Cúbicas	75
4.2.1	Modelagem da superfície de indutância	76
4.2.2	Determinação dos coeficientes	78
4.2.3	Determinação da Indutância	81

4.2.4	Determinação do fluxo magnético	81
4.2.5	Determinação do conjugado eletromagnético	82
4.2.6	Conclusão	83
5	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	85
5.1	Ferramenta Computacional para Simulação.	85
5.1.1	Planta	87
5.1.2	Fonte	87
5.1.3	Conversor Half-Bridge	88
5.1.4	MRV 8x6	90
5.1.5	Sensor de Posição	91
5.1.6	Controle de Corrente	92
5.1.7	Controle da MRV	93
5.1.8	Instrumentação	94
5.2	Resultados da Simulação	95
5.2.1	Velocidade Constante	95
5.2.2	Velocidade Variável	101
5.2.3	Ensaio dinâmico do estimador	104
5.2.4	Estimador como variável de controle	106
5.3	Conclusão	109
6	PLATAFORMA EXPERIMENTAL	111
6.1	Plataforma Experimental	111
6.1.1	Máquina a Relutância Variável	111
6.1.2	Conversor de Potência	112
6.1.3	Simulador de Carga	115
6.1.4	NI MyRIO 1900	117
6.1.5	Transdutores e Sensores	118
6.1.6	Estratégia de acionamento da MRV	120
6.2	Conclusão	122
7	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	123
7.0.1	Acionamento em malha aberta	123
7.0.2	Variação dos ângulos de ativação	129
7.0.3	Operação em malha fechada — Controle de Velocidade	132
7.0.4	Operação em malha fechada — Controle de Conjunto	136
7.1	Robustez e Limitações do Método	142
7.1.1	Comparação entre Valores Estimados e Medidos	143
7.1.2	Comparação entre o Uso de Splines Cúbicas e a Consulta Direta em Tabelas	144

7.2	Conclusão	146
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	147
8.1	Sugestões de Trabalhos Futuros	148
8.2	Contribuições em Produção Bibliográfica	149
A	APÊNDICE	151
A.1	Obtenção dos Coeficientes Utilizando Splines Cúbicas no Mo- delo de Lagrange	151
A.2	Estimador Implementado na Simulação (Simulink - bloco MA- TLAB FCN)	154
	REFERÊNCIAS	159

CAPÍTULO 1

Introdução

1.0.1 Considerações Iniciais

A busca por processos produtivos mais eficientes é uma das principais preocupações deste século, devido à escassez crescente de recursos naturais e ao aumento da população mundial. Esses fatores têm gerado uma maior consciência sobre a necessidade de consumir recursos de forma mais responsável e sustentável, buscando um equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental (SILVEIRA, 2008; REIS, 2020).

A crescente demanda por energia elétrica e a escassez de recursos naturais têm impulsionado a busca por maior eficiência nos processos produtivos, especialmente em relação aos motores elétricos e geradores rotativos. Estes equipamentos têm um papel fundamental na geração de energia e na gestão energética global, tornando-se essenciais para o desenvolvimento sustentável. Para atender a essa demanda, é necessário o desenvolvimento de máquinas elétricas mais eficientes, duráveis, robustas e que demandem menos matéria-prima para sua produção. Portanto, a pesquisa em engenharia elétrica tem se concentrado no desenvolvimento de novas técnicas e materiais para a fabricação de máquinas elétricas com desempenho aprimorado. De fato, a eficiência energética de motores elétricos é um dos principais fatores a serem considerados na atualidade em relação ao impacto ambiental, tornando-se um tema relevante e atual na área de engenharia elétrica (FANG, 2021).

A Máquina a Relutância Variável é uma alternativa atrativa às máquinas elétricas tradicionais, especialmente em aplicações que demandam velocidade variável, alto conjugado mecânico e a necessidade de um conversor de potência. Por esta razão, vários estudos têm se dedicado a investigar a aplicabilidade das propriedades dessa máquina em setores como indústrias automotivas, aeroespaciais e geração eólica. Algumas pesquisas recentes exploraram o potencial da MRV em sistemas de acionamento de veículos elétricos, sistemas de geração de energia eólica de pequena escala, entre outras aplicações. Com base nisso, é evidente que a MRV tem despertado um grande interesse em áreas que necessitam de maior eficiência energética e sustentabilidade. Dessa forma, estudos adicionais

podem contribuir significativamente para aprimorar as características dessa tecnologia e expandir sua utilização em diversos setores industriais. (UYBAL et al., 2019; MARK, 2020; VIAJANTE et al., 2019; HIEU; LEE; AHN, 2017; LEBSIR, 2013).

Neste cenário, é primordial que, no estudo de novas metodologias, seja possível analisar experimentalmente a dinâmica das principais grandezas elétricas e mecânicas envolvidas. Muitos trabalhos têm implementado bancadas, plataformas, estratégias e técnicas de acionamento, medição e estimativa de grandezas para o acionamento e controle das MRVs (KACHAPORNKUL et al., 2022; FARIA, 2022).

Embora seja possível enumerar uma série de vantagens, como a possibilidade de validar as hipóteses levantadas em situações muito próximas às reais, o desenvolvimento de uma plataforma experimental pode não ser uma tarefa muito simples, principalmente quando se trata de aplicações que requerem muitas medições e controle de acionamento bem ajustado (FILHO, 2017; DIAS, 2011). Além disso é necessário considerar também que os instrumentos de medição convencionais podem apresentar custo elevado, como osciloscópio de canais isolados, torquímetros, velocímetros, entre outros (LOPES, 2007).

Desta forma a estimativa de grandezas e aplicação de técnicas de instrumentação virtual podem ser grandes aliadas na construção de plataformas de acionamento para MRVs, pois permite o agrupamento de diversos instrumentos convencionais em um único instrumento virtual, tornando a estrutura física enxuta e flexível (FARIA, 2022).

O método apresentado para estimativa de grandezas em MRVs é baseado na modelagem da superfície geométrica formada pela indutância da máquina em relação à posição angular do rotor e corrente elétrica. Essa modelagem resulta em uma expressão analítica e derivável que permite estimar com precisão a indutância instantânea da MRV. Com essa informação, é possível obter os valores de conjugado, fluxo, potência e rendimento da máquina. Além disso, o método apresentado tem como vantagem o fato de ser capaz de operar em tempo real, mesmo em processadores de baixo custo, por meio da resolução de equações polinomiais de terceira ordem. Essa característica é importante para aplicações que requerem um tempo de resposta rápido, como é o caso de sistemas de controle em tempo real. Neste trabalho, foi desenvolvida uma ferramenta computacional e utilizada para simular e avaliar a performance e estabilidade do método proposto, os resultados são apresentados e discutidos. Resultados experimentais também estão apresentados e discutidos, validando a aplicabilidade e precisão do método proposto através de uma série de ensaios sobre o comportamento dinâmico em malha aberta e fechada, operando em diferentes velocidades, tensão de excitação e ângulos de magnetização.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo desta tese é propor uma metodologia inovadora para estimar o conjugado eletromagnético da Máquina a Relutância Variável em tempo real. Para tanto, serão

investigadas as características e princípios de funcionamento dessa máquina, com base em estudos teóricos e experimentais existentes na literatura. A partir dessas informações, será desenvolvido um modelo matemático capaz de estimar o conjugado eletromagnético da MRV a partir da indutância instantânea da máquina.

Além disso, serão estabelecidas condições para estimar outras grandezas relacionadas ao funcionamento da MRV, tais como o fluxo magnético, potência e rendimento. Essas grandezas serão determinadas com base em análises teóricas e experimentais, utilizando técnicas de processamento de sinais e métodos numéricos para a solução de equações diferenciais e integrais.

Dessa forma, a metodologia proposta permitirá a obtenção de informações importantes sobre o desempenho da MRV em tempo real, o que é essencial para o controle e operação eficiente dessa máquina em aplicações industriais. Acredita-se que os resultados obtidos nesta pesquisa possam contribuir significativamente para o avanço do conhecimento científico e tecnológico na área de máquinas elétricas de relutância variável.

As metas do trabalhos são:

- ❑ Compreender o princípio de funcionamento da Máquina a Relutância Variável, explorando as características físicas da máquina, os princípios de operação e suas vantagens em relação a outras tecnologias de motores elétricos;
- ❑ Realizar uma revisão da literatura atual, investigando o estado da arte da MRV referente à estimação de grandezas, como o conjugado eletromagnético, o fluxo magnético, a potência e o rendimento, além de explorar técnicas de controle que fazem uso de valores estimados;
- ❑ Desenvolver uma metodologia para estimar ou construir as curvas de indutância da MRV a partir da posição angular do eixo e do valor da corrente elétrica, permitindo a obtenção de informações precisas sobre o comportamento eletromagnético da máquina;
- ❑ Desenvolver um modelo computacional da MRV que possibilite a simulação de seu funcionamento, incluindo técnicas de controle e estratégias de acionamento, permitindo a avaliação de seu desempenho em diversas condições operacionais;
- ❑ Desenvolver uma metodologia para modelar as superfícies de indutância obtidas a partir do projeto da MRV em um formato polinomial, tornando possível a sua utilização em sistemas de controle em tempo real;
- ❑ Desenvolver um algoritmo capaz de operar como instrumentação virtual durante o acionamento da MRV, fornecendo informações de conjugado eletromagnético, fluxo eletromagnético, potência e rendimento, possibilitando a realização de experimentos mais precisos e o desenvolvimento de novas técnicas de controle;

- ❑ Realizar o acionamento experimental da MRV, validando o modelo desenvolvido e permitindo a comparação entre os resultados obtidos na simulação e na prática;
- ❑ Contribuir cientificamente, publicando o trabalho em conferências e periódicos especializados, divulgando os resultados obtidos e contribuindo para o avanço da área de máquinas elétricas;
- ❑ Propor novas pesquisas a partir do trabalho desenvolvido, explorando novas possibilidades de modelagem, controle e aplicação da MRV em diferentes áreas da engenharia elétrica.

1.2 Estrutura do Trabalho

Esta tese está organizada em oito capítulos, conforme descrito a seguir:

- ❑ **Capítulo 1 – Introdução:** apresenta o contexto geral da pesquisa, as motivações que impulsionaram o desenvolvimento do trabalho, os objetivos estabelecidos, bem como a organização da tese.
- ❑ **Capítulo 2 – Máquina a Relutância Variável:** aborda os fundamentos teóricos sobre a Máquina a Relutância Variável (MRV), incluindo sua construção, princípios de funcionamento, características operacionais e métodos tradicionais de modelagem.
- ❑ **Capítulo 3 – Levantamento das Curvas de Indutância:** descreve as estratégias utilizadas para a obtenção das curvas de indutância da MRV, tanto por meio de modelagem analítica quanto via simulação pelo método dos elementos finitos (FEM).
- ❑ **Capítulo 4 – Estimador de Indutância:** apresenta a metodologia de modelagem polinomial da superfície de indutância utilizando splines cúbicas, o desenvolvimento do estimador de grandezas, e sua validação preliminar.
- ❑ **Capítulo 5 – Simulação Computacional:** expõe o desenvolvimento da planta simulada, detalha a implementação dos sistemas de controle e instrumentação virtual, e analisa os resultados de simulação para diferentes condições de operação.
- ❑ **Capítulo 6 – Plataforma Experimental:** descreve a construção da bancada experimental utilizada para validação do método, incluindo os principais componentes do sistema de acionamento, sensores e estratégias de medição.
- ❑ **Capítulo 7 – Resultados Experimentais:** apresenta e discute os ensaios realizados, comparando os resultados estimados com os valores medidos em malha aberta e malha fechada, além de avaliar a robustez e as limitações do método proposto.

- **Capítulo 8 – Considerações Finais e Trabalhos Futuros:** sintetiza as principais conclusões obtidas a partir dos resultados, destaca as contribuições do trabalho, e propõe direções para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

Máquina a Relutância Variável

2.0.1 Contextualização

A construção básica da Máquina a Relutância Variável foi apresentada em 1839 por Robert Davidson na Escócia (PYRHONEN; JOKINEN; HRABOVCOVA, 2014). A primeira patente baseada neste conceito foi registrada em 1841 (MAMEDE, 2022). Apesar de ser uma das máquinas mais antigas conhecidas e apresentar inúmeras vantagens, como confiabilidade, robustez e simplicidade de construção, o uso da MRV foi inviável por várias décadas devido à inexistência de tecnologia capaz de efetuar o seu controle de modo satisfatório (MAMEDE, 2022). Com o avanço da eletrônica de potência e o desenvolvimento de técnicas de controle mais eficientes, a MRV ganhou destaque novamente a partir dos anos 80, tornando-se uma opção atraente para aplicações em veículos elétricos e sistemas de energia renovável (PYRHONEN; JOKINEN; HRABOVCOVA, 2014).

Algumas das principais inovações tecnológicas que permitiram o uso eficiente da MRV em sistemas de acionamento incluem o desenvolvimento de algoritmos de controle avançados, técnicas de instrumentação virtual e a evolução da eletrônica de potência (ARKADAN; KIELGAS, 1944; BERNADELI, 2008). De fato, a MRV apresenta algumas vantagens em relação a outras máquinas elétricas, como alta eficiência, baixo custo e simplicidade construtiva (MAMEDE, 2022). Como resultado, a MRV tem sido amplamente estudada nas últimas décadas, tanto em simulações quanto em ensaios experimentais (FIDELIS et al., 2018; FARIA et al., 2022). Com isso, a MRV tem se mostrado uma alternativa viável para diversas aplicações industriais, como na indústria automobilística, aeroespacial, em sistemas de geração de energia renovável e em aplicações domésticas (FIDELIS et al., 2018; MAMEDE, 2022; VIAJANTE, 2013; FARIA et al., 2022).

A Máquina a Relutância Variável é altamente indicada para aplicações aeroespaciais devido à sua capacidade de funcionar tanto como motor quanto como gerador, conforme mencionado por (MAMEDE, 2022). Por exemplo, em (RADUN, 1992), a MRV é utilizada como motor/gerador de partida para motores a jato, iniciando a partida e em seguida mudando para o modo gerador para fornecer energia elétrica à aeronave. Outra aplicação

aeroespacial é a utilização da MRV como bomba de lubrificação/combustível para motores de turbina a gás de 5HP (FERREIRA et al., 1994). Além disso, a MRV tem se destacado no desenvolvimento de veículos elétricos, como destacado por (RAHMAN et al., 1998). Vários estudos, como (HUISAIN; ISLAM, 1999; RAHMAN; SCHULZ, 2002; UEMATSU; WALLACE, 1995), têm investigado projetos de MRV para tração e propulsão de veículos. Em (XUE et al., 2010), um projeto de MRV instalado dentro da roda é otimizado. A tecnologia de motores de relutância variável tem se destacado na geração eólica devido à sua capacidade de trabalhar com velocidades variáveis, confiabilidade, alto conjugado de partida e baixo custo. Além disso, a faixa de operação da MRV para velocidade é mais ampla do que a dos geradores de indução e síncrono, tornando-a uma opção viável para aplicações em energia eólica (McSmiggan et al., 2007; Barros Filho, 2015; Ogawa et al., 2006; Cardenas et al., 2005). A MRV pode ser usada para injetar energia ativa na rede em corrente alternada, por meio de um link ou barramento DC, atuando como sistema auxiliar ou juntamente com um sistema de armazenamento (Viajante, 2013). A modelagem matemática da máquina pode ser obtida a partir de diferentes abordagens, como a geometria da máquina, análise de campo magnético, circuito equivalente magnético, métodos numéricos de ajuste de curvas, séries de Fourier ou funções trigonométricas (Andrade et al., 2014; Ramu, 2013). Além disso, as expressões matemáticas do modelo podem ser obtidas por meio de dados experimentais e pelo método dos elementos finitos, garantindo resultados mais precisos (Sobiesczanski-Sobieski et al., 2001; Chen et al., 2015). A modelagem da MRV apresenta desafios significativos, principalmente devido à não linearidade da máquina. O fluxo concatenado e o conjugado são funções não lineares da corrente e posição do rotor, e diferentes abordagens podem ser usadas para prever seu comportamento. Algumas das técnicas utilizadas incluem métodos de identificação direta (MAMEDE, 2022), modelagem analítica (FIDELIS, 2018), método dos elementos finitos (MANOLAS; KLADAS; MANIAS, 2009) e algoritmos de aproximação inteligente ou inteligência artificial (BABITHA; PADMASHREE; JYOTHI, 2019; KUCUK et al., 2009).

Os métodos de identificação direta são utilizados para obter medidas durante o funcionamento da máquina através de sensores, controle de corrente em malha fechada (KIM; LAI, 2019) ou aplicação de filtros específicos (PINTO et al., 2016; YU et al., 2019). Essas técnicas permitem a obtenção de informações importantes sobre a dinâmica da máquina, como a relação não linear entre o fluxo concatenado e conjugado e a corrente e posição do rotor.

Os métodos de identificação indireta têm sido alvo de diversos estudos científicos que visam obter modelos robustos e confiáveis para estimar ou equacionar os parâmetros e grandezas da Máquina de Relutância Variável em diferentes condições de operação. A complexidade desta máquina torna a estimação das grandezas uma tarefa desafiadora (KUSHWAHA; KANAGARA, 2020). Dentre os métodos propostos, destaca-se a obten-

ção de funções que representem o comportamento das grandezas da MRV, eliminando ou reduzindo a dependência de consulta em tabelas com interpolação bidimensional, o que pode exigir um grande recurso de armazenamento de dados, leitura e tempo de processamento (KUSHWAHA; KANAGARA, 2020; VELMURUGAN; YEOH; BOZHKO, 2019; ANDRADE; KRISHNAN, 2001; FIDELIS et al., 2022; FIDELIS, 2018; MATWANKAR; PRAMANICK; SINGH, 2021; WANG, 2016; J; LIU, 2020; SAHOO; PANDA; XU, 2008). A obtenção de um modelo dinâmico e preciso da MRV é fundamental para a implementação de estratégias de controle eficientes, tornando esses métodos um importante campo de pesquisa na área de sistemas elétricos.

Diversos métodos têm sido propostos para estimar grandezas da Máquina a Relutância Variável Linear de forma indireta. Alguns desses métodos aproximam as curvas ou superfícies de indutância, eletromagnética ou fluxo, dividindo-as em trechos e modelando cada segmento de acordo com sua linearidade (VELMURUGAN; YEOH; BOZHKO, 2019). Para isso, utilizam técnicas de regressão numérica ou séries de Fourier (VELMURUGAN; YEOH; BOZHKO, 2019; ANDRADE; KRISHNAN, 2001). Outros métodos baseiam-se em informações de projetos da máquina ou dados obtidos pelo método dos elementos finitos, modelando as linhas de fluxo magnético (MATWANKAR; PRAMANICK; SINGH, 2021; SAHOO; PANDA; XU, 2008) ou conjugado eletromagnético a partir da indutância não saturada da MRV (SONG et al., 2021; KAEWTHAI; KITTIRATSATCHA, 2005). Há ainda métodos que utilizam perdas no ferro para estimar a indutância para aplicações sensorless da MRV (WANG, 2016) ou que se baseiam na injeção de algum sinal específico durante o acionamento da MRV para a leitura da assinatura elétrica provocada pelo sinal (PINTO et al., 2016; WANG, 2016; J; LIU, 2020; YU et al., 2019). O objetivo desses estudos é obter modelos robustos e confiáveis para estimar ou equacionar os parâmetros e grandezas da MRV, eliminando ou reduzindo a dependência de consulta em grandes tabelas com interpolação bidimensional, o que pode exigir um grande recurso de armazenamento de dados, leitura e tempo de processamento (KUSHWAHA; KANAGARA, 2020; VELMURUGAN; YEOH; BOZHKO, 2019; ANDRADE; KRISHNAN, 2001; FIDELIS et al., 2022; FIDELIS, 2018; MATWANKAR; PRAMANICK; SINGH, 2021; WANG, 2016; J; LIU, 2020; SAHOO; PANDA; XU, 2008).

A obtenção de modelos matemáticos precisos e robustos para estimar ou calcular a indutância da MRV é de grande importância para a comunidade científica. Esses modelos são essenciais para o desenvolvimento de aplicações de acionamento e controle, que requerem uma alta precisão nos valores das grandezas da MRV. Diversas técnicas e estratégias têm sido propostas para obter esses modelos, utilizando métodos de regressão numérica, séries de Fourier e modelagem de linhas de fluxo magnético, entre outros (VELMURUGAN; YEOH; BOZHKO, 2019; ANDRADE; KRISHNAN, 2001; MATWANKAR; PRAMANICK; SINGH, 2021; SONG et al., 2021; KAEWTHAI; KITTIRATSATCHA, 2005; WANG, 2016; PINTO et al., 2016; J; LIU, 2020; YU et al., 2019). Neste trabalho, é

apresentado um novo método para estimar a indutância da MRV, que pode ser utilizado em diversas aplicações de controle e acionamento. Com esse método, é possível melhorar os controles já existentes, como os apresentados em (SONG et al., 2021) e (POMING; QISHUANG; PING, 2020), que otimizam os ângulos de comutação da MRV em veículos elétricos e calculam o campo magnético na MRV, respectivamente. Dessa forma, o método proposto neste trabalho contribui para o avanço da pesquisa na área de máquinas elétricas, possibilitando o desenvolvimento de soluções mais eficientes e precisas para a indústria.

O estudo apresentado neste trabalho é justificado pela crescente aplicabilidade da MRV, bem como pela necessidade de medição, direta ou indireta, dos parâmetros e grandezas relacionadas ao acionamento e controle. Além disso, a possibilidade de aplicação de novas técnicas e estratégias de acionamento e controle, bem como o aprimoramento das técnicas atualmente aplicadas, torna esse estudo ainda mais relevante e necessário (KUSHWAHA; KANAGARA, 2020; VELMURUGAN; YEOH; BOZHKO, 2019; ANDRADE; KRISHNAN, 2001; FIDELIS et al., 2022; FIDELIS, 2018; MATWANKAR; PRAMANICK; SINGH, 2021; WANG, 2016; J; LIU, 2020; SAHOO; PANDA; XU, 2008).

2.0.2 Máquina a Relutância Variável

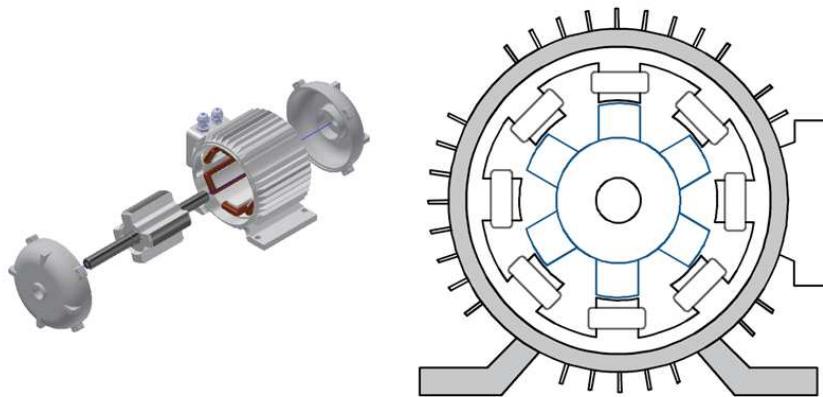
O motor a relutância variável tem sido cada vez mais utilizado em diversas aplicações devido ao seu desenvolvimento tecnológico. Sua popularidade tem crescido significativamente em comparação aos motores tradicionais, sendo considerado uma alternativa atraente. No entanto, por muitos anos, seu uso foi limitado devido à complexidade do acionamento e controle. Com a redução do custo dos componentes eletrônicos e o avanço de técnicas de controle, as características positivas do MRV têm começado a superar os pontos negativos (VIAJANTE, 2013).

Diante desse contexto, o desenvolvimento de novas metodologias para aprimorar o desempenho do acionamento e controle de MRVs tem se tornado um tema de pesquisa cada vez mais relevante nos últimos anos (FILHO, 2017). Portanto, é essencial que, ao investigar o comportamento de uma máquina elétrica com o uso dessas novas metodologias, sejam analisadas as principais grandezas envolvidas, como corrente, tensão, velocidade, conjugado, entre outras variáveis, a fim de se obter um estudo completo e aprofundado.

O MRV apresenta diversas vantagens em relação aos motores elétricos convencionais, tais como a sua estrutura simples e robusta, baixo custo de produção e elevado conjugado de partida (FIDELIS, 2018). Adicionalmente, as perdas de potência são menores e se concentram no estator da máquina, uma vez que o rotor é construído com chapas de material ferromagnético, sem enrolamentos. No entanto, o ruído sonoro gerado e a oscilação do conjugado são algumas das desvantagens apresentadas pelo MRV, o que tem estimulado o desenvolvimento de estudos e pesquisas nessa área (FILHO, 2017).

Sob o ponto de vista construtivo, a MRV pode ser analisada em diferentes configurações, sendo que essas configurações são identificadas por $m \times n$, onde m representa o número de polos do estator e n é o número de polos do rotor. Entre as configurações polifásicas, as topologias 6x4 e 8x6 são comumente estudadas no meio científico (FIDELIS, 2018). A figura 1 apresenta a estrutura de uma Máquina a Relutância Polifásica.

Figura 1 – Estrutura de uma MRV 8x6.



Fonte: Autor

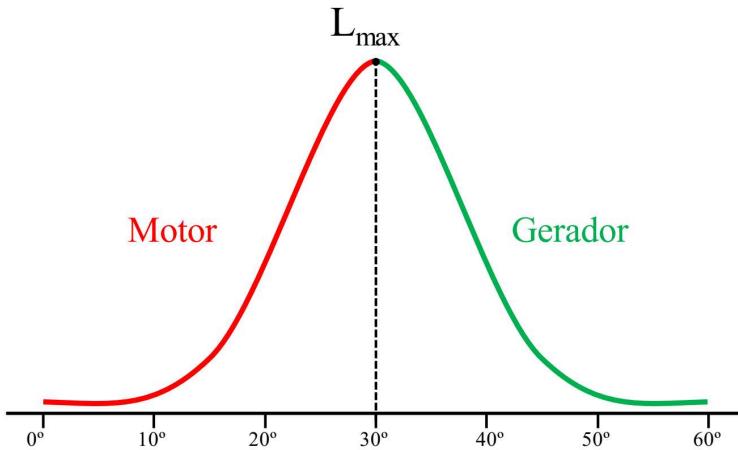
A MRV é composta por uma estrutura em dupla saliência, onde os pares de polos diametralmente opostos no estator formam uma fase, apresentando bobinas apenas nesses polos. Essas bobinas são geralmente ligadas em série e percorridas pela mesma corrente pulsada (CHANG; LIAW, 2005). A utilização de bobinas restritas aos polos do estator reduz as perdas por efeito Joule e proporciona um menor custo com cobre e material ferromagnético, tornando o custo de fabricação da MRV atraente em relação a outros tipos de máquinas elétricas (SAWATA et al., 1999).

A dupla saliência é um aspecto construtivo fundamental na caracterização do princípio de funcionamento da MRV, uma vez que ela é responsável por criar o perfil de indutância diferenciado nos enrolamentos (MACHADO et al., 2022). Dessa forma, ao variar o ângulo de alinhamento entre os polos do rotor e estator, é possível variar a indutância instantânea na fase acionada. Como resultado, o conjugado é produzido pela tendência do rotor em se deslocar para a posição em que a indutância da fase energizada é máxima, resultando na rotação do eixo da máquina (ZAHARIA, 2016).

Após análise do perfil de indutância da MRV, pode-se perceber a ocorrência de momentos em que o conjugado gerado é positivo, negativo ou próximo de zero. Essa informação indica que, quando a fase é excitada nos momentos de conjugado positivo, a máquina funcionará como um motor, gerando conjugado para a carga acoplada. Por outro lado, quando a fase é excitada nos momentos de conjugado negativo, a máquina atuará como

gerador, fornecendo potência elétrica para a rede. Na figura 2, é possível observar um perfil de indutância típico de uma MRV, destacando as posições angulares correspondentes ao acionamento como motor e gerador.

Figura 2 – Perfil de indutância típico de uma MRV.



Fonte: Adaptado de (FARIA, 2022)

Atualmente, apesar das inúmeras vantagens da MRV, sua participação no mercado de motores elétricos ainda é pequena (BILGIN; JIANG; EMADI, 2019). Essas máquinas são comumente encontradas em aplicações industriais, como bombas, aspiradores de pó, veículos agrícolas e equipamentos de mineração. Historicamente, a baixa participação de mercado da MRV pode ser atribuída a diversos desafios, como alto ruído acústico e vibração, oscilações de conjugado e dificuldades no projeto e otimização devido às suas características não lineares, bem como o custo dos conversores de energia, devido ao uso de módulos de potência não convencionais. No entanto, com o avanço da eletrônica de potência e da computação nas últimas décadas, esses desafios estão sendo superados, permitindo que a MRV seja projetada e utilizada para atender aos requisitos de uma ampla gama de aplicações.

As máquinas de indução são amplamente utilizadas em aplicações de acionamento de motores elétricos devido à sua capacidade de partir sem a necessidade de um inversor de frequência. No entanto, em muitos sistemas mecânicos nos setores industrial, residencial e comercial, a carga varia em longos períodos de operação, o que resulta em perdas significativas de eficiência. Nesse sentido, acionamentos de velocidade ajustável têm sido adotados para controlar a velocidade e o conjugado do motor elétrico de acordo com as condições de carga, o que pode resultar em ganhos significativos de eficiência (WAIDE; BRUNNER, 2011). A utilização de acionamentos em velocidade ajustável elimina, para a maioria das aplicações, a necessidade de componentes mecânicos como engrenagens, transmissões e embreagens, além de ajustar a velocidade e o conjugado do motor elétrico

à carga e evitar perdas devido a cargas parciais (WAIDE; BRUNNER, 2011).

A MRV é uma excelente candidata para aplicações de tração, devido à sua ampla faixa de velocidade e potência. No entanto, ondulações de conjugado, ruído acústico e baixa densidade de conjugado em baixas velocidades têm sido os principais obstáculos na adoção de MRVs em aplicações de tração elétrica. No entanto, a crescente demanda por veículos elétricos pressionará o desenvolvimento de sistemas de acionamento motorizado de custo reduzido, o que abrirá mais oportunidades para máquinas a relutância variável (WAIDE; BRUNNER, 2011). Além disso, os fabricantes de veículos elétricos ou híbridos estão adotando motores de maior velocidade para reduzir o volume do motor e melhorar a eficiência do trem de força (WAIDE; BRUNNER, 2011). Essa abordagem é uma vantagem para a MRV, pois sua eficiência é maior em altas velocidades (BILGIN; JIANG; EMADI, 2019).

O setor atacadista de motores elétricos busca minimizar o custo de fabricação e estoque reduzindo o número e tipos de motores oferecidos (WAIDE; BRUNNER, 2011). Geralmente, eles fornecem motores de uso geral que são superdimensionados para a aplicação. Em contraste, os fabricantes de eletrodomésticos adquirem motores projetados especificamente para atender aos requisitos de custo e eficiência de suas aplicações, em contratos de grande volume, diretamente do fabricante do motor (BILGIN; JIANG; EMADI, 2019). Da mesma forma, os motores de tração automotivos são projetados e adquiridos diretamente do fabricante ou construídos internamente. À medida que a tecnologia de motores e acionamentos se torna mais acessível e econômica, é provável que sejam desenvolvidos motores mais simples e acionamentos mais complexos e projetados especificamente para uma aplicação (BILGIN; JIANG; EMADI, 2019). Isso aumentará a prevalência da tecnologia de MRV em áreas como máquinas de tração.

2.1 Características operacionais da Máquina a Relutância Variável

A estrutura da MRV possui uma característica notável em que é uma parte essencial do seu mecanismo de produção de conjugado, e por isso, tanto o fluxo quanto o conjugado gerado são dependentes da posição angular do rotor e da corrente de fase aplicada (BILGIN; JIANG; EMADI, 2019). Quando uma corrente é aplicada a uma fase da MRV, a maior parte do fluxo magnético gerado circula nas bobinas dessa mesma fase devido à insignificância do fluxo mútuo na maioria das análises (BILGIN; JIANG; EMADI, 2019). Assim, uma vez que as características de uma fase da MRV são determinadas, elas podem ser utilizadas para as outras fases. Para obter essas características, uma corrente constante é aplicada a uma fase da máquina por um ciclo elétrico, e os resultados mostram como as características da MRV mudam com a posição angular do rotor. Repetir a mesma

análise com diferentes correntes mostra como as características da MRV mudam à medida que o núcleo magnético da MRV satura (KRISHNAM, 2001).

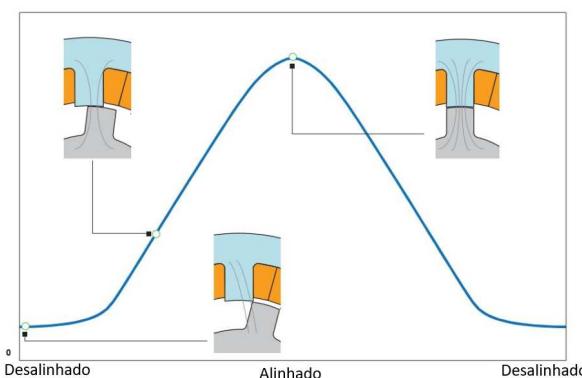
A posição desalinhada ocorre quando o polo do estator é posicionado entre dois polos do rotor, resultando na maior distância relativa entre o rotor e os polos do estator. Consequentemente, na posição desalinhada, o fluxo é mínimo devido ao grande entreferro, conforme ilustrado na Figura 3. Em contrapartida, quando os polos do rotor e do estator estão alinhados, o entreferro é minimizado, resultando em um fluxo máximo (KRISHNAM, 2001; BILGIN; JIANG; EMADI, 2019).

À medida que a corrente aplicada a uma MRV é aumentada, a densidade de fluxo magnético também aumenta e, consequentemente, o fluxo tende a se saturar. Conforme ilustrado na figura 4, esse aumento não ocorre de forma linear com o aumento da corrente, devido ao nível de saturação do núcleo magnético.

Assim como o fluxo magnético, o conjugado eletromagnético também pode ser modelado em diferentes posições do rotor, a partir da excitação de corrente constante, como mostrado na figura 5. É importante observar que o conjugado é independente da direção da corrente, como indicado pelas curvas que têm a mesma corrente para quando o conjugado é positivo ou negativo.

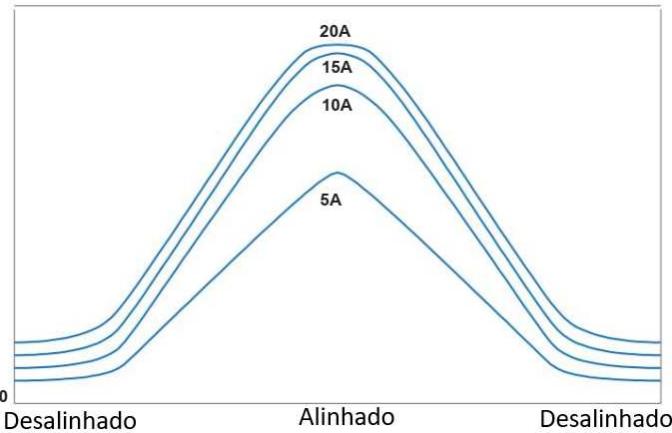
A partir do perfil de conjugado apresentado na figura 5, é possível observar que qualquer corrente de excitação aplicada à fase puxará o rotor na direção de rotação, criando um conjugado positivo antes que o polo do rotor alcance a posição alinhada. Após o polo do rotor ultrapassar a posição alinhada, a corrente de excitação puxará o polo do rotor contra a direção de rotação, resultando em um conjugado negativo. Portanto, quando a MRV é utilizada como motor, as fases devem ser acionadas na região de produção de conjugado positivo, enquanto, quando a MRV é utilizada como gerador, a fase deve ser excitada na região de produção de conjugado negativo (BILGIN; JIANG; EMADI, 2019; KRISHNAM, 2001).

Figura 3 – Perfil de fluxo em função da posição angular.



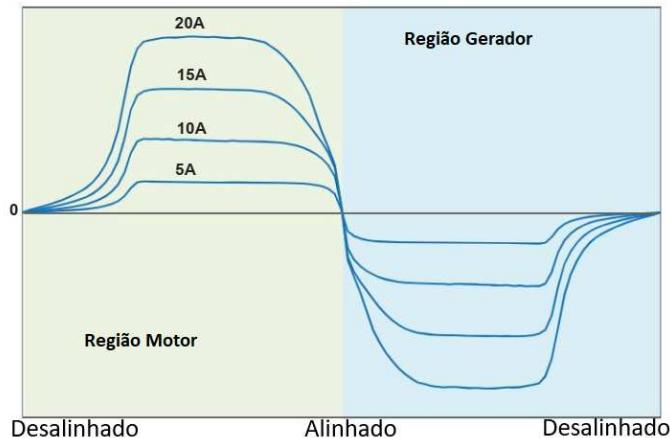
Fonte: Adaptado de (BILGIN; JIANG; EMADI, 2019)

Figura 4 – Perfil de fluxo em função da posição angular para diversos valores de corrente.



Fonte: Adaptado de (BILGIN; JIANG; EMADI, 2019)

Figura 5 – Perfil do conjugado em função da posição angular para diversos valores de corrente.



Fonte: Adaptado de (BILGIN; JIANG; EMADI, 2019)

De acordo com (BILGIN; JIANG; EMADI, 2019; KRISHNAM, 2001; MAMEDE, 2022), as características das MRVs apresentam implicações importantes:

- ❑ O conjugado gerado é proporcional ao quadrado da corrente e, portanto, a corrente pode ser unipolar para produzir um conjugado unidirecional, ao contrário do que acontece em máquinas CA (KRISHNAM, 2001). Isso significa que é necessária somente uma fonte de potência com um sistema de chaveamento para controlar a corrente na fase da MRV.
- ❑ Para aplicações como gerador, o conjugado é obtido durante o declive da indutância em função da posição do rotor. Como a indutância do enrolamento do estator é

uma função não linear da corrente e da posição, um circuito equivalente simples para esse tipo de máquina não é possível (BILGIN; JIANG; EMADI, 2019).

- As MRVs se assemelham às máquinas CC em termos de conjugado de partida, já que o conjugado é proporcional ao quadrado da corrente.
- A geração de corrente contínua é possível quando operando na região de decrescimento da indutância.
- A direção de rotação pode ser facilmente modificada, alterando a sequência de chavamento da excitação do estator.
- As MRVs exigem um conversor controlável para sua operação e não podem operar conectadas diretamente à rede. Para aplicações em velocidade constante, o conversor pode ser oneroso em comparação às máquinas de indução e síncronas.
- Existem indutâncias mútuas de valores pequenos entre os enrolamentos da MRV, que podem ser desprezadas sem comprometer o controle da máquina. Essa característica é comum entre as máquinas elétricas, o que implica que um curto-círcuito ou falha em uma das fases não afetará as demais fases.

Essa característica da Máquina a Relutância Variável reforça sua aplicabilidade em diversas aplicações que demandam velocidades variáveis. Nesse sentido, a necessidade de um conversor de potência para o controle da MRV é um fator que a torna competitiva frente a outras máquinas, como a máquina de indução (BILGIN; JIANG; EMADI, 2019; KRISHNAM, 2001). Portanto, em aplicações que requerem velocidade variável, a MRV pode ser uma opção viável e vantajosa em relação a outras máquinas elétricas.

2.1.1 Equações Elétricas e Mecânicas

O circuito de uma única fase da Máquina a Relutância Variável está representado na figura 6, sendo composto de forma simplificada por uma resistência, representando a resistividade do cobre utilizado no enrolamento, uma indutância variável representando a indutância do enrolamento.

A equação da tensão na fase estão apresentadas nas equações 1 e 2.

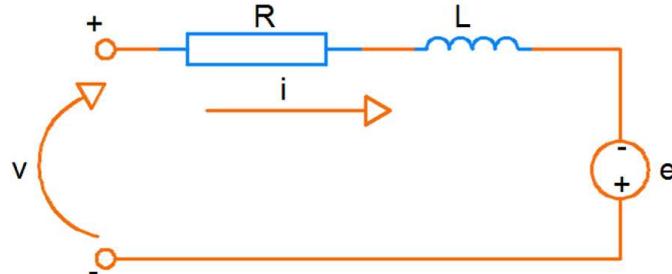
$$v = Ri + \frac{d\lambda(i, \theta)}{dt} \quad (1)$$

$$v = Ri + L(i, \theta) \frac{di}{dt} + e \quad (2)$$

Onde v é a tensão aplicada na fase, i é a corrente da fase, R é a resistência da fase, L é a indutância incremental da fase e θ é a posição do rotor. O terceiro termo do lado

direito da equação 2 é a força contra eletromotriz e , que isoladamente pode ser escrita como:

Figura 6 – Representação do circuito de uma fase da MRV.



Fonte: Autor

$$e = i\omega \frac{L(i, \theta)}{d\theta} \quad (3)$$

Onde, ω é a velocidade angular do rotor.

Tem-se então que a equação 2 pode ser reescrita tal que:

$$v = Ri + L(i, \theta) \frac{di}{dt} + i\omega_m \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (4)$$

Na expressão acima temos que os três termos da direita representam respectivamente, a queda de tensão no resistor, a queda de tensão no indutor e a força contra eletromotriz induzida no circuito equivalente monofásico. Descrito matematicamente o comportamento da tensão no circuito equivalente monofásico por meio da equação 4, podemos de forma simples equacionar a potência de entrada do circuito de maneira que:

$$P_e = vi \quad (5)$$

Onde: P_e - Potência instantânea na entrada do circuito (VA).

Logo,

$$p_e = Ri^2 + iL(i, \theta) \frac{di}{dt} + i^2 \omega_m \frac{\partial L(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (6)$$

Utilizando-se algumas ferramentas matemáticas a fim de obter parâmetros que experimentalmente possam ser mensurados, teremos:

$$p_e = Ri^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(i, \theta) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(i, \theta)}{dt} \quad (7)$$

Na equação 7 observa-se que a potência instantânea de entrada tem como componentes, respectivamente, as perdas resistivas no enrolamento, a taxa de variação da energia

armazenada no campo magnético e a potência entregue no entreferro, a qual é expressa por:

$$P_{ent} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(i, \theta)}{\partial \theta} \omega_m \quad (8)$$

Onde: P_{ent} - Potência instantânea entregue no entreferro (W).

A partir da equação 8 que rege o comportamento da potência entregue no entreferro, equaciona-se o conjugado eletromagnético, tal que:

$$T_{emg} = \frac{P_{ent}}{\omega_m} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (9)$$

é importante salientar que todo o equacionamento acima foi efetuado tomando como base o equivalente monofásico, logo para o MRV 8x6 teremos a expressão geral para produção de conjugado eletromagnético como:

$$T_{emg} = T_a + T_b + T_c + T_d \quad (10)$$

onde: T_a - Conjugado eletromagnético produzido pela fase A(N.m). T_b - Conjugado eletromagnético produzido pela fase B(N.m). T_c - Conjugado eletromagnético produzido pela fase C(N.m). T_d - Conjugado eletromagnético produzido pela fase D(N.m).

substituindo a equação 9 na equação 10, considerando-se as quatro fases da MRV 8x6 teremos:

$$T_{emg} = \frac{1}{2} i_a \frac{\partial L_a(i, \theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_b \frac{\partial L_b(i, \theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_c \frac{\partial L_c(i, \theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_d \frac{\partial L_d(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (11)$$

Para efetuar o equacionamento de forma a se obter o conjugado mecânico disponível a carga acionada pelo motor, faz-se necessário levar em consideração a parcela de conjugado de atrito viscoso e a parcela de conjugado de inércia, de forma que o conjugado mecânico é descrito pela equação 12.

$$T_{mec} = T_{emg} - D_{\omega_m} - J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (12)$$

Onde: D - Coeficiente de atrito viscoso do sistema ($kg \cdot m^2/s$). J - Momento de inércia do sistema ($kg \cdot m^2$)

Tem-se a partir do desenvolvimento acima as equações que descrevem o comportamento elétrico e mecânico do MRV 8x6. Todavia, a fim de representar equações de estados da Máquina a Relutância Variável acionada como motor, estas equações são reagrupadas e reescritas de forma matricial, equação 13, ação a qual facilita o emprego de métodos numéricos para sua solução.

$$[V] = [R][I] + [L]\dot{[I]} \quad (13)$$

em que:

$$V = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ v_d \\ T_{nec} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_d & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}i_a \frac{\partial L_a(i, \theta)}{\partial \theta} & \frac{1}{2}i_b \frac{\partial L_b(i, \theta)}{\partial \theta} & \frac{1}{2}i_c \frac{\partial L_c(i, \theta)}{\partial \theta} & \frac{1}{2}i_d \frac{\partial L_d(i, \theta)}{\partial \theta} & -D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$I = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$L = \begin{bmatrix} L_a(i, \theta) & 0 & 0 & 0 & 0 & i_a \frac{\partial L_a(i, \theta)}{\partial \theta} \\ 0 & L_b(i, \theta) & 0 & 0 & 0 & i_b \frac{\partial L_b(i, \theta)}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & L_c(i, \theta) & 0 & 0 & i_c \frac{\partial L_c(i, \theta)}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & 0 & L_d(i, \theta) & 0 & i_d \frac{\partial L_d(i, \theta)}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\dot{(I)} = \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \\ \dot{i}_d \\ \dot{\omega}_m \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} \quad (18)$$

da equação de estados, Isolando-se a matriz (\dot{I}) obtemos a equação de estados do MRV 8x6, tal que:

$$[\dot{I}] = [L]^{-1}[V] - [L]^{-1}[R][I] \quad (19)$$

A obtenção da equação de estados, 19, permite a descrição completa do comportamento de cada fase da máquina em qualquer instante. As matrizes $[R]$ e $[L]$ são compostas

pelos valores de resistências e indutâncias de cada fase, características construtivas de cada máquina específica. A solução desse sistema é facilitada através de métodos numéricos computacionais.

2.2 Conclusão

O Capítulo 2 apresentou uma revisão abrangente sobre as Máquinas a Relutância Variável, contemplando sua evolução histórica, princípios construtivos e fundamentos de operação. Foram discutidas as vantagens inerentes à sua simplicidade estrutural, robustez e alta eficiência, assim como os desafios relacionados à modelagem e ao controle devido ao comportamento não linear de suas grandezas eletromagnéticas. A análise das equações elétricas e mecânicas que regem o funcionamento da MRV proporcionou o embasamento teórico necessário para a continuidade deste trabalho, possibilitando o desenvolvimento de metodologias de estimativa e controle adaptadas às particularidades dessas máquinas.

CAPÍTULO 3

Levantamento das Curvas de Indutância

O levantamento das curvas de indutância é um aspecto fundamental no estudo de Máquinas a Relutância Variável, uma vez que a variação da indutância é diretamente relacionada ao desempenho e comportamento dessas máquinas. Neste capítulo, são apresentadas duas técnicas para obtenção da superfície de indutância de uma MRV: uma abordagem analítica e o método dos elementos finitos utilizando um software especializado.

A técnica analítica baseia-se na análise da geometria e características eletromagnéticas da máquina, levando em consideração os dados e dimensões do projeto. Através dessa abordagem, é possível estimar as curvas de indutância para diferentes posições do rotor, proporcionando uma compreensão do comportamento da máquina em relação à variação da indutância. Essa técnica é especialmente útil durante a fase de projeto, permitindo avaliar diferentes configurações e otimizar o desempenho da MRV.

Por outro lado, o método dos elementos finitos é uma técnica computacional que utiliza um softwares específicos para modelar e simular o comportamento eletromagnético da máquina. Nessa abordagem, a geometria e as propriedades magnéticas da MRV são discretizadas em elementos finitos, permitindo uma análise detalhada das distribuições de fluxo e campos magnéticos. Com base nesses resultados, é possível obter as curvas de indutância para diferentes posições do rotor, considerando os efeitos não-lineares e as interações magnéticas complexas.

A combinação dessas duas técnicas proporciona uma abordagem abrangente para o levantamento das curvas de indutância em MRVs. Enquanto a abordagem analítica fornece uma visão geral e estimativas iniciais, o método dos elementos finitos permite uma análise mais precisa e detalhada, considerando os aspectos não-lineares e as complexidades do campo magnético.

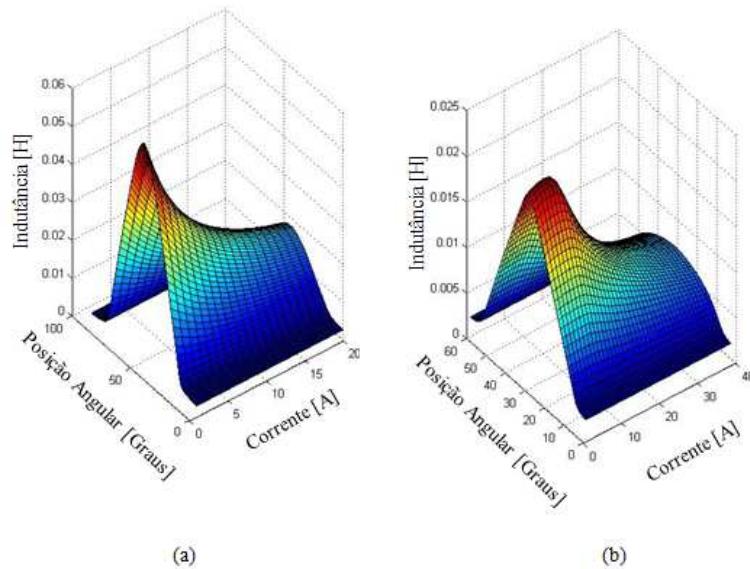
No decorrer deste capítulo, serão apresentados os fundamentos teóricos dessas técnicas, detalhando os procedimentos e considerações necessárias para a obtenção das curvas de indutância. Além disso, serão discutidas as vantagens, limitações e aplicabilidades de cada técnica, bem como os resultados obtidos em estudos de caso. Essas informações

serão essenciais para compreender e analisar o comportamento e desempenho das MRVs em relação à variação da indutância, contribuindo para o avanço no campo de acionamento de máquinas elétricas.

3.1 Modelagem analítica da Indutância

A indutância da Máquina de Relutância Variável exibe um comportamento não linear e de difícil modelagem, dependente tanto do valor da corrente quanto da posição angular do rotor em relação ao estator (BERNADELI, 2008). A Figura 7 apresenta a curva de indutância para uma MRV, sendo a curva (a) referente à Máquina 6x4 descrita em (VIAJANTE, 2013), e a curva (b) correspondente à Máquina 8/6 mencionada em (FIDELIS, 2018), ambas obtidas por meio de simulação utilizando o Método dos Elementos Finitos.

Figura 7 – Superfície de Indutância de uma MRV; (a) MRV 6x4; (b) MRV 8x6

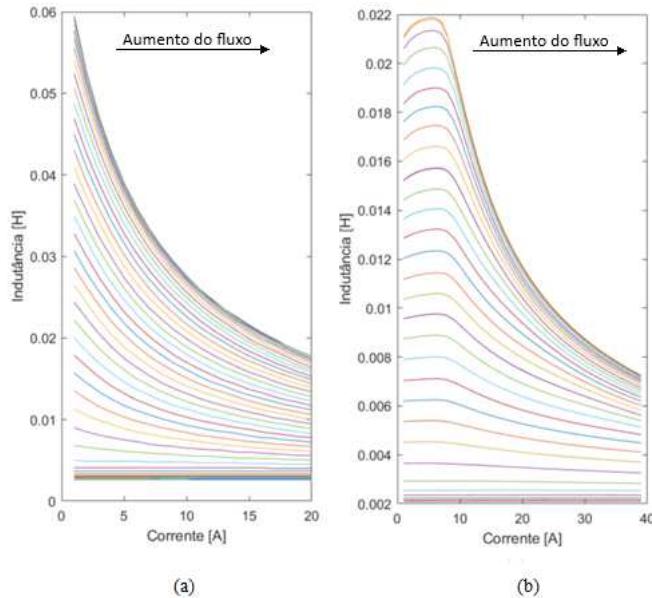


Fonte: (VIAJANTE, 2013), (FIDELIS, 2018)

Devido à influência da corrente e da posição angular, a modelagem matemática dessa curva torna-se complexa. Na Figura 8, é possível observar o comportamento da indutância para diferentes valores de corrente, enquanto na Figura 9 são apresentados os resultados para diferentes valores de posição angular.

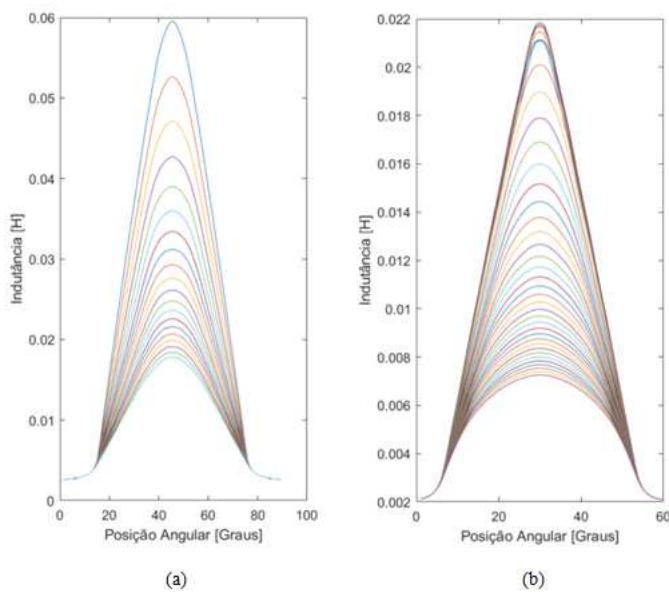
Diversos estudos publicados abordam a aproximação das curvas de indutância da MRV por meio de formas de onda conhecidas, como trapezoidais, senoidais ou modelos linearizados. Embora essas abordagens forneçam resultados aproximados, que podem ser satisfatórios e aceitáveis para algumas aplicações, eles não reproduzem com precisão o comportamento real da indutância.

Figura 8 – Curvas de Indutância; (a) MRV 6x4; (b) MRV 8x6



Fonte: Autor

Figura 9 – Curvas de Indutância; (a) MRV 6x4; (b) MRV 8x6



Fonte: Autor

A análise e determinação das curvas de indutância, bem como as simulações da MRV, usualmente são realizadas utilizando o método dos elementos finitos. No entanto, esse processo pode ser trabalhoso quando há a necessidade de alterar e testar parâmetros da máquina, como dimensões, número de polos no rotor e no estator, número de voltas por

fase, correntes de excitação, ângulos de condução, entre outros. Nesses casos, toda a análise precisa ser refeita, o que demanda várias horas de processamento até a obtenção dos resultados desejados.

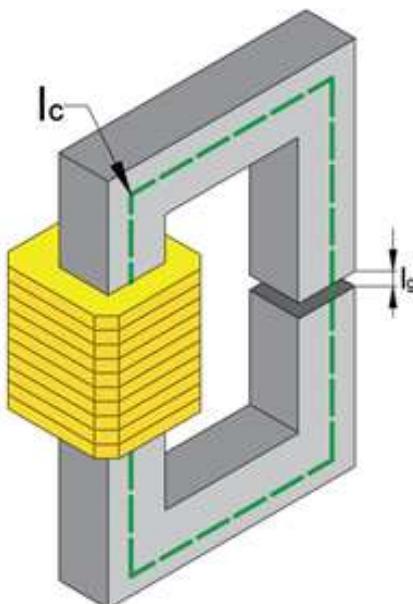
Durante o funcionamento da MRV, seja como motor ou gerador, o valor da indutância depende principalmente de dois fatores: a corrente elétrica e a posição relativa entre o rotor e o estator. A influência da corrente na indutância está relacionada ao fato de a máquina ser acionada em corrente contínua, o que leva a uma rápida saturação do material ferromagnético à medida que a corrente aumenta. Esse fenômeno será explorado neste capítulo. Outro fator que influencia o valor da indutância é a posição do rotor em relação ao estator, pois essa variação altera o entreferro e, consequentemente, a relutância do circuito equivalente, resultando em uma relutância variável e, por consequência, em uma indutância variável.

3.1.1 Análise da Indutância

Quando uma diferença de potencial é aplicada a um circuito magnético, as linhas de fluxo e a corrente não se alteram instantaneamente. A taxa de variação da corrente depende das características magnéticas e do valor da indutância.

Considerando um enrolamento com N espiras em um núcleo de material ferromagnético, ao circular corrente pelo circuito, surge um campo magnético e um fluxo magnético em um loop fechado com um comprimento médio l_c , como ilustrado na Figura 10. A equação elétrica correspondente pode ser expressa conforme apresentado na Equação 20.

Figura 10 – Circuito eletromagnético



Fonte: Autor

$$v = R.i + N \frac{d\varphi}{dt} \quad (20)$$

Conforme estabelecido pela Lei de Ampère e apresentado na Equação 21, a passagem de corrente elétrica pelo circuito resultará no surgimento de um campo magnético.

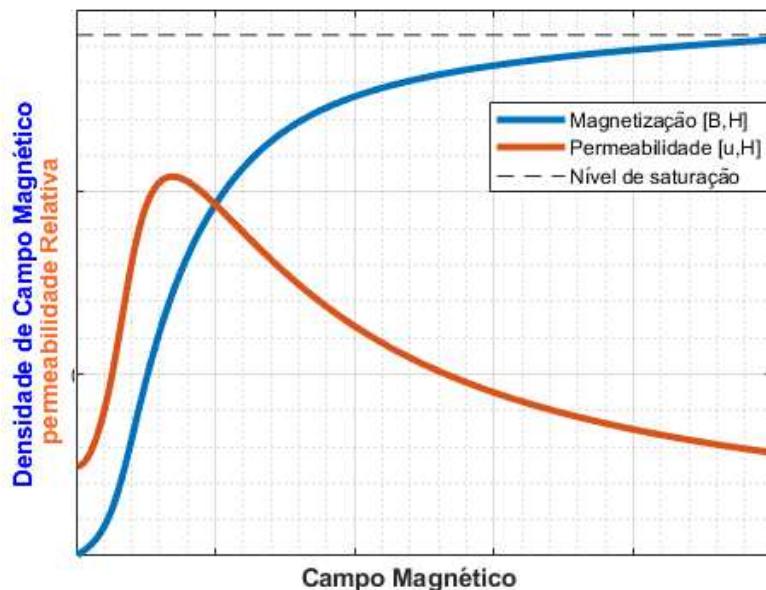
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu \cdot I_{enc} \rightarrow \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{enc} \rightarrow \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = Ni \quad (21)$$

Na equação mencionada, B representa a densidade de campo magnético e H representa a intensidade de campo magnético.

No entanto, é importante destacar que o aumento do campo magnético não resultará em um aumento linear na densidade de fluxo magnético. A partir de um certo ponto, o aumento da corrente e, consequentemente, do campo magnético não causará um aumento correspondente na densidade de fluxo. Isso ocorre devido à saturação do material ferromagnético.

A Figura 11 apresenta uma curva típica de magnetização para um material ferromagnético, juntamente com a curva de permeabilidade relativa desse material. É possível observar que, após um determinado ponto, a permeabilidade relativa começa a diminuir, resultando em um aumento relativamente baixo na densidade de fluxo, mesmo com o aumento do campo magnético. Isso reflete o fenômeno da saturação magnética.

Figura 11 – Circuito eletromagnético



Fonte: (BILGIN; JIANG; EMADI, 2019)

Conforme apresentado na Figura 11, existe uma relação entre H e B para um material ferromagnético, que pode ser descrita pelas equações 22 e 23.

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H \quad (22)$$

$$B = \frac{\varphi}{A_c} \quad (23)$$

Onde A_c é área da seção do material por onde flui o fluxo magnético.

Substituindo a equação 22 na equação 23, obtém-se:

$$\varphi = B \cdot A_c = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H \cdot A_c = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot N \cdot \frac{A_c}{l_c} \cdot i \quad (24)$$

Substituindo na equação 20.

$$v = R \cdot i + N \frac{d\varphi}{dt} = R \cdot i + N \frac{d}{dt} \left(\mu_r \cdot \mu_0 \cdot N \cdot \frac{A_c}{l_c} \cdot i \right) \quad (25)$$

Considerando que os valores entre parênteses dependem da geometria da máquina assumindo-se a ausência de saturação, e portanto, são constantes, obtém-se:

$$v = R \cdot i + \left(\mu_r \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot \frac{A_c}{l_c} \right) \cdot \frac{di}{dt} \quad (26)$$

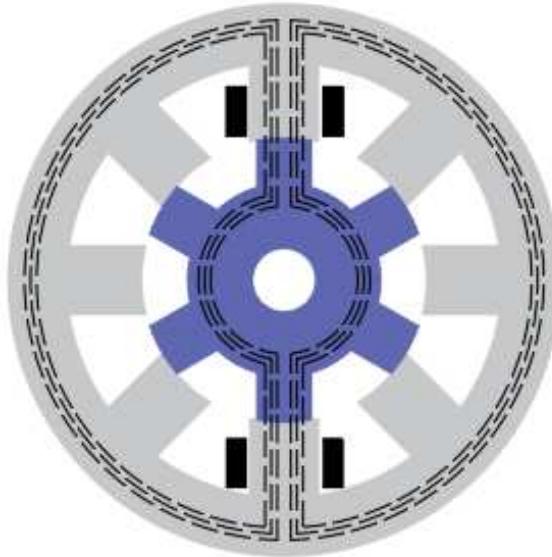
Na equação 26, os termos entre parênteses representam a indutância do circuito e dependem exclusivamente das características físicas do material ferromagnético e do número de voltas do enrolamento. Essa indutância é representada pela letra L e pode ser definida pela equação 27:

$$L = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot \frac{A_c}{l_c} \quad (27)$$

3.1.2 Análise da Relutância

Quando o rotor da Máquina de Relutância Variável se aproxima da posição de alinhamento com o polo do estator, ocorre um aumento no fluxo magnético. Isso se deve ao aumento da permeabilidade magnética causado pela redução do entreferro entre o rotor e o estator. Essa variação da relutância magnética com a mudança do entreferro é uma característica fundamental da máquina, que recebeu seu nome por causa disso. A figura 12 ilustra o caminho preferencial do fluxo magnético durante o alinhamento entre os polos do rotor e do estator.

Figura 12 – Circuito eletromagnético - Caminho preferencial do fluxo magnético



Fonte: Autor

A relutância do caminho preferencial do fluxo magnético pode ser calculada utilizando a equação 28:

$$\mathfrak{R} = \frac{l_c}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A_c} \quad (28)$$

Nessa equação, \mathfrak{R} representa a relutância magnética, l_c é o comprimento do caminho percorrido pelo fluxo magnético, μ_r é a permeabilidade relativa do material, μ_0 é a permeabilidade do vácuo, e A_c é a área da seção transversal do material.

Colocando em termos de indutância, a equação 28 pode ser reescrita e combinada com a equação 23.

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \rightarrow \mathfrak{R} \cdot \varphi = \frac{l_c}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A_c} \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{A_c}{l_c} \cdot N \cdot i \rightarrow \mathfrak{R} \cdot \varphi = N \cdot i \quad (29)$$

A partir da equação 29, podemos estabelecer uma relação entre os circuitos magnéticos e elétricos da Máquina de Relutância Variável. A figura 13 apresenta uma representação do circuito magnético da MRV, que é composto por dois caminhos de fluxo externo, \mathfrak{R}_{c1} e \mathfrak{R}_{c2} , que convergem em um fluxo central (\mathfrak{R}_{c3}). Esse fluxo central passa pelos dois gaps formados entre os polos do rotor e do estator, representados por \mathfrak{R}_{g1} e \mathfrak{R}_{g2} .

Nessa representação, \mathfrak{R}_{c1} e \mathfrak{R}_{c2} representam as relutâncias dos caminhos externos de fluxo magnético, enquanto \mathfrak{R}_{g1} e \mathfrak{R}_{g2} representam as relutâncias dos gaps entre o rotor e o estator. O fluxo central é representado por \mathfrak{R}_{c3} .

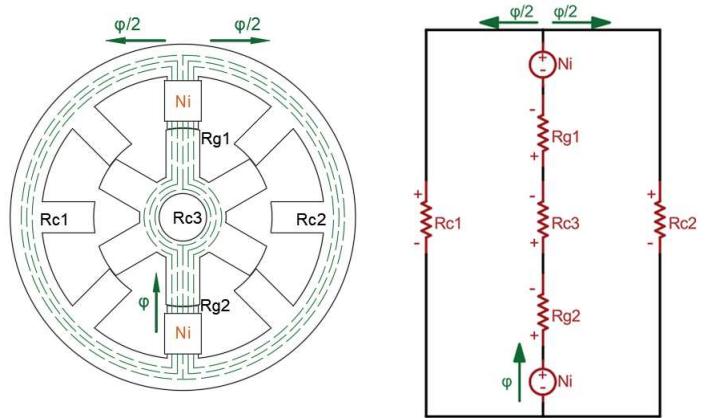
Uma representação simplificada está apresentada na figura 14.

Onde:

$$\Re_g = \Re_{g1} + \Re_{g2} = \frac{l_g}{\mu_0 \cdot A_c} + \frac{l_g}{\mu_0 \cdot A_c} = \frac{2.l_g}{\mu_0 \cdot A_c} \quad (30)$$

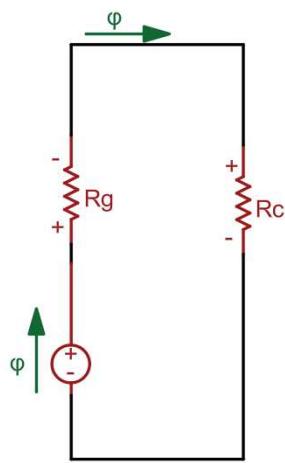
$$\Re_c = \frac{1}{\frac{1}{\Re_{c1}} + \frac{1}{\Re_{c2}}} + \Re_{c3} = \frac{1}{\frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A_c}{l_{c1}}} + \frac{1}{\frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A_c}{l_{c2}}} + \frac{l_{c3}}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A_c} \quad (31)$$

Figura 13 – Representação do circuito magnético da MRV.



Fonte: Autor

Figura 14 – Representação simplificada do circuito magnético da MRV.



Fonte: Autor

Considerando l_{c1} e l_{c2} iguais.

$$\Re_c = \frac{l_{c1}}{2 \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot A_c} + \frac{l_{c3}}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A_c} = \frac{\frac{1}{2}l_{c1} + l_{c3}}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A_c} \quad (32)$$

Resultando em:

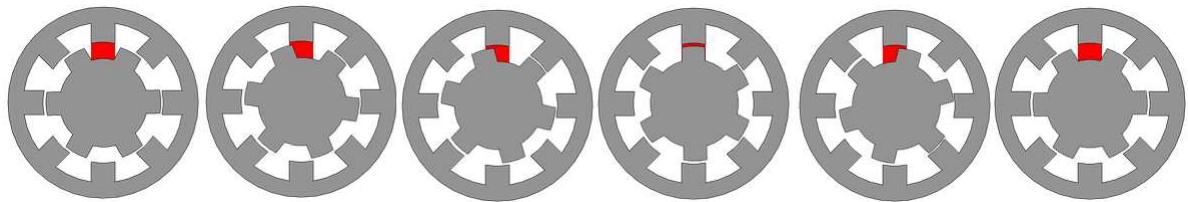
$$l_c = \frac{l}{2}l_{c1} + l_{c3} \quad (33)$$

$$\Re = \Re_g + \Re_c = \frac{2 \cdot l_g}{\mu_0 \cdot A_c} + \frac{l_c}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A_c} \quad (34)$$

3.1.3 Análise do Entreferro

O principal parâmetro a ser obtido para a determinação da relutância é o valor do entreferro, que neste caso não é constante e de difícil análise. A figura 15 exibe uma representação do comportamento do entreferro durante o alinhamento e desalinhamento dos polos.

Figura 15 – Comportamento do entreferro.



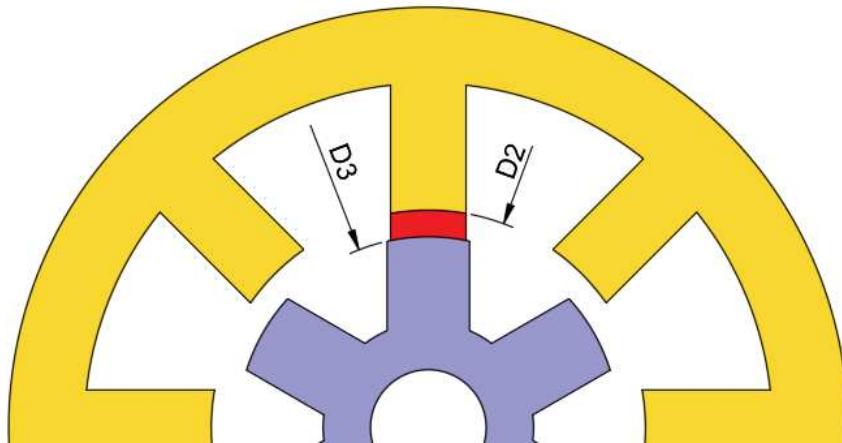
Fonte: Autor

O entreferro é a distância física entre o rotor e o estator da MRV. Durante o alinhamento dos polos, o entreferro é reduzido, permitindo um maior acoplamento magnético e, consequentemente, um aumento no fluxo magnético e diminuição da relutância. Isso ocorre devido ao efeito da permeabilidade magnética, que é afetada pela proximidade dos polos.

Por outro lado, durante o desalinhamento dos polos, o entreferro é aumentado, resultando em um menor acoplamento magnético e, consequentemente, uma redução no fluxo magnético e aumento da relutância. A variação do entreferro afeta diretamente a relutância magnética do circuito, influenciando na indutância e no desempenho da MRV.

Para os instantes de alinhamento entre os polos do rotor e estator, o valor de l_g é de simples obtenção, podendo ser obtido conforme apresentado na equação 35 e figura 16.

Figura 16 – Determinação de l_g para o momento de alinhamento dos polos do rotor e estator.



Fonte: Autor

$$l_{g_alinhado} = \frac{D2}{2} - \frac{D3}{2} \quad (35)$$

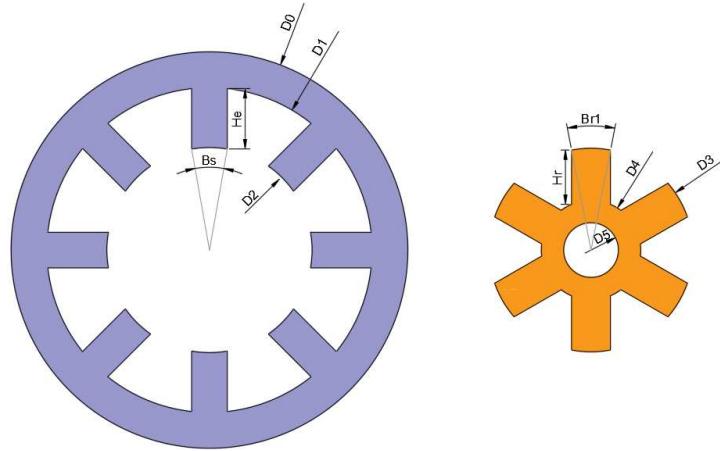
No caso da máquina em questão, o valor do entreferro é o principal parâmetro a ser obtido para a determinação da relutância. No entanto, esse valor não é constante e é de difícil análise, especialmente nas situações intermediárias entre o total alinhamento e total desalinhamento dos polos. Nessas situações, não é possível medir diretamente o valor do entreferro.

Para os instantes de desalinhamento entre os polos, o valor de l_g se torna ainda mais desafiador, pois ao longo de uma volta do rotor, o entreferro varia constantemente. Nesses casos, é necessário realizar uma análise minuciosa do comportamento do entreferro, atribuindo um valor específico de entreferro para cada posição angular do estator em relação ao rotor.

Uma simplificação adotada nessa análise é considerar apenas a área do entreferro, desconsiderando efeitos de espraiamento e linhas de fluxo fora dessa região. Essa simplificação facilita a determinação dos valores de l_g e simplifica o processo de modelagem do comportamento do entreferro, a adoção deste método implica em uma perda de precisão no cálculo, pois limita a área considerada e ignora alguns efeitos magnéticos como espraiamento das linhas de campo, porém ainda assim fornece resultados precisos suficientes para as análises propostas neste trabalho.

Para determinar os valores de l_g , é necessário realizar uma modelagem que represente as curvas do rotor, estator e entreferro. Essa modelagem requer a obtenção de informações a partir das dimensões físicas da máquina MRV. A figura 17 ilustra alguns parâmetros relevantes que devem ser considerados nesse processo de determinação dos valores de l_g .

Figura 17 – Dimensões físicas da MRV.

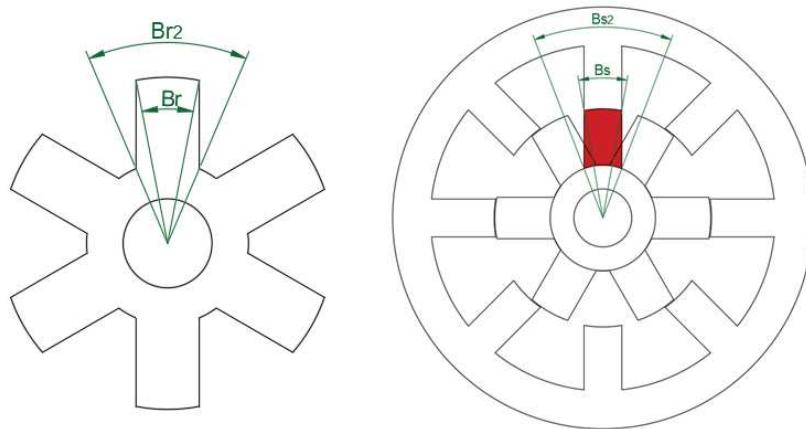


Fonte: Autor

Além das dimensões principais da máquina, também é necessário obter informações adicionais, como o valor do arco na base do polo do rotor e a área considerada para a análise do entreferro. Esses parâmetros são importantes para determinar de forma mais precisa o comportamento do entreferro ao longo das diferentes posições do rotor em relação ao estotor.

A figura 18 ilustra esses parâmetros, onde o arco na base do polo do rotor e a área considerada para a análise do entreferro são destacados. Essas informações são fundamentais para realizar a modelagem e estabelecer equações que descrevam o comportamento do entreferro em diferentes condições de alinhamento e desalinhamento dos polos.

Figura 18 – Dimensões da MRV e área considerada para o entreferro.

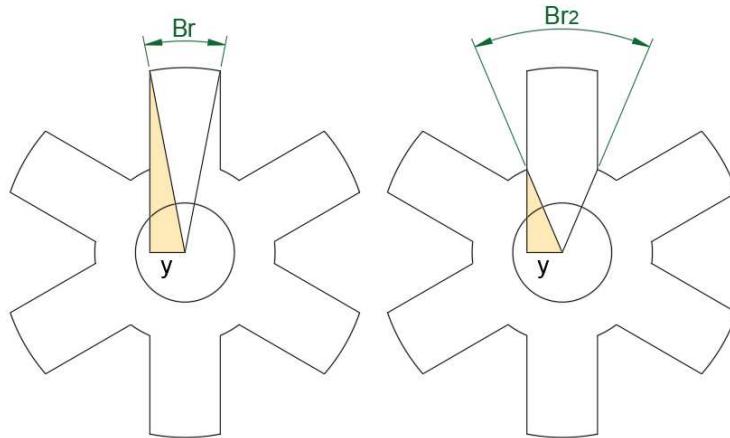


Fonte: Autor

Os ângulos B_{r2} e B_{s2} podem ser determinados através de uma análise trigonométrica

da geometria envolvida. A figura 19 ilustra um esboço dessa representação, resultando na seguinte equação trigonométrica:

Figura 19 – Análise do angulo da base do polo do rotor.



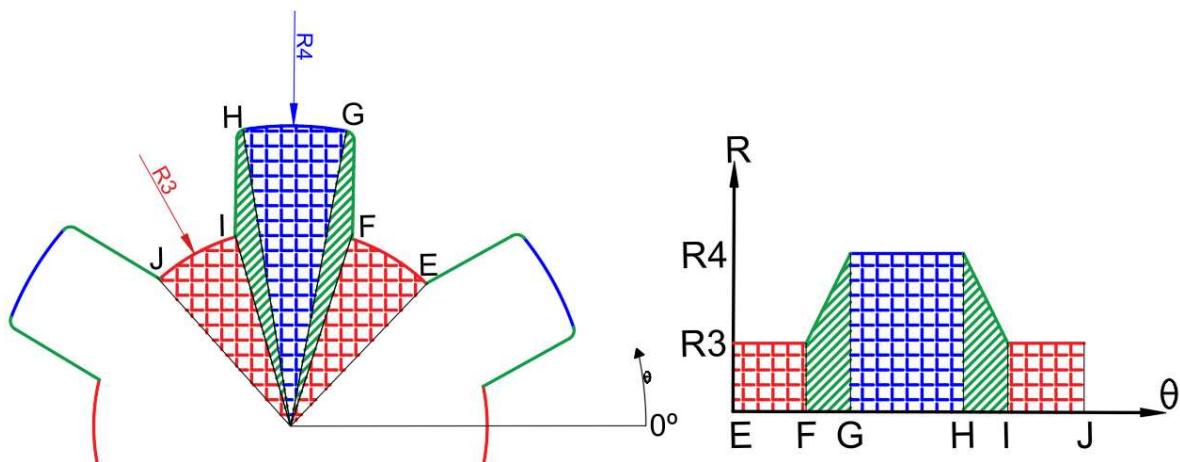
Fonte: Autor

$$y = \frac{D_3}{2} \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{\beta_r}{2}\right) \quad (36)$$

$$\beta_{r2} = \pi - 2 \cdot \left(\operatorname{acos}\left(\frac{y}{\frac{D_4}{2}}\right) \right) \quad (37)$$

Com essas informações, podemos representar as curvas do rotor em uma forma polar, considerando as distâncias do centro da máquina até os limites do rotor. Isso é ilustrado na figura 20 e expresso pela seguinte equação:

Figura 20 – Representação do rotor.



Fonte: Autor

$$Reta_{FG} = \frac{R4 - R3}{G - F} \cdot (\theta - F) + R3 \quad (38)$$

$$Reta_{HI} = \frac{R3 - R4}{I - H} \cdot (\theta - H) + R4 \quad (39)$$

$$\begin{aligned} Rotor(\theta) = & \frac{D^4}{2} + Reta_{FG} \cdot (u(\theta - F) - u(\theta - G)) + \\ & (R4 - R3) \cdot (u(\theta - G) - u(\theta - H)) + reta_{HI}(u(\theta - H) - u(\theta - I)) \end{aligned} \quad (40)$$

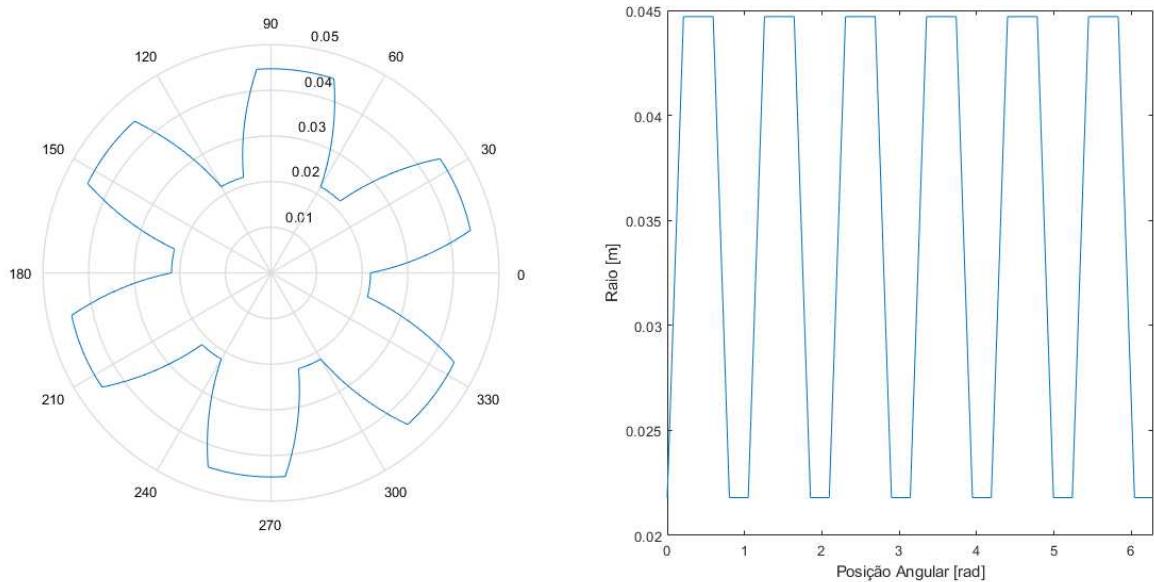
Onde $u(\theta - \theta_0)$ é a função degrau unitário.

A figura 21 apresenta o resultado na forma polar e cartesiana, considerando as equações 41 e 42.

$$x = Rotor(\theta) \cdot \cos(\theta) \quad (41)$$

$$y = Rotor(\theta) \cdot \sin(\theta) \quad (42)$$

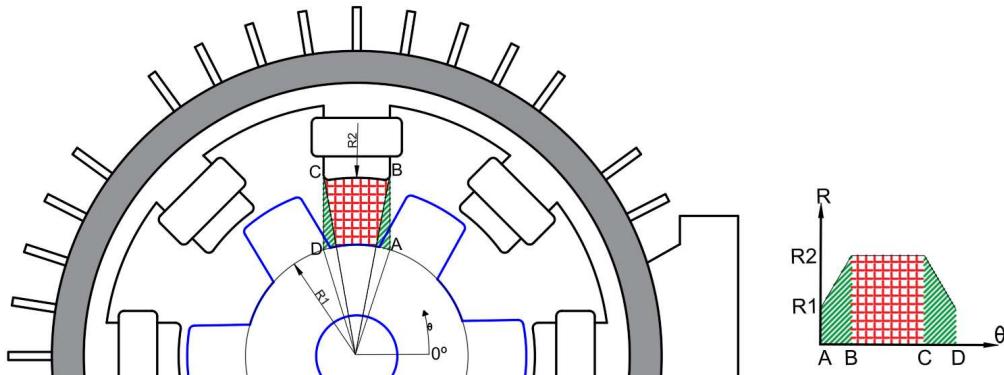
Figura 21 – Curvas do rotor no formato polar e cartesiano.



Fonte: Autor

A modelagem da região a ser considerada no entreferro foi feita considerando a área de interesse destacada na figura 22.

Figura 22 – Área de interesse, considerada na determinação do entreferro.



Fonte: Autor

A modelagem da curva, aqui denominada região de entreferro ($R_{entreferro}$), está apresentada na equação 45.

$$Reta_{AB} = \frac{R2 - R1}{B - A} \cdot (\theta - A) + R1 \quad (43)$$

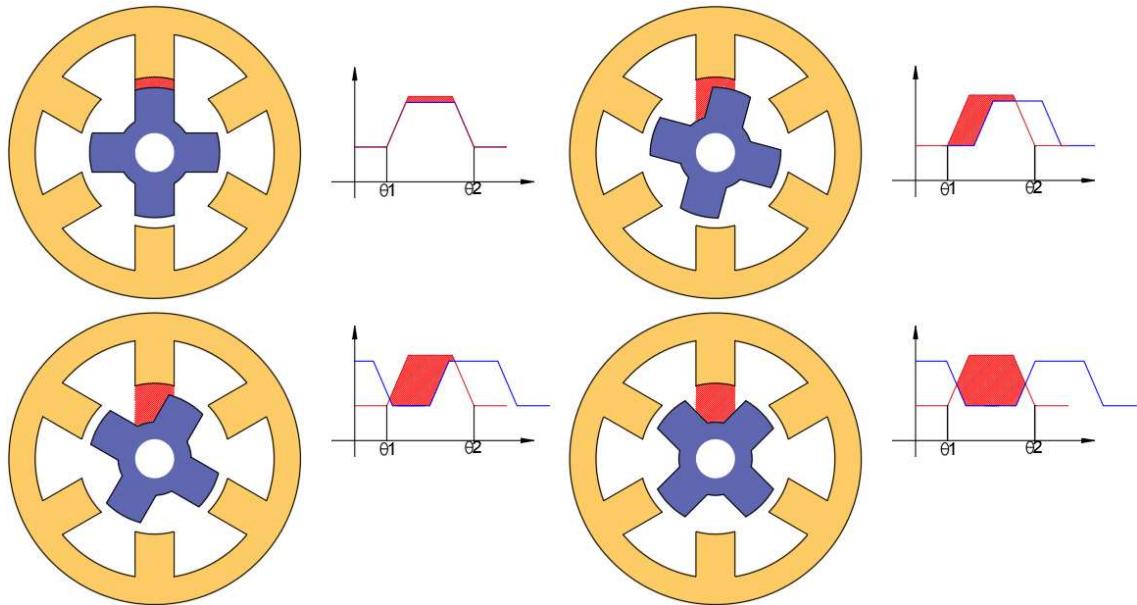
$$Reta_{CD} = \frac{R1 - R2}{D - C} \cdot (\theta - C) + R3 \quad (44)$$

$$R_{entreferro} = R1 + Reta_{AB}(u(\theta - A) - u(\theta - B)) + (R2 - R1) \cdot (u(\theta - B) - u(\theta - C)) + Reta_{CD}(u(\theta - C) - u(\theta - D)) \quad (45)$$

Utilizando as informações das curvas do rotor e da região do entreferro, é possível determinar o valor do entreferro para cada posição angular da máquina. Isso pode ser feito subtraindo as duas curvas dentro do intervalo considerado para o entreferro. Essa abordagem permite obter uma representação do comportamento do entreferro em relação à posição angular, como ilustrado na figura 23.

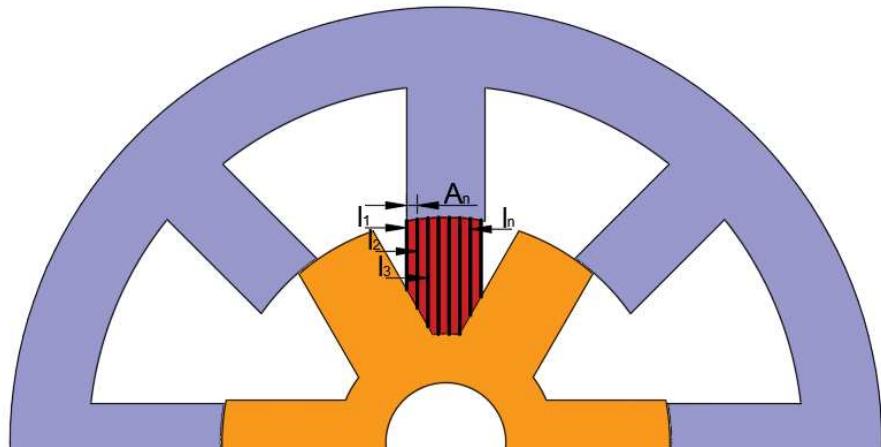
Para calcular a relutância do entreferro em diferentes posições angulares, foi adotada a estratégia de subdividir a região do entreferro em n partes. Em cada intervalo, a relutância é calculada considerando as propriedades geométricas e materiais do entreferro naquela posição específica. Esse processo é repetido para todos os intervalos, e a relutância resultante é obtida somando as relutâncias de cada intervalo. Essa abordagem permite obter uma estimativa precisa da relutância total do entreferro em relação à posição angular, conforme ilustrado na figura 24.

Figura 23 – Variação do entreferro.



Fonte: Autor

Figura 24 – Divisão da área do entreferro.



Fonte: Autor

Onde:

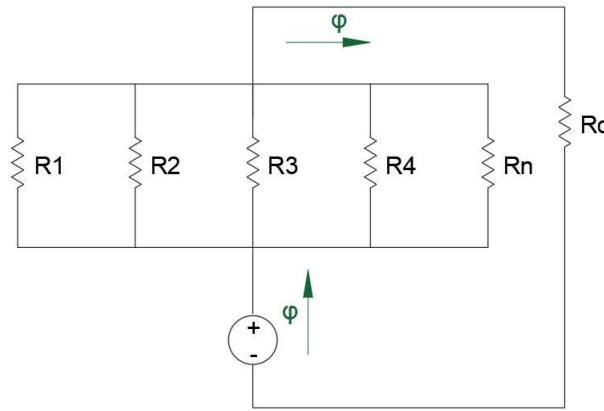
$$A_n = \frac{\text{Area_Entreferro}}{n} = \frac{z \left(\beta_s \cdot \frac{D_2}{2} \right)}{n} \quad (46)$$

A abordagem adotada para calcular o valor do entreferro em cada intervalo consiste em subtrair as curvas que representam o rotor e a região do entreferro na posição angular específica. Essa diferença fornece a medida do entreferro para aquele intervalo em parti-

cular. Para realizar essa análise, um circuito equivalente foi considerado, como ilustrado na figura 25.

Nesse circuito equivalente, cada intervalo do entreferro é representado por uma relutância específica, calculada com base nas dimensões e propriedades materiais do bloco que forma o estator. O valor do entreferro em cada intervalo é então obtido pela diferença entre as curvas do rotor e do entreferro naquela posição angular.

Figura 25 – Circuito equivalente com a divisão do entreferro em regiões.



Fonte: Autor

Este circuito equivalente pode ser calculado através da equação 50.

$$\mathfrak{R}_g = \frac{1}{\frac{1}{\mathfrak{R}_1} + \frac{1}{\mathfrak{R}_2} + \frac{1}{\mathfrak{R}_3} + \dots + \frac{1}{\mathfrak{R}_n}} \quad (47)$$

$$\mathfrak{R}_g = \frac{1}{\frac{1}{\frac{l_{g1}}{\mu \cdot A_n}} + \frac{1}{\frac{l_{g2}}{\mu \cdot A_n}} + \frac{1}{\frac{l_{g3}}{\mu \cdot A_n}} + \dots + \frac{1}{\frac{l_{gn}}{\mu \cdot A_n}}} \quad (48)$$

$$\mathfrak{R}_g = \frac{1}{\mu \frac{A_e}{n} \left(\frac{1}{l_{g1}} + \frac{1}{l_{g2}} + \frac{1}{l_{g3}} + \dots + \frac{1}{l_{gn}} \right)} \quad (49)$$

O valor da relutância, neste caso, depende diretamente da posição rotórica relativa entre o estator e rotor.

$$\mathfrak{R}_g(\theta) = \frac{1}{\mu \frac{A_e}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{l_{g(\theta,k)}} \right)} \quad (50)$$

Considerando a parcela da equação correspondente ao valor do entreferro (μ_g), algumas simplificações na representação serão propostas.

$$\mu_g = \frac{1}{n} \quad (51)$$

Através de manipulações algébricas da parcela correspondente a variação do entreferro na equação 50, o valor final da parcela da relutância total referente ao entreferro l_{ef} poderá ser escrito segundo a equação 52, sendo duas vezes o valor de $\Re_g(\theta)$ apresentado na equação 50, devido ao espelhamento do entreferro no polo oposto.

$$l_{ef}(\theta) = \frac{2}{\sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{l_g(\theta,k)} \right)} \quad (52)$$

Desta forma, a parcela da relutância referente ao entre ferro pode ser escrita substituindo 52 e 51 em 50.

$$\Re_g(\theta) = \frac{l_{ef}(\theta)}{\mu_g \mu_0 A_e} \quad (53)$$

A parcela da relutância total referente ao núcleo pode ser escrita conforme equação 54. Considerando o acionamento da MRV feita em corrente contínua e os efeitos de saturação do material ferro-magnético, pode se afirmar que tal parcela da relutância será dependente do valor da corrente circulando na fase da MRV.

$$\Re_c(i) = \frac{l_c}{\mu_r \mu_0 A_e} \quad (54)$$

o valor da Permeabilidade magnética do material não é constante e dependente da corrente.

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (55)$$

$$\mu_r(i) \mu_0 = \frac{B(i)}{H(i)} \quad (56)$$

Finalmente a equação da relutância para a MRV, de dimensões genéricas, considerando a influência da posição rotórica e efeitos de saturação provocados pela corrente, está apresentada na equação 57.

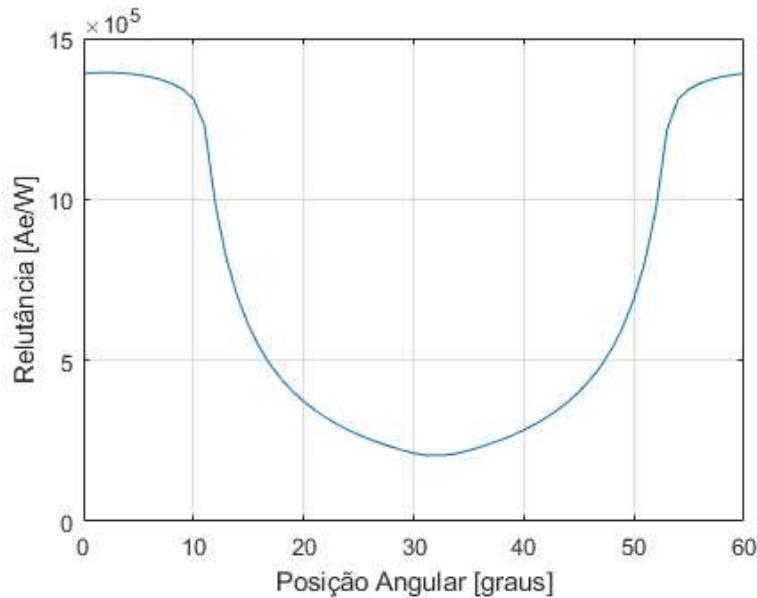
$$\Re(\theta, i) = \frac{l_{ef}(\theta)}{\mu_g \mu_0 A_e} + \frac{l_c}{\mu_r(i) \mu_0 A_c} \quad (57)$$

3.1.4 Determinação da Indutância

A partir da equação 57 é possível determinar a relutância total do circuito, dividida em duas partes, uma correspondente à influência do núcleo ferromagnético e outra correspondente à influência do entreferro. Sendo estas dependentes das características físicas da máquina, corrente e posição angular.

Resolvendo a primeira parte da equação, representando a contribuição do entreferro na formação da relutância, para a máquina 01, indentificada na tabela 1 obteve se a forma de onda apresentada na figura 26.

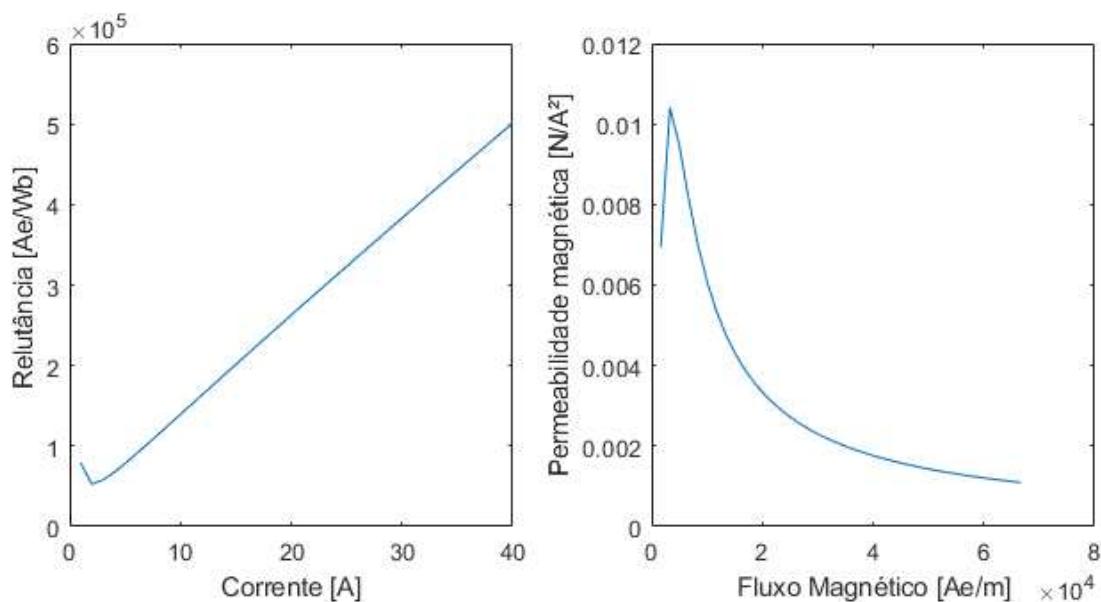
Figura 26 – Relutância magnética com a variação do entreferro.



Fonte: Autor

A segunda parte da equação, correspondente à contribuição do material ferromagnético para a composição da relutância total, obteve-se como resultado as curvas apresentadas na figura 27, onde é exibido o valor da relutância correspondente ao material ferromagnético e o comportamento da permeabilidade magnética do material com o aumento da corrente.

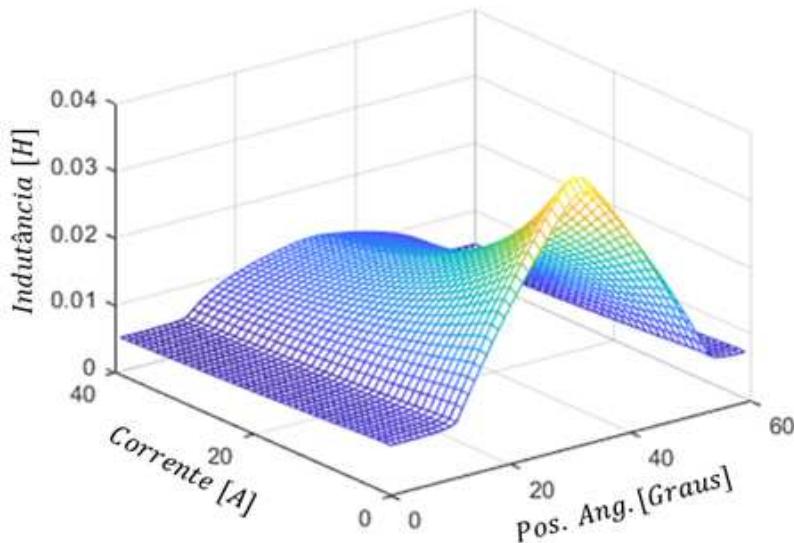
Figura 27 – Relutância magnética com a variação da corrente.



Fonte: Autor

A forma de onda final, tridimensional para a superfície de indutância calculada a partir da equação 57 está apresentada na figura 28,

Figura 28 – Superfície de Indutância obtida pelo método analítico.



Fonte: Autor

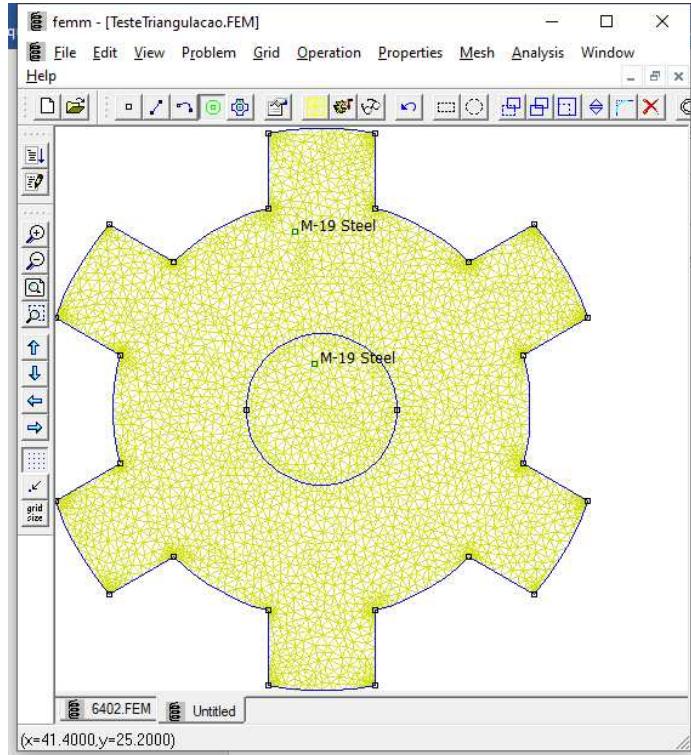
3.2 Obtenção das Curvas através de Elementos Finitos

O software Finite Element Method Magnetics (FEMM) foi utilizado para obter as curvas de indutância por meio do método dos elementos finitos. O FEMM é um software de distribuição livre que consiste em um conjunto de programas projetados para resolver problemas eletromagnéticos em baixa frequência. Ele trabalha em duas dimensões, considerando os domínios planar e axissimétrico, com uma profundidade fixa.

A interface do FEMM, mostrada na figura 29, permite aos usuários configurar e executar simulações de problemas magnetostáticos lineares e não lineares, problemas magnéticos com componentes harmônicas, problemas eletrostáticos lineares e problemas de fluxo de calor em regime permanente.

Uma das vantagens do FEMM é a capacidade de automação por meio de scripts na linguagem Lua. Esses scripts podem ser lidos diretamente do disco rígido do computador ou executados linha a linha usando um interpretador incorporado no software. Essa funcionalidade permite uma maior flexibilidade na configuração e execução das simulações, além de facilitar a análise e o processamento dos resultados obtidos.

Figura 29 – Interface do software FEMM.



Fonte: Autor

Durante a análise e testes da modelagem descrita neste capítulo, foram realizadas simulações por elementos finitos em diversas MRVs com diferentes características físicas e dimensões. Essas simulações resultaram em um banco de dados contendo curvas de indutância para uma variedade de configurações e especificações, permitindo avaliar a performance do método analítico em comparação com os elementos finitos.

No total, foram simuladas 28 máquinas diferentes, sendo 14 máquinas com a configuração 6x4 e 14 máquinas com a configuração 8x6. A Tabela 1 apresenta os dados das máquinas simuladas com a topologia 8x6, enquanto a Tabela 2 apresenta os dados das máquinas simuladas com a topologia 6x4. As máquinas 01 e 15 correspondem a geometrias projetadas e utilizadas nos trabalhos (FILHO, 2017) e (BERNADELI, 2008), respectivamente. As demais máquinas são variações das dimensões das máquinas de referência, com o objetivo de criar alterações nos dados de projeto e, consequentemente, na indutância, permitindo comparar os resultados dos dois métodos.

Essa abordagem de simular diferentes configurações de máquinas permitiu uma análise abrangente da influência das dimensões e especificações na indutância da MRV. Além disso, ao comparar os resultados obtidos pelos métodos analítico e por elementos finitos, é possível validar a precisão e a confiabilidade do método analítico proposto.

Tabela 1 – Dados de projeto para MRV 8x6

	N	D1	D2	D3	D4	D5	g	Bs	Br1	Br2	Hr	Hs	z
M 01	100	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	20	22	46	22,9	26,3	85
M 02	100	142,6	90	89,4	66,18	24	0,3	20	22	30	11,61	26,3	85
M 03	100	116,24	90	89,4	43,6	24	0,3	20	22	46	22,9	13,12	85
M 04	100	142,6	60	88	43,6	24	1	20	22	46	22,2	26,3	85
M 05	100	142,6	115	114,4	43,6	24	0,3	16	17	46	35,4	13,8	85
M 06	100	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	30	22	46	22,9	26,3	85
M 07	100	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	10	22	46	22,9	26,3	85
M 08	100	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	20	26	56	22,9	26,3	85
M 09	100	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	20	18	37	22,9	26,3	85
M 10	100	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	20	46	46	22,9	26,3	85
M 11	100	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	20	22	22	22,9	26,3	85
M 12	200	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	20	22	46	22,9	26,3	85
M 13	100	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	20	22	46	22,9	26,3	170
M 14	100	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	20	22	46	22,9	26,3	50

Fonte: Autor

Tabela 2 – Dados de projeto para MRV 6x4

	N	D1	D2	D3	D4	D5	g	Bs	Br1	Br2	Hr	Hs	z
M 15	100	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	30	28	59	22,9	26,3	85
M16	100	142,6	90	89,4	66,18	24	0,3	30	28	38	11,61	26,3	85
M17	100	116,24	90	89,4	43,6	24	0,3	30	28	59	22,9	13,12	85
M 18	100	142,6	60	88	43,6	24	1	30	28	59	22,2	26,3	85
M 19	100	142,6	115	144,4	43,6	24	0,3	23	22	59	35,4	13,8	85
M 20	100	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	35	28	59	22,9	26,3	85
M 21	100	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	20	28	59	22,9	26,3	85
M 22	100	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	30	34	74	22,9	26,3	85
M 23	100	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	30	20	42	22,9	26,3	85
M 24	100	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	30	59	59	22,9	26,3	85
M 25	100	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	30	28	28	22,9	26,3	85
M26	200	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	30	28	59	22,9	26,3	85
M 27	100	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	30	28	59	22,9	26,3	170
M 28	100	142,6	90	89,4	43,6	24	0,3	30	28	59	22,9	26,3	50

Fonte: Autor

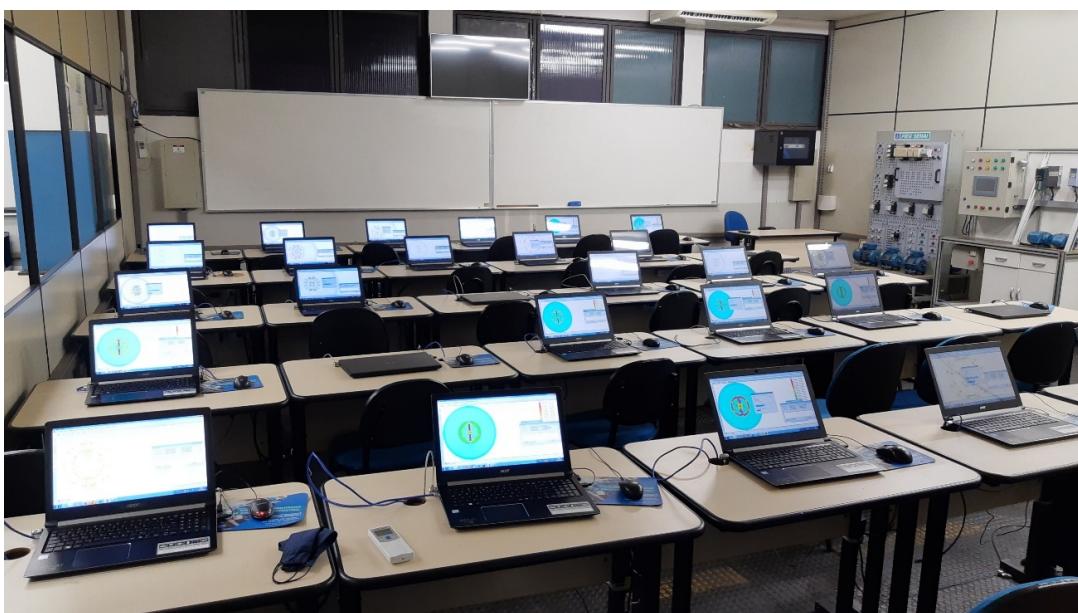
O processo de simulação por elementos finitos requer um considerável esforço computacional, uma vez que a malha é subdividida em triângulos e o número de cálculos necessários para a convergência dos resultados aumenta. Quanto maior for a subdivisão utilizada, maior será a precisão do modelo, porém, também será necessário um maior poder computacional para realizar os cálculos.

No caso das máquinas simuladas, o processo completo de simulação poderia levar horas ou até mesmo dias, dependendo da precisão configurada. Portanto, optou-se por automatizar a coleta de dados e o funcionamento das simulações utilizando scripts na linguagem Lua. Os desenhos de cada uma das máquinas foram feitos no AutoCAD e posteriormente importados para o software.

A fim de agilizar o processamento e a geração dos resultados, foi criado um cluster composto por 30 computadores. Dessa forma, o poder computacional de todos os computadores foi combinado para acelerar a coleta de resultados para as 28 máquinas simuladas. As etapas de cálculo e pós-processamento foram divididas entre as máquinas do cluster. A Figura 30 ilustra o cluster formado, onde os scripts em Lua foram utilizados para gerenciar e coletar os dados das simulações.

Essa abordagem de uso de um cluster de computadores permitiu acelerar o processo de simulação e reduzir o tempo necessário para obter os resultados desejados.

Figura 30 – Cluster de computadores para calculo dos elementos finitos.

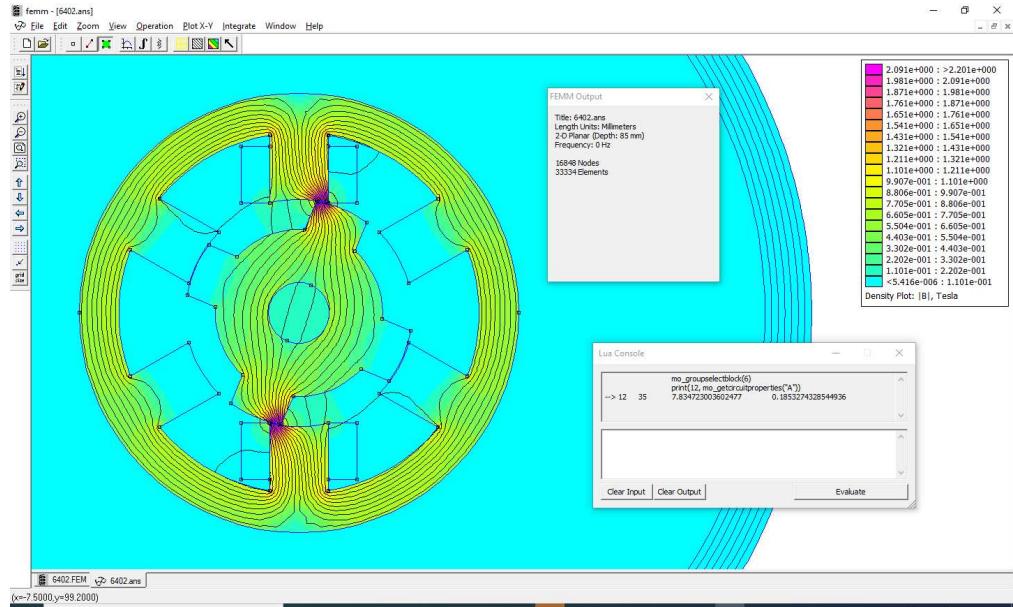


Fonte: Autor

O processo de simulação por elementos finitos envolveu um esforço computacional significativo, com um tempo total de processamento contínuo de 9 horas e 45 minutos nos 30 computadores utilizados. Isso corresponde a um esforço computacional equivalente a aproximadamente 292 horas e 30 minutos de processamento. Durante as simulações, foram gerados cerca de 1,82 GB de dados, incluindo imagens, caminhos preferenciais de fluxo, tabelas de fluxo, corrente, entre outros.

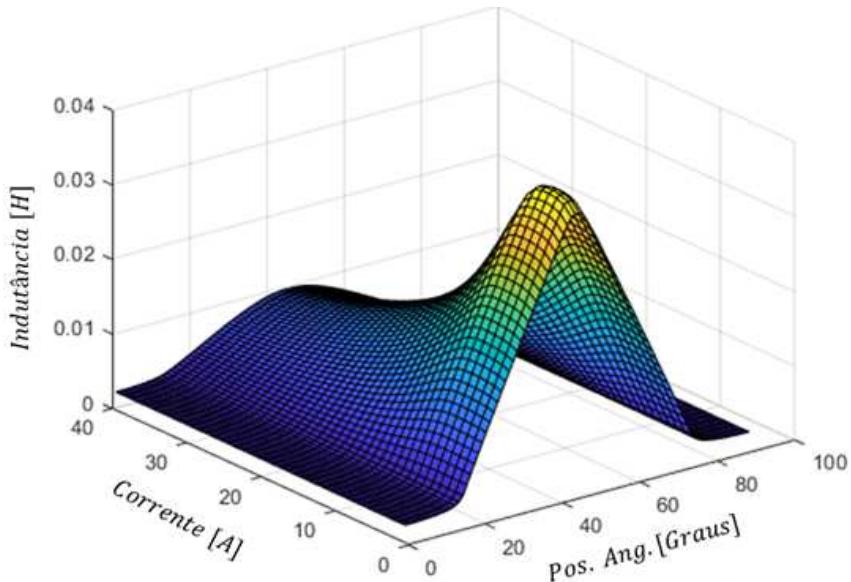
Após a coleta dos dados de simulação, os mesmos foram importados no MATLAB para realizar o pós-processamento e obter as curvas de indutância desejadas. A Figura 31 ilustra uma das telas de pós-processamento, onde é possível visualizar as linhas de fluxo magnético circulando no rotor e estator da máquina, bem como o prompt dos comandos da linguagem Lua exibindo os dados processados. Já a Figura 32 apresenta um exemplo de uma das curvas de indutância obtidas a partir desses dados.

Figura 31 – Tela apresentada no pós processamento.



Fonte: Autor

Figura 32 – Curva obtida com o FEM.



Fonte: Autor

3.3 Conclusão

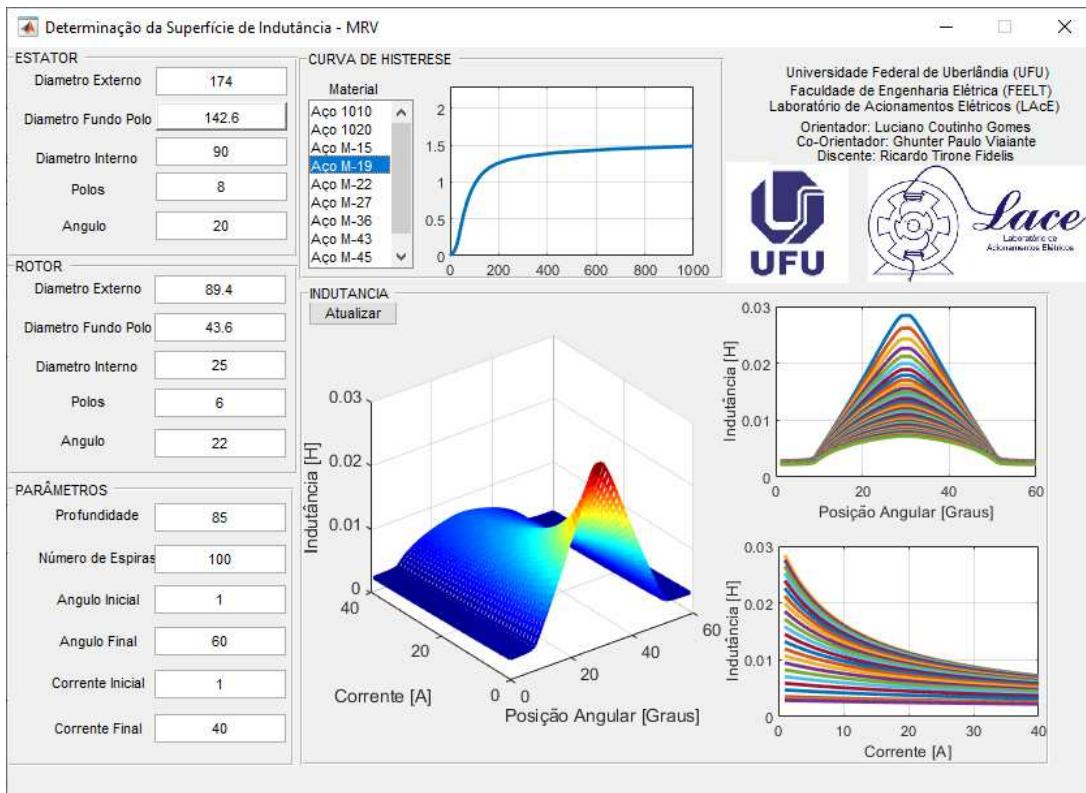
O desenvolvimento do algoritmo baseado na equação 57 proporcionou uma ferramenta para simplificar e agilizar a utilização do método proposto. A figura 33 apresenta a

interface gráfica do algoritmo desenvolvido. Nessa interface, o usuário tem a possibilidade de inserir os dados relacionados às dimensões físicas da MRV, parâmetros de projeto e selecionar o material de construção do núcleo.

Ao acionar o algoritmo, uma representação esquemática da superfície de indutância é exibida na tela, proporcionando uma visualização inicial dos resultados. Além disso, o algoritmo gera um arquivo em formato *.txt que contém o resultado completo das análises realizadas.

Essa abordagem facilita o uso do método proposto, permitindo que os usuários insiram os dados relevantes de forma intuitiva e obtenham os resultados de indutância de maneira rápida e conveniente. O arquivo de saída possibilita uma análise mais detalhada posteriormente, se necessário.

Figura 33 – Interface do algoritmo desenvolvido para calculo da indutância.



Fonte: Autor

O método apresentado aqui não tem como objetivo alcançar os mesmos níveis de precisão obtidos pela análise por Elementos Finitos, uma vez que foram feitas algumas aproximações e considerações para obter as equações finais. O objetivo é obter rapidamente, com relativa precisão, os parâmetros de indução da MRV, que são importantes para estudos e projetos da MRV.

Comparando com as curvas de indutância obtidas por elementos finitos apresentadas

neste capítulo, para obter todas as curvas das 28 máquinas apresentadas nas tabelas 1 e 2, o método analítico levou apenas 19,04 segundos usando apenas um computador. Já para obter as mesmas curvas pelo método dos elementos finitos, foram necessários 30 computadores trabalhando continuamente por um período de 9,75 horas, equivalendo a um esforço computacional de 292,3 horas.

Os resultados a seguir fazem uma comparação entre os resultados obtidos por elementos finitos e pelo método analítico, demonstrando que, com um nível aceitável de precisão, foi possível determinar as curvas de indutância em uma fração do tempo necessário pelos métodos finitos.

As figuras e tabelas a seguir apresentam alguns resultados obtidos com elementos finitos e pelo método analítico. Resultados semelhantes em termos de precisão e acurácia foram obtidos para as 28 variações da máquina simulada. É importante destacar que os resultados apresentados aqui utilizaram um número de divisões para o entreferro de $n = 100$, percebeu-se que ao aumentar o número de divisões acima deste valor, aumentou o esforço computacional e tempo de resposta sem impactar no resultado obtido.

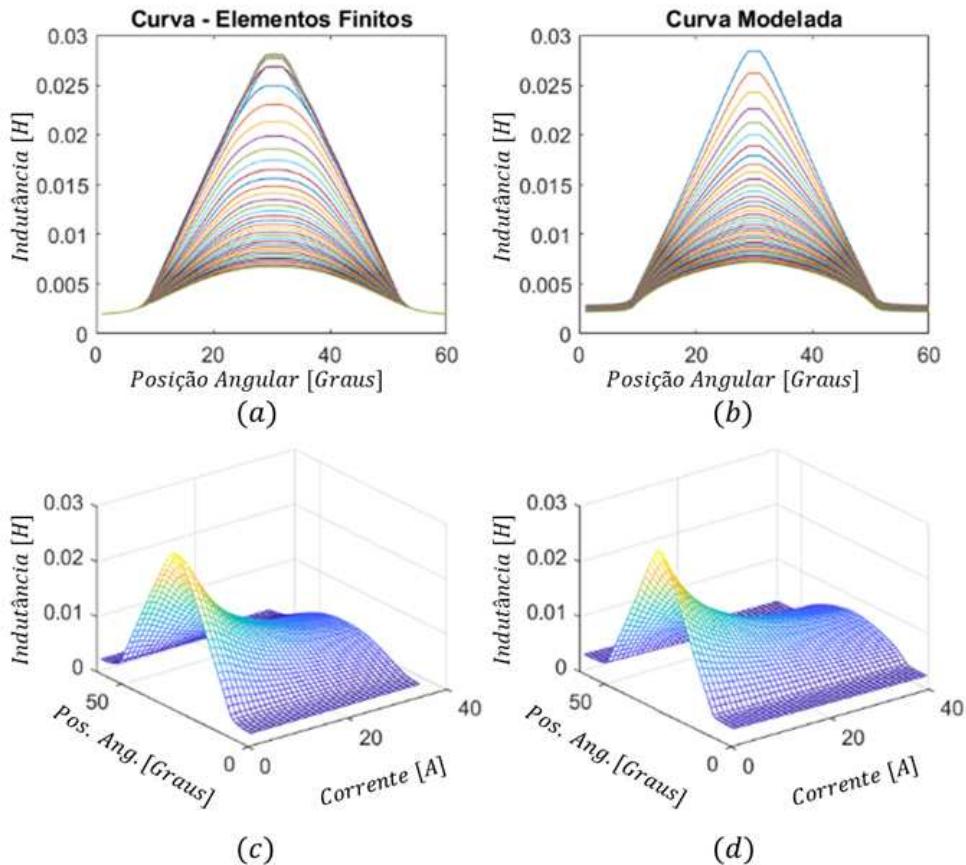
A figura 34 apresenta os resultados obtidos para a máquina 01, e resultados semelhantes foram obtidos para as outras máquinas. A tabela 3 apresenta os valores correspondentes.

Os resultados obtidos demonstram que a modelagem apresentada é uma ferramenta útil para testes e análises rápidas durante a fase de projeto das máquinas ou em simulações computacionais. Além disso, os resultados também servem como referência para a modelagem descrita nos capítulos seguintes, que visam estimar o conjugado a partir da indutância instantânea.

Ao utilizar essa abordagem de modelagem, é possível obter informações importantes sobre o comportamento das máquinas, como variações da indutância em diferentes posições angulares e parâmetros de projeto específicos. Essas informações podem auxiliar os engenheiros na tomada de decisões durante o processo de projeto, permitindo ajustes e otimizações mais precisas.

Além disso, a modelagem proposta pode ser uma alternativa mais rápida e eficiente em comparação com métodos mais complexos, como a análise por elementos finitos. Isso possibilita uma análise preliminar mais ágil e uma avaliação inicial da performance da máquina.

Figura 34 – Resultado obtido - Maquina 01. (a) Curva obtida por elementos finitos; (b) Curva obtida pelo algoritmo; (c) Superfície obtida por elementos finitos; (d) superfície obtida pelo algoritmo



Fonte: Autor

Tabela 3 – Tabela comparativa - Máquina 01

	Elementos Finitos	Analítico
Mínimo	2,00 mH	2,20 mH
Máximo	28,10 mH	28,40 mH
$\theta = 1$	2,00 mH	2,90 mH
$\theta = 10$	4,90 mH	4,70 mH
$\theta = 20$	17,10 mH	17,20 mH
$\theta = 30$	26,90 mH	28,40 mH
$\theta = 40$	18,20 mH	17,20 mH
$\theta = 50$	6,10 mH	4,70 mH
$\theta = 60$	2,00 mH	2,90 mH

Fonte: Autor

CAPÍTULO 4

Estimador de Indutância

Este capítulo traz uma metodologia para obtenção de uma função, $L(i, \theta)$, para determinar a indutância instantânea em uma MRV a partir de uma superfície de indutância obtida previamente, considerando dois parâmetros de entrada: corrente na fase da máquina, i , e posição angular do rotor, θ , a indutância instantânea é então utilizada para estimar outros parâmetros da máquina como conjugado eletromagnético, fluxo magnético, potência e rendimento, funcionando como instrumentos virtuais. O método proposto consiste na resolução de funções polinômias modeladas como splines cúbicas escritas no formato de Lagrange, resultando em polinômios de terceira ordem, contínuos e deriváveis em todo o domínio considerado, tendo um excelente desempenho para aplicações em simulações e açãoamentos experimentais.

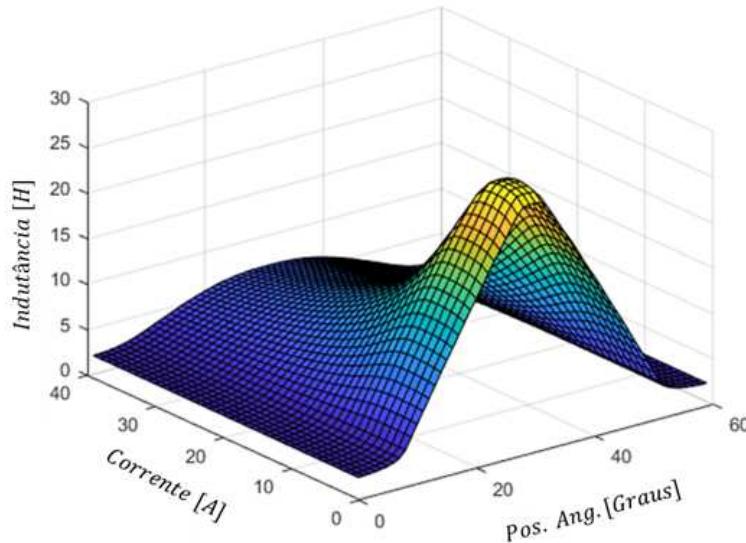
4.1 Análise preliminar da superfície de indutância

Estudando o comportamento da indutância na MRV, percebe-se que, mesmo não linear, existem alguns padrões de comportamento, a indutância apresenta uma tendência de redução para valores maiores de corrente, em função da saturação do material ferromagnético, enquanto tende a apresentar valores maiores para a posição angular de alinhamento dos polos do rotor e estator, situação em que o entreferro é mínimo, conforme exibido na figura 35.

Uma forma rápida de identificar estes padrões na superfície é analisar as suas curvas de níveis, conforme apresentado na figura 36. A figura 36 apresenta uma coleção de mapas de contorno, onde é possível identificar um padrão de comportamento para a indutância em relação a corrente e posição angular.

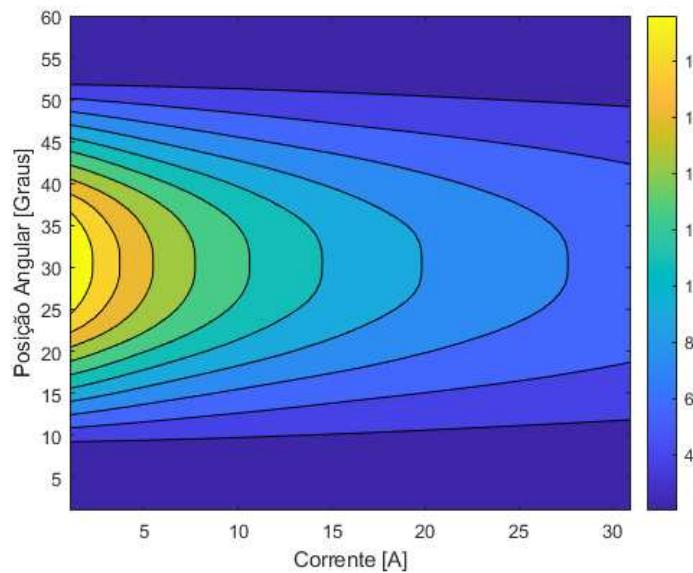
Aproveitando este padrão, será aplicado um processo de normalização desta curva, expressando a mesma curva através de valores proporcionais, semelhante às técnicas utilizadas em sistemas elétricos de potência representando as grandezas em valores por unidade (p.u.).

Figura 35 – Superfície de Indutância de uma Máquina a Relutância Variável 8/6 obtida por Elementos Finitos



Fonte: Autor

Figura 36 – Curvas de nível obtida a partir da superfície de Indutância



Fonte: Autor

A vantagem em expressar as superfícies de indutância em valores percentuais é isolar a influência da corrente ou posição angular em curvas/vetores individuais e adimensionais que, posteriormente, poderão ser utilizadas para recompor a superfície original.

Porém, diferente das técnicas aplicadas em sistemas elétricos de potência, não será utilizado apenas um valor de base, mas sim uma coleção de valores de base, formando um vetores de base. Vetores estes que serão modelados em polinômios e utilizados para reconstruir a superfície original.

4.1.1 Normalização da superfície de Indutância.

Utilizando como referência a superfície de indutância apresentada na figura 35 e equação 58, o primeiro vetor de base é formado pelos valores máximos de indutância na superfície para cada valor de corrente, conforme ilustrado na Figura 37 (a).

$$L_p(i_k) = L(i_k, \theta_{alinhamento}) \quad (58)$$

Onde o L_p representa a influência da corrente para a superfície original nesta primeira fase da modelagem, sendo denominado "principal", pois foi obtido da superfície original.

Utilizando a superfície de indutância de referência, $L(i, \theta)$ e $L_p(i)$, é possível aplicar a equação 59, normalizando a superfície original em uma nova superfície, onde é possível extrair um vetor representando a influência da posição angular na formação da indutância, conforme ilustrado pela Figura 37 (b). Faz-se aqui algumas aproximações e suposições, supondo que $L_p(i)$ represente a influência da corrente e $l_p(\theta)$ represente a influência da posição angular para a composição da indutância, os erros provocados por esta aproximação serão tratados nas fases seguintes do método proposto, se necessário.

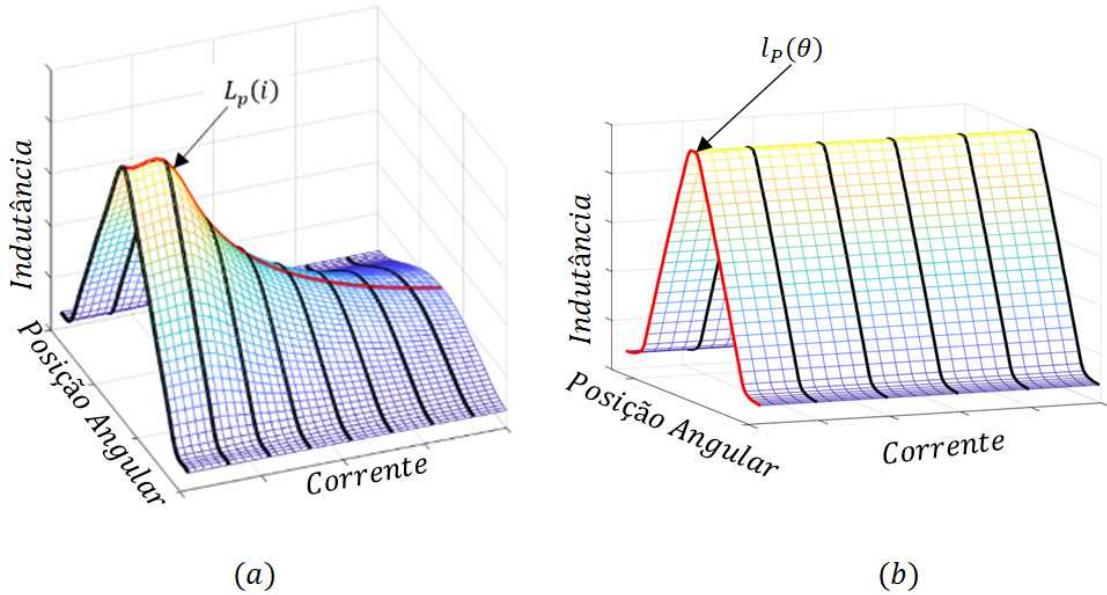
$$l(i_k, \theta) = \frac{L(i_k, \theta)}{L_p(i_k)}, k = 1, 2, \dots, i_{max} \quad (59)$$

Ao se representar a indutância desta forma, é possível recuperar a superfície original através do produto vetorial dos dois vetores obtidos, $L_p(i)$ e $l_p(\theta)$ somados de um erro provocado pelas deduções e simplificações feitas na obtenção dos vetores.

$$L(i, \theta) = [L_p(i)]^T \times [l_p(\theta)] + L_r(i, \theta) \quad (60)$$

Onde $L_r(i, \theta)$ representa a diferença entre a superfície de referência e a superfície gerada a partir dos vetores $L_p(i)$ e $l_p(\theta)$.

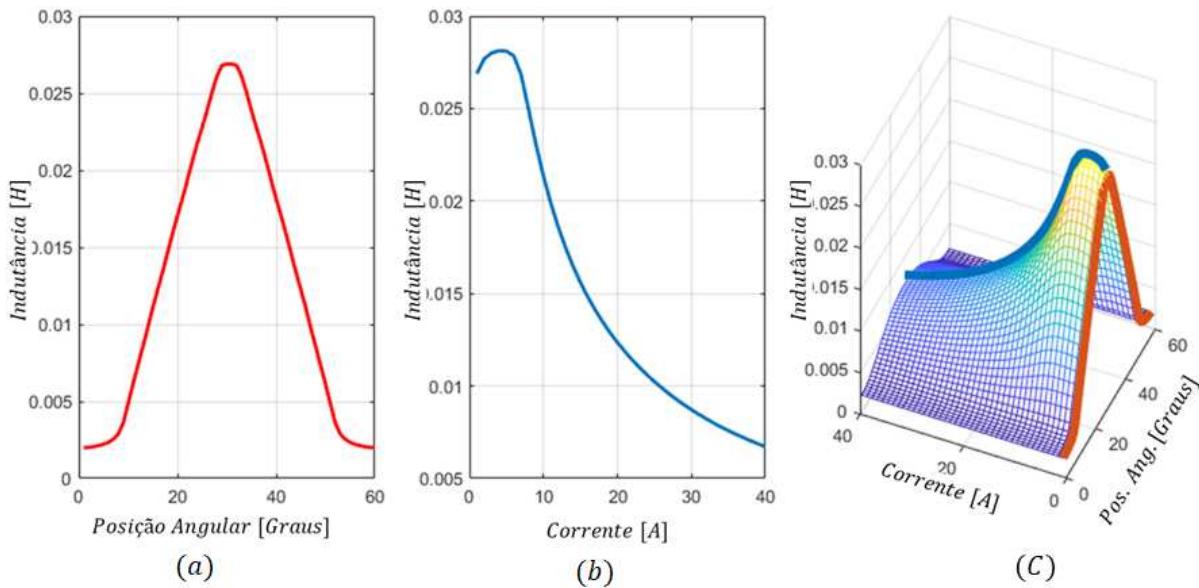
Figura 37 – (a) Superfície obtida por F.E.M e $L_p(i)$; (b) Superfície normalizada e $l_p(\theta)$



Fonte: Autor

A figura 38 exibe as curvas/vetores obtidos, em (a) $L_p(i)$, em (b) $l_p(\theta)$ e em (c) o produto vetorial dos vetores em (a) e (b), em comparação com a superfície de referência a precisão foi de aproximadamente 97%, considerando o erro médio quadrático, precisão aceitável para uma boa gama de aplicações.

Figura 38 – (a) $L_p(i)$; (b) $l_p(\theta)$; (c) $[L_p(i)]^T \times [l_p(\theta)]$



Fonte: Autor

Dependendo do tipo e aspectos de projeto da MRV os valores de L_r podem ser desprezados, simplificando a expressão final. Neste trabalho estes valores serão considerados na modelagem visando a obtenção do maior nível de precisão possível.

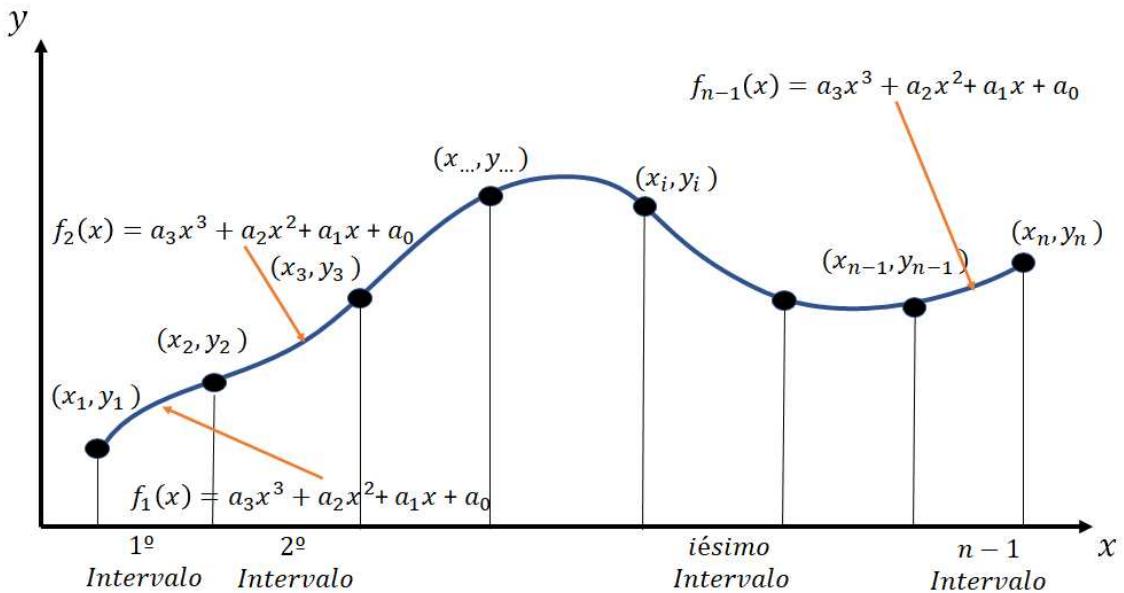
4.2 Modelagem Polinomial Utilizando Splines Cúbicas

A modelagem foi desenvolvida utilizando Splines cúbicas a partir de polinômios na forma de Lagrange, pois apresentam derivada contínua em todos os pontos. Característica que nem sempre são obtidas em splines lineares ou quadráticas e polinômios de Newton (GILAT, 2008).

Considerando que para a determinação do conjugado de cada fase é necessário conhecer a derivada instantânea da indutância, esta característica se torna essencial para o modelo a ser desenvolvido.

Em Splines Cúbicas, a interpolação é feita com polinômios de terceira ordem, a partir da segunda derivada. A figura 39 exibe de forma geral o método de interpolação, onde cada seguimento é representado por um polinômio de terceira ordem.

Figura 39 – Forma geral do método de interpolação



Fonte: Adaptado de (GILAT, 2008)

A determinação de splines cúbicas inicia-se a partir da derivada segunda do polinômio até obter os quatro coeficientes que compõem o polinômio. A derivada segunda de um polinômio de terceira ordem é uma função linear, significando que dentro de cada spline,

a derivada segunda é uma função linear de uma variável x , podendo ser representado na forma de Lagrange (GILAT, 2008) conforme equação 61.

$$f_i''(x) = \frac{x - x_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} f_i''(x) + \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i} f_i''(x_{i+1}) \quad (61)$$

4.2.1 Modelagem da superfície de indutância

A modelagem matemática, através de splines cúbicas é aplicada nas curvas/vetores obtidas, $L_p(i)$ e $l_p(\theta)$. A escolha do método é justificada por não depender de um distanciamento igual entre os pontos de entrada, apresentar imunidade aos fenômeno de Runge e representa com elevada precisão as funções e derivadas dentro de todo o domínio.

Para a obtenção das funções, um polinômio é definido para cada intervalo $[x_{k-1}, x_k]$, onde o resultado final será um polinômio de terceira ordem para cada intervalo, conforme apresentado na equação 62.

$$l(x) = \begin{cases} l_1(x), & x_0 \leq x \leq x_1 \\ l_2(x), & x_1 \leq x \leq x_2 \\ \dots \\ l_{n-1}(x), & x_{n-2} \leq x \leq x_{n-1} \\ l_n(x), & x_{n-1} \leq x \leq x_n \end{cases} \quad (62)$$

Para cada polinômio $l(x)$ será necessário determinar quatro coeficientes a_2 , a_1 , a_0 e $a_3 \neq 0$. Como demonstrado nas equações 63, 64 e 65, onde $l(x)$ representa a indutância para um parâmetro de entrada genérico x .

$$\frac{d^2l}{dx^2} = l''(x) = 6.a_3.x + 2.a_2 \quad (63)$$

$$\frac{dl}{dx} = l'(x) = 3.a_3.x^2 + 2.a_2.x + a_1 \quad (64)$$

$$l(x) = a_3.x^3 + a_2.x^2 + a_1.x + a_0 \quad (65)$$

Considerando a segunda derivada ser uma função linear, a modelagem inicia-se conforme apresentado na equação 66.

$$l''(x) = \sum_{k=1}^n \text{Lagrange}_k(x).y_k \quad (66)$$

$$\text{Lagrange}_k(x) = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{(x - x_j)}{(x_k - x_j)} \quad (67)$$

$$l''(x) = \frac{x - x_{k+1}}{x_k - x_{k+1}} \cdot l''(x_k) + \frac{x - x_k}{x_{k+1} - x_k} \cdot l''(x_{k+1}) \quad (68)$$

O polinômio de terceira ordem no intervalo k pode ser determinando integrando a equação 68 duas vezes. O resultado terá duas constantes de integração que podem ser determinada através das condições de contorno apresentadas nas equações 69, 70 e 71.

Os valores da segunda derivada nos pontos iniciais e finais de cada intervalo, para os $n - 2$ pontos internos podem ser deduzidos a partir da continuidade da primeira derivada nos seguimentos adjacentes.

$$\begin{aligned} l'_k(x_{k+1}) &= l'_{k+1}(x_k) \\ k &= 1, 2, 3, \dots, n - 3, n - 2 \end{aligned} \quad (69)$$

Os valores da função é conhecido no inicio e fim de cada seguimento.

$$l(x) = y_k \quad (70)$$

$$l(x_{k+1}) = y_{k+1} \quad (71)$$

Finalizado o processo de integração e determinadas as constantes de integração e feito um processo de manipulação algébrica, como mostrado na equação 74 para $x_k \leq x \leq x_{k+1}$ em $k = 1, 2, 3, \dots, n - 1$. Considerando h_k o espaçamento entre os pontos no eixo x e δ_k o valor da segunda derivada em x_k . Conforme demonstrado nas equações 72 e 73.

$$h_k = x_{k+1} - x_k \quad (72)$$

$$\delta_k = l''(x_k) \quad (73)$$

$$l_i(x) = \frac{\delta_k}{6 \cdot h_k} (x_{k+1} - x)^3 + \frac{\delta_{k+1}}{6 \cdot h_k} (x - x_k)^3 + \left(\frac{y_k}{h_k} - \frac{\delta_k \cdot h_k}{6} \right) (x_{k+1} - x) + \left(\frac{y_{k+1}}{h_k} - \frac{\delta_{k+1} \cdot h_k}{6} \right) (x - x_k) \quad (74)$$

Para cada intervalo, a equação 74 possui duas incógnitas, $l''(x_k)$ e $l''(x_{k+1})$. Esses são os valores da derivada segunda nos pontos finais do intervalo. As equações que relacionam os valores das derivadas segundas nos $n - 2$ pontos internos podem ser deduzidas a partir da continuidade das derivadas primeiras dos polinômios de intervalos adjacentes nos pontos internos:

$$l'_k(x_{k+1}) = l'_{k+1}(x_{k+1}); \text{ para } 1, 2, 3, \dots, n - 2 \quad (75)$$

Escrevendo a equação 74 em termos de $l_k(x)$ e $l_{k+1}(x)$, calculando as derivadas dessas expressões e substituindo na equação 69 resulta na equação 76

$$h_k \cdot \delta_k + 2(h_k + h_{k+1}) \cdot \delta_{k+1} + h_{k+1} \cdot \delta_{k+2} = 6 \left(\frac{y_{k+2} - y_{k+1}}{h_{k+1}} - \frac{y_{k+1} - y_k}{h_k} \right) \quad (76)$$

A partir de 76 um sistema de $n - 2$ equações precisa ser resolvido para os termos de l''_{x_k} . O sistema é apresentado na equação 77.

$$\begin{bmatrix} h_1 & \rho_1 & h_2 \\ h_2 & \rho_2 & h_3 \\ \ddots & \ddots & \ddots \\ h_{n-3} & \rho_{n-3} & h_{n-2} \\ h_{n-2} & \rho_{n-2} & h_{n-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_{n-3} \\ \delta_{n-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_{n-3} \\ \sigma_{n-2} \end{bmatrix} \quad (77)$$

Onde ρ_k e σ_k estão apresentados nas equações 78 e 79.

$$\rho_k = 2 \cdot (h_k + h_{k+1}) \quad (78)$$

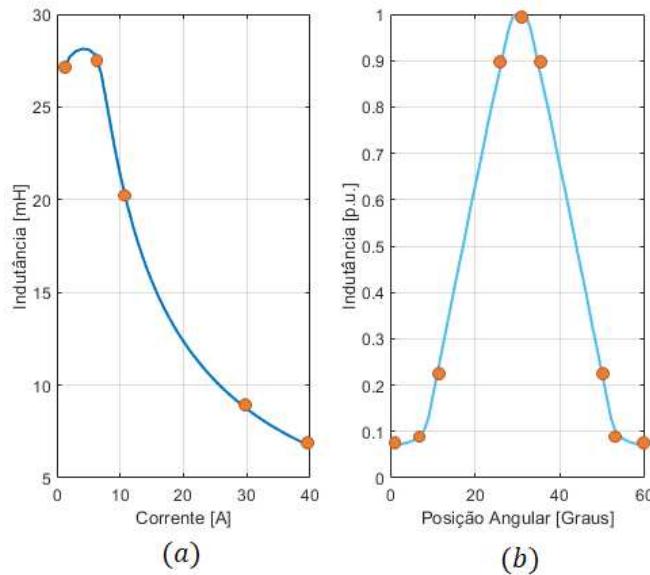
$$\sigma_k = 6 \left(\frac{y_{k+2} - y_{k+1}}{h_{k+1}} - \frac{y_{k+1} - y_k}{h_k} \right) \quad (79)$$

Ao final da resolução da matriz, obtém-se o conjunto de coeficientes que formam os polinômios.

4.2.2 Determinação dos coeficientes

Para determinar os coeficientes das funções $L_p(i)$, $l_p(\theta)$ e $L(i, \theta)$, nove pontos foram usados para a posição angular e cinco pontos utilizados para a corrente, escolhidos arbitrariamente, de forma a acomodar da melhor forma as variações das curvas, conforme apresentado na figura Figura 40.

Figura 40 – Pontos de Entrada para obtenção dos coeficientes; (a)Curva $L_p(i)$; (b) Curva $l_p(\theta)$.



Fonte: Autor

Os pontos coletados nas curvas foram utilizados como parâmetros de entrada para a equação 77, obtendo os coeficientes apresentados na Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 4 – Coeficientes obtidos para $l_p(\theta)$.

Intervalo	a_3	a_2	a_1	a_0
$0 < \theta \leq \frac{\pi}{36}$	52.1812	-2.7322	-0.0896	0.0764
$\frac{\pi}{36} < \theta \leq \frac{\pi}{12}$	-21.1821	16.4743	-1.7657	0.1252
$\frac{\pi}{12} < \theta \leq \frac{5\pi}{36}$	0.5026	-0.5569	2.6930	0.2639
$\frac{5\pi}{36} < \theta \leq \frac{\pi}{6}$	-98.2278	128.6810	-53.6976	7.9378

Para $(\frac{\pi}{6} < \theta \leq \frac{\pi}{3})$ considerar $\theta - \frac{\pi}{6}$

Fonte: Autor

Tabela 5 – Coeficientes obtidos para $L_p(i)$.

Intervalo	b_3	b_2	b_1	b_0
$1 < i \leq 5$	-2.463e-5	7.391e-5	6.230e-4	0.0262
$5 < i \leq 10$	2.462e-5	6.650e-4	0.0043	0.0201
$10 < i \leq 30$	1.279e-6	1.121e-4	-0.0035	0.0460
$30 < i \leq 40$	9.988e-8	-1.198e-5	2.692e-4	0.0087

Fonte: Autor

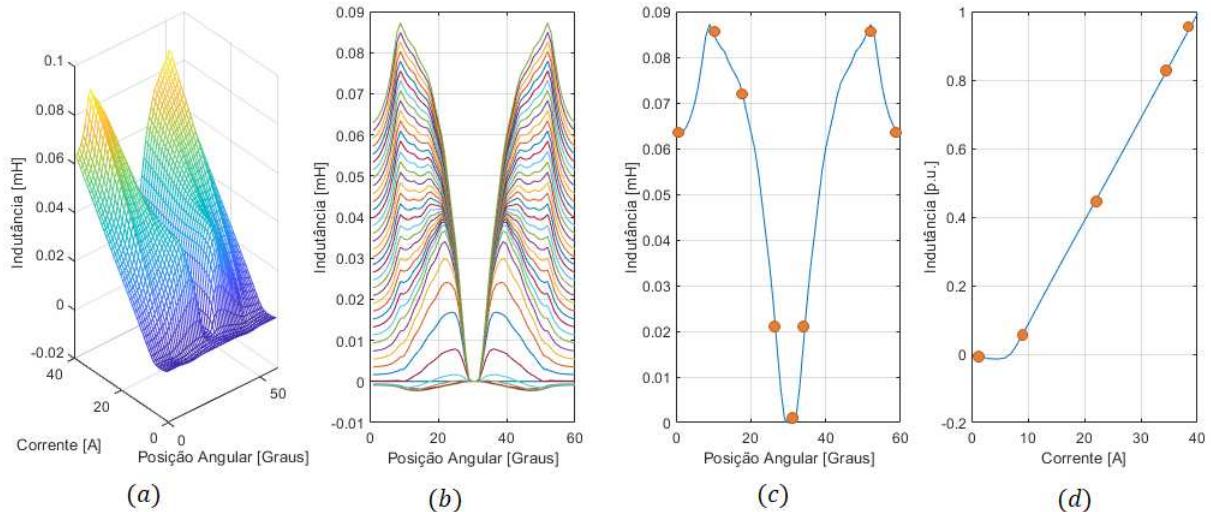
4.2.2.1 Calibração da precisão

A Figura 41 exibe o erro representado por $L_r(i, \theta)$, sendo um valor pouco significativo, representando na pior situação aproximadamente 0,09mH, um erro aceitável dependendo do sistema de acionamento e aplicação.

Para melhorar o nível de precisão, o mesmo processo de normalização aplicado em $L(i, \theta)$ foi feito na curva $L_r(i, \theta)$, representada na Figura 41 (a), obtendo-se assim dois novos vetores/curvas, $L_r(\theta)$ e $l_r(i)$, representados na Figura 41 (c) e (d) respectivamente.

A partir destas curvas foram escolhidos pontos arbitrários, obtendo assim os coeficientes para as curvas $L_r(\theta)$ e $l_r(i)$. Os coeficientes estão apresentados nas tabelas 6 e 7 respectivamente.

Figura 41 – (a) $L_r(i, \theta)$; (b) $L_r(i, \theta)$; (c) $L_r(\theta)$.(d) $l_r(i)$



Fonte: Autor

Tabela 6 – Coeficientes obtidos para $L_r(\theta)$.

Intervalo	c_3	c_2	c_1	c_0
$0 < \theta \leq \frac{\pi}{36}$	0.5282	0.8325	-0.6238	11.9137
$\frac{\pi}{36} < \theta \leq \frac{\pi}{12}$	0.5340	0.6325	1.6679	3.1601
$\frac{\pi}{12} < \theta \leq \frac{5\pi}{36}$	2.7195	-24.4119	97.3302	-118.6409
$\frac{5\pi}{36} < \theta \leq \frac{\pi}{6}$	-67.0069	454.9916	-1.0014e3	720.713

Para $(\frac{\pi}{6} < \theta \leq \frac{\pi}{3})$ considerar $\theta - \frac{\pi}{6}$

Fonte: Autor

Este processo de normalização pode ser feito de forma recursiva, utilizando o erro do ciclo anterior, $L_r(i, \theta)$, para iniciar o próximo ciclo. Para este trabalho considerou-

Tabela 7 – Coeficientes obtidos para $l_r(i)$.

Intervalo	d_3	d_2	d_1	d_0
$1 < i \leq 5$	2.8593e-5	-1.1778e-4	-1.9157e-5	6.3855e-6
$5 < i \leq 10$	0.0017	-0.0011	1.8564e-4	-7.2675e-6
$10 < i \leq 30$	-0.0068	0.0012	-5.3471e-5	7.0284e-7
$30 < i \leq 40$	0.0215	-0.0015	3.9140e-5	3.2617e-7

Fonte: Autor

se aceitável o erro apurado após a obtenção das curvas L_r que foi inferior a 1% em comparação com a superfície utilizada como referência.

4.2.3 Determinação da Indutância

Desta forma a superfície de indutância será representada conforme apresentado na equação 84, sendo formada pela composição das quatro curvas construídas a partir dos coeficientes obtidos.

$$l_p(\theta) = a_3\theta^3 + a_2\theta^2 + a_1\theta + a_0 \quad (80)$$

$$L_p(i) = b_3i^3 + b_2i^2 + b_1i + b_0 \quad (81)$$

$$l_r(\theta) = c_3\theta^3 + c_2\theta^2 + c_1\theta + c_0 \quad (82)$$

$$L_r(i) = d_3i^3 + d_2i^2 + d_1i + d_0 \quad (83)$$

$$L(i, \theta) = L_p(i).l_p(\theta) + L_r(\theta).l_r(i) \quad (84)$$

4.2.4 Determinação do fluxo magnético

O fluxo magnético pode ser determinado pela equação 85 (BILGIN; JIANG; EMADI, 2019).

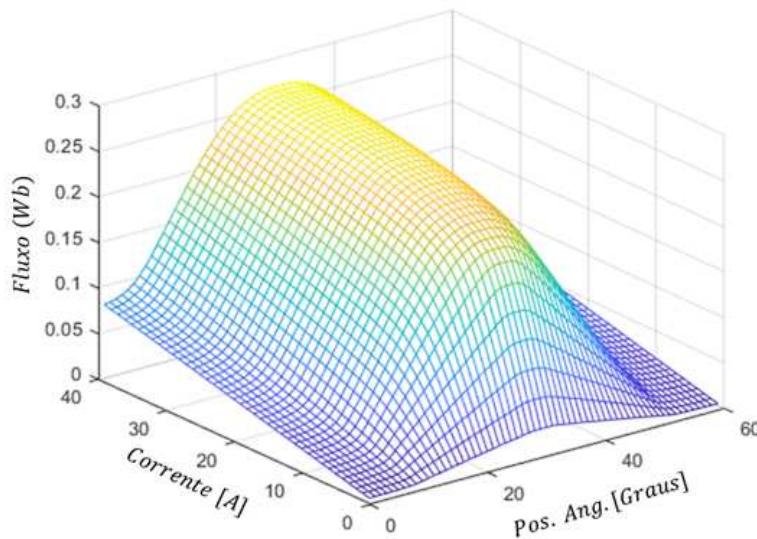
$$\varphi = i.L \quad (85)$$

Desta forma é possível estimar o valor do fluxo instantâneo na MRV através da equação 86.

$$\varphi(i, \theta) = i.L(i, \theta) \quad (86)$$

A figura 42 exibe a superfície de fluxo magnético da MRV construído a partir da equação 86.

Figura 42 – Fluxo Magnético Obtido



Fonte: Autor

4.2.5 Determinação do conjugado eletromagnético

A potência da MRV pode ser determinado a partir da equação 87 (BILGIN; JIANG; EMADI, 2019), sendo necessário para tal determinar a derivada parcial da indutância instantânea em relação à posição angular.

$$iV = i^2R + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2}L(\theta)i^2 \right) + \frac{1}{2}i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (87)$$

A equação 87 é muito similar à equação da potência em motores CC, sendo possível identificar a potência de entrada do sistema, ao lado esquerda da igualdade na equação. No lado direito da equação existem três parcelas, a potência elétrica dissipada na forma de calor (perdas no cobre), Potência armazenada na forma de campo magnético nos enrolamentos da máquina, a ultima parcela representa a potência transferida através do gap, que é convertida em potência mecânica.

É possível determinar a potência mecânica através da equação 88 e o conjugado através da equação 89.

$$P_{mec} = \frac{1}{2}i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega = \tau_e \omega \quad (88)$$

$$\tau_e = \frac{1}{2}i^2 \frac{\partial L(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (89)$$

Onde τ_e representa o conjugado eletromagnético em Nm , ω a velocidade angular da máquina em rad/s .

Quanto for possível medir a potência de entrada do sistema, a partir da equação 88 se torna possível estimar também o rendimento da máquina, conforme demonstrado na equação 91.

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{Entrada}} \quad (90)$$

$$\eta = \frac{\frac{1}{2}i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega}{iV} = \frac{\tau_e \omega}{iV} \quad (91)$$

4.2.6 Conclusão

Este capítulo apresentou o desenvolvimento de uma metodologia que permite, a partir de uma superfície de indutância de referência, modelar polinômios que aferem com precisão a superfície original através de duas variáveis de entrada, corrente e posição angular. Utilizando estes polinômios é possível estimar outras grandezas elétricas inerentes ao funcionamento da MRV como conjugado eletromagnético, fluxo eletromagnético, potência e rendimento. O método proposto pode ser utilizado em acionamentos experimentais e através de ferramentas computacionais em simulações, possibilitando a implementação de um sistema robusto de instrumentação virtual.

CAPÍTULO 5

Simulação Computacional

Este capítulo descreve a ferramenta computacional desenvolvida para a simulação da Máquina de Relutância Variável 8x6. Serão apresentados os elementos constituintes dessa ferramenta, bem como as etapas e fases do processo de simulação. O principal objetivo desta etapa é validar o estimador de indutância e conjugado modelado, especificar os componentes envolvidos e obter um conhecimento aprofundado das condições de funcionamento necessárias para o acionamento experimental.

A simulação computacional desempenha um papel essencial no estudo e no projeto de sistemas eletromagnéticos complexos, como a MRV. Ao utilizar técnicas avançadas de simulação, é possível obter informações valiosas sobre o comportamento dinâmico da máquina, avaliar a precisão do estimador de indutância e conjugado, e fornecer insights cruciais para a etapa subsequente de acionamento experimental.

A construção dessa ferramenta computacional permitiu realizar simulações realistas da MRV 8x6, reproduzindo as características físicas e elétricas da máquina em um ambiente virtual controlado. Isso possibilita a investigação de diferentes cenários de funcionamento, o estudo do desempenho do estimador proposto e a análise detalhada dos resultados obtidos.

Ao final deste capítulo, são apresentados os resultados das simulações, possibilitando uma validação robusta do estimador de indutância e conjugado modelado, além de uma compreensão aprofundada dos requisitos de funcionamento da MRV 8x6. Essas informações serão essenciais para a etapa subsequente de acionamento experimental, contribuindo para o desenvolvimento eficiente e confiável dessa máquina inovadora.

5.1 Ferramenta Computacional para Simulação.

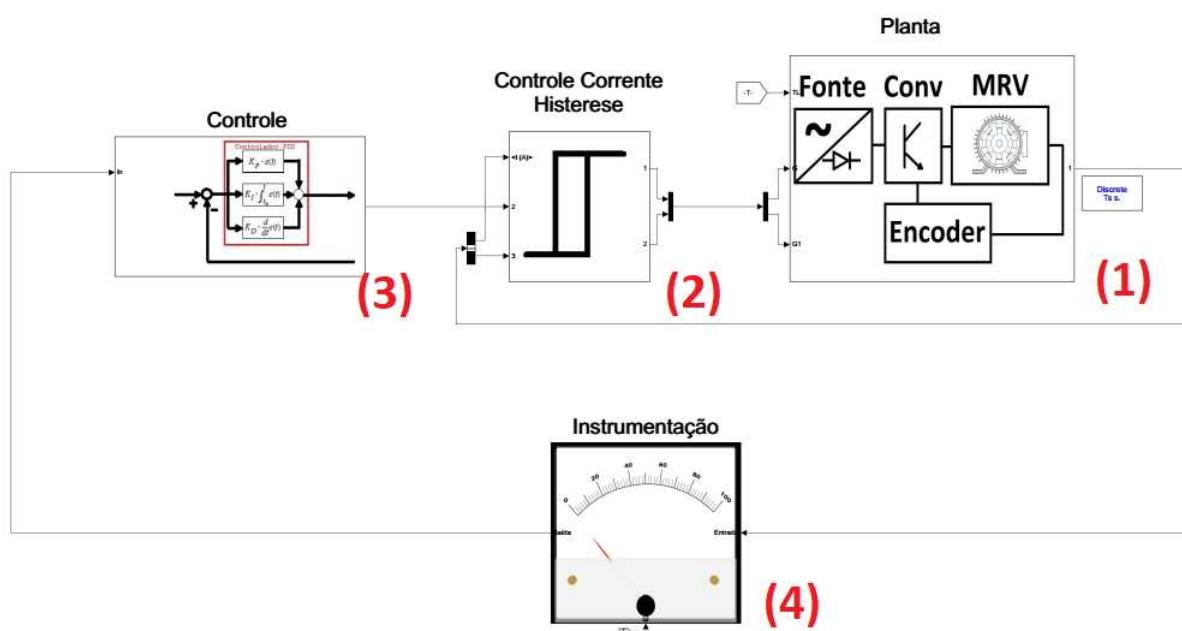
A simulação foi realizada utilizando o Simulink, uma ferramenta do software MATLAB amplamente reconhecida e utilizada para modelagem e simulação de sistemas por meio de diagramação gráfica (LE-HUY; BRUNELLE, 2005).

A Figura 43 apresenta a tela principal da simulação, dividida em quatro partes distintas, conforme descrito a seguir:

- ❑ Em (1), encontra-se o bloco que representa o acionamento da MRV (planta). Este bloco engloba a fonte de alimentação com um retificador trifásico, o conversor de potência utilizando a topologia Half-Bridge, o modelo da MRV propriamente dito e o sensor de posição.
- ❑ Em (2), está o bloco responsável pelo controle de corrente.
- ❑ Em (3), encontra-se o bloco responsável pelo controle do acionamento da máquina, permitindo acionamento em malha aberta ou em malha fechada com realimentação de velocidade, potência e conjugado eletromagnético.
- ❑ Em (4), está o bloco responsável pela instrumentação da simulação, no qual as grandezas são calculadas, estimadas e condicionadas para posterior realimentação da malha de controle. Além disso, essas grandezas são enviadas ao ambiente MATLAB para pós-processamento e análise dos dados obtidos na simulação.

Essas divisões do modelo de simulação permitem uma visão geral clara e organizada, possibilitando o estudo detalhado e a análise dos diferentes aspectos do sistema MRV. A seguir, serão apresentados os resultados e discussões decorrentes dessas simulações.

Figura 43 – Tela principal da simulação



Fonte: Autor

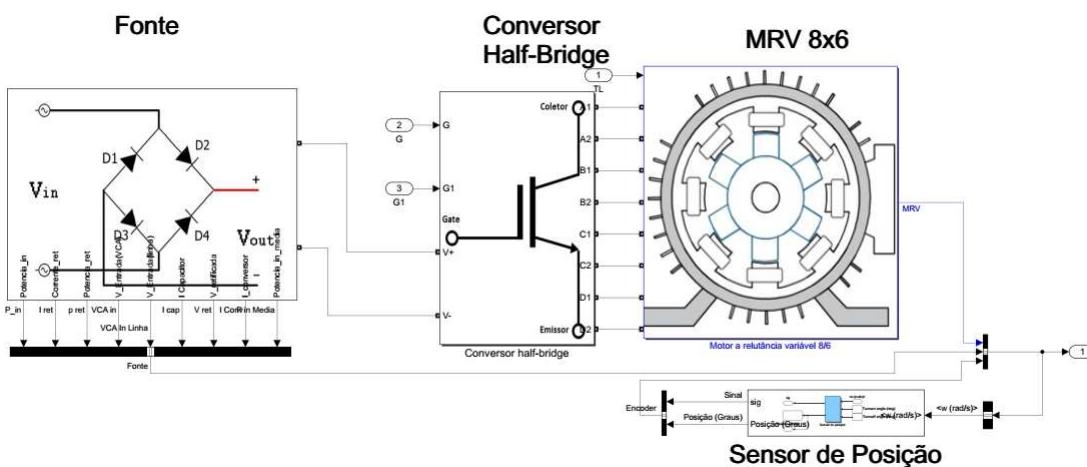
5.1.1 Planta

O bloco identificado como "planta" na Figura 43 desempenha um papel crucial no sistema, sendo responsável pela alimentação, acionamento e detecção da posição do rotor. Para proporcionar uma visão mais clara e organizada, o diagrama interno desse bloco é apresentado na Figura 44, onde cada etapa é representada por um bloco individual. Essa estrutura torna a simulação mais organizada, de fácil compreensão e permite realizar alterações ou correções de forma simplificada quando necessário.

Ao dividir as diferentes etapas do sistema em blocos individuais, é possível examinar cada componente de forma isolada e analisar sua contribuição para o desempenho geral da Máquina de Relutância Variável. Além disso, essa abordagem modular facilita a identificação e resolução de eventuais problemas ou otimizações específicas em cada etapa do processo.

A organização e clareza proporcionadas por essa estrutura de blocos individuais resultam em uma simulação mais eficiente e eficaz, permitindo uma compreensão aprofundada do comportamento da MRV. Essa abordagem também viabiliza futuras melhorias e ajustes no sistema, caso seja necessário aprimorar seu desempenho ou adaptá-lo a novas condições de operação.

Figura 44 – Tela principal da simulação



Fonte: Autor

5.1.2 Fonte

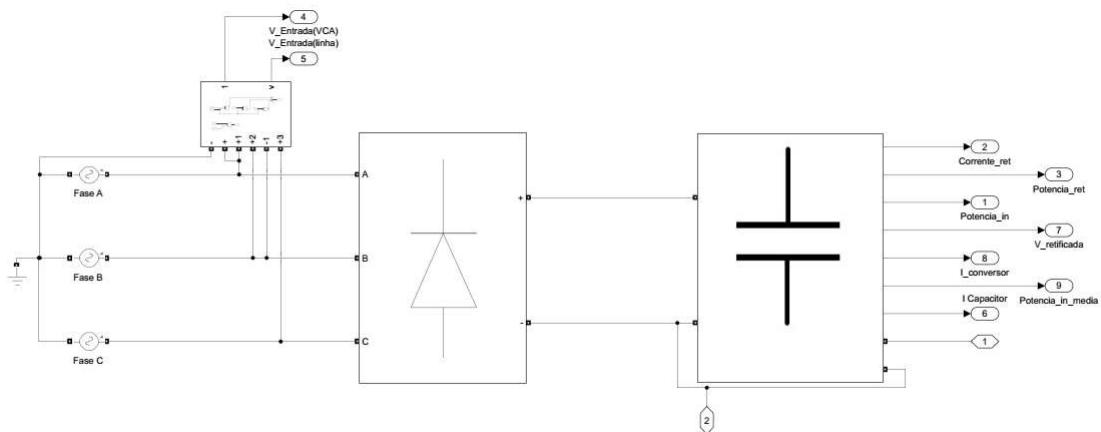
A fonte utilizada na simulação é baseada em um retificador trifásico não controlado. Essa fonte é alimentada por uma tensão alternada trifásica, que passa por um retificador de ponte composto por diodos retificadores. Em seguida, é utilizado um filtro passivo com um capacitor para suavizar a forma de onda da tensão retificada. O diagrama interno do bloco "fonte" é apresentado na Figura 45.

Essa configuração de fonte é comumente empregada em sistemas de acionamento de máquinas elétricas, incluindo a Máquina de Relutância Variável. Ao utilizar um retificador trifásico não controlado, é possível converter a tensão alternada da rede elétrica em uma tensão contínua, adequada para alimentar a MRV.

O filtro passivo, composto pelo capacitor, é responsável por reduzir as variações na tensão de saída do retificador e fornecer uma tensão contínua mais estável para o acionamento da máquina. Ele atua como um elemento de armazenamento de energia, suavizando as flutuações da tensão retificada e garantindo uma alimentação mais consistente para a MRV.

Ao incorporar esse modelo de fonte na simulação, é possível estudar e analisar o comportamento da MRV em diferentes condições de alimentação, incluindo variações na tensão de entrada e possíveis perturbações provenientes da rede elétrica. Essa análise é fundamental para avaliar a resposta da máquina e a eficiência do estimador de indutância e conjugado em diferentes situações operacionais.

Figura 45 – Diagrama de blocos da fonte



Fonte: Autor

5.1.3 Conversor Half-Bridge

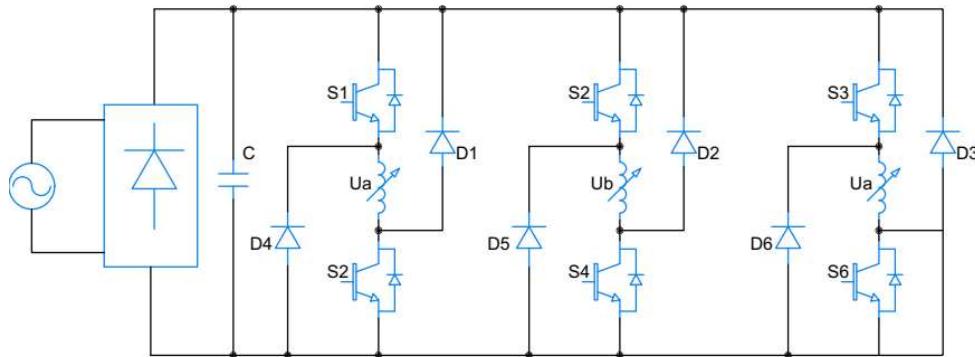
O bloco referente ao conversor de potência na simulação é baseado na topologia do conversor Half-Bridge. Essa topologia de conversor é a mesma utilizada na bancada de acionamentos experimentais, tornando-se um elemento fundamental que impacta diretamente no comportamento da Máquina de Relutância Variável.

O conversor Half-Bridge consiste em duas chaves controladas em série com cada fase da máquina, juntamente com dois diodos que são utilizados para a desmagnetização da bobina de cada fase. Essa configuração permite o controle independente da corrente em cada fase, o que é essencial para o funcionamento adequado da MRV.

O esquema elétrico do conversor Half-Bridge é apresentado na Figura 46. Por meio desse diagrama, é possível visualizar as conexões entre as chaves controladas, os diodos e as fases da MRV. Essa representação é crucial para compreender o funcionamento do conversor e sua interação com a máquina.

Ao incorporar o modelo do conversor Half-Bridge na simulação, é possível estudar e analisar o impacto dessa topologia no comportamento da MRV. Dessa forma, é possível avaliar a eficácia do estimador de indutância e conjugado em condições de operação realistas, considerando a influência direta do conversor de potência.

Figura 46 – Topologia do conversor half-bridge para a MRV 8x6



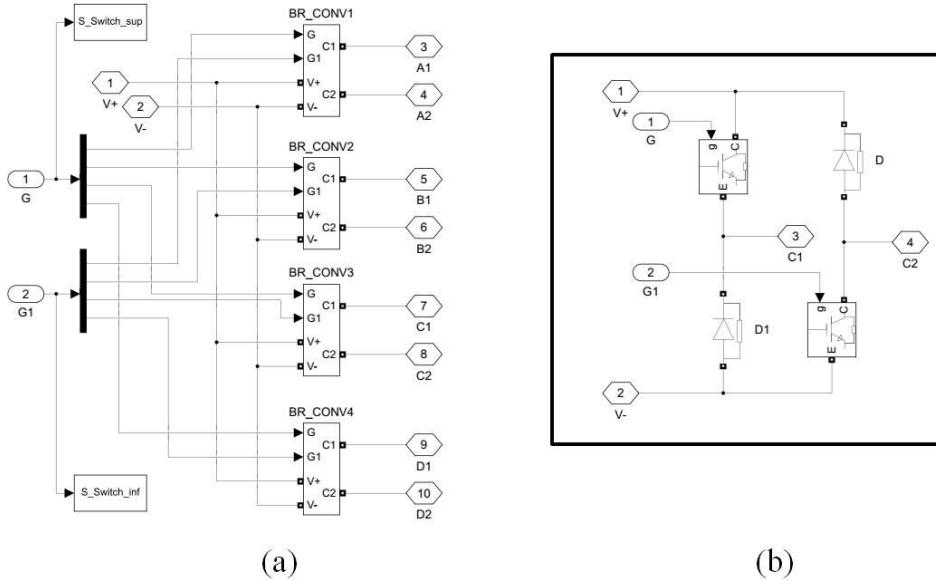
Fonte: Autor

O bloco do conversor de potência recebe dois parâmetros de entrada: a alimentação proveniente do bloco "fonte" e um sinal correspondente ao acionamento das chaves IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) de cada fase da máquina, de acordo com a posição do rotor e os critérios de controle estabelecidos. Essa lógica é aplicada a quatro blocos, um para cada fase da Máquina de Relutância Variável.

A Figura 47(a) apresenta uma visão geral do bloco do conversor de potência, destacando as entradas e saídas principais. Já a Figura 47(b) exibe o diagrama interno do bloco responsável pelo acionamento de uma das fases da MRV.

No diagrama interno do bloco, é possível observar a lógica de acionamento das chaves IGBT, que são controladas com base na posição do rotor e nos critérios de controle estabelecidos. Essa lógica de acionamento garante a correta comutação das chaves, permitindo o controle eficiente da corrente em cada fase da máquina.

Figura 47 – Conversor Half Bridge



Fonte: Autor

5.1.4 MRV 8x6

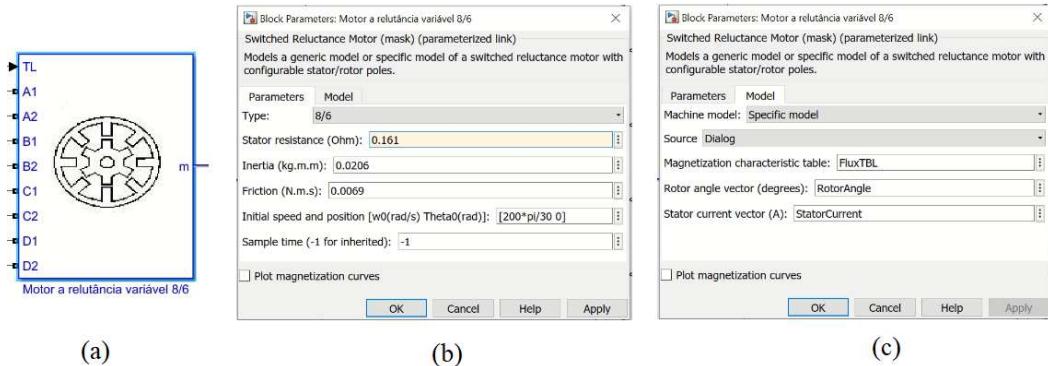
O modelo da Máquina de Relutância Variável no Simulink é representado no diagrama de blocos, como mostrado na Figura 48(a). Esse modelo é capaz de operar tanto como motor quanto como gerador, sendo necessário realizar os ajustes adequados para cada tipo de operação.

O bloco da MRV possui diversas grandezas instantâneas disponíveis como elementos de saída, incluindo o fluxo em cada fase, a corrente em cada fase, a velocidade angular do rotor, o conjugado por fase, o conjugado total, o deslocamento angular do rotor e a tensão nas fases do estator. Essas grandezas são fundamentais para analisar o desempenho da máquina e validar o estimador de indutância e conjugado modelado.

Além disso, o bloco da MRV possui uma guia para a entrada de parâmetros, conforme ilustrado na Figura 48(b). Nessa guia, é possível informar alguns parâmetros elétricos e mecânicos específicos da máquina que está sendo simulada. Esses parâmetros podem variar de acordo com as características da MRV em estudo e devem ser ajustados adequadamente para obter resultados precisos na simulação.

Por fim, é necessário fornecer algumas tabelas específicas, como mostrado na Figura 48(c). Essas tabelas contêm dados importantes, como o fluxo magnético em função da corrente e da posição do rotor. Essas informações são obtidas por meio da análise de elementos finitos, permitindo uma modelagem mais precisa e realista da MRV.

Figura 48 – Diagrama de blocos para acionamento da MRV na simulação



Fonte: Autor

Esses recursos disponíveis no modelo da MRV no Simulink permitem uma simulação mais completa e abrangente, possibilitando a análise do desempenho da máquina em diferentes condições de operação. A utilização das tabelas específicas, baseadas na análise de elementos finitos, contribui para uma representação mais precisa das características magnéticas da MRV.

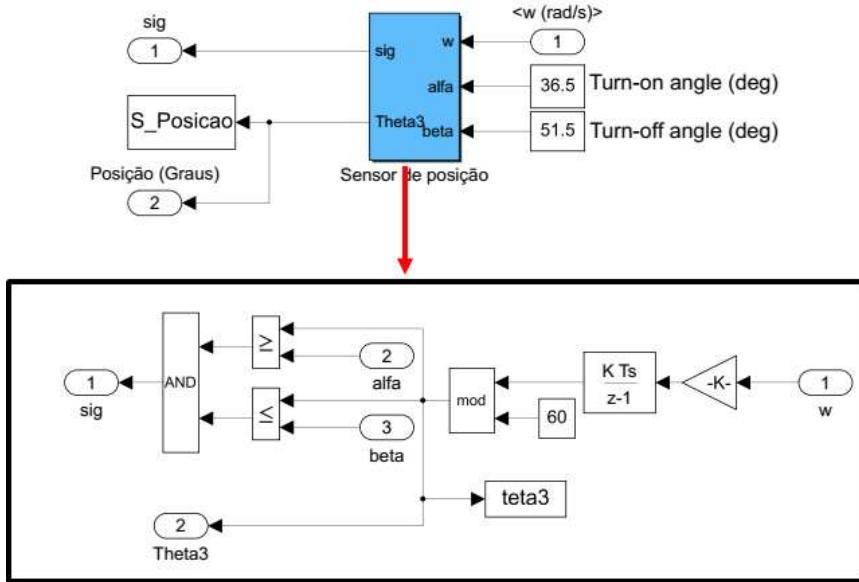
5.1.5 Sensor de Posição

A detecção precisa da posição do rotor é de extrema importância para o acionamento e controle adequados da Máquina de Relutância Variável. No contexto da simulação, a posição do rotor é obtida por meio da integração da velocidade angular. Em seguida, essa variação angular é dividida em intervalos de 60 graus, que correspondem a um ciclo completo de alinhamento e desalinhamento de cada fase da MRV.

Essa divisão angular permite determinar os momentos exatos em que as chaves do conversor de potência devem atuar para magnetizar as bobinas das fases da máquina. Para isso, o valor angular obtido é comparado com os ângulos de início e fim do acionamento de cada fase.

O bloco identificado como "sensor de posição" no diagrama geral da planta (Figura 44) desempenha um papel crucial nesse processo. A Figura 49 apresenta o diagrama interno desse bloco, detalhando sua estrutura e funcionalidade.

Figura 49 – Sensor de posição



Fonte: Autor

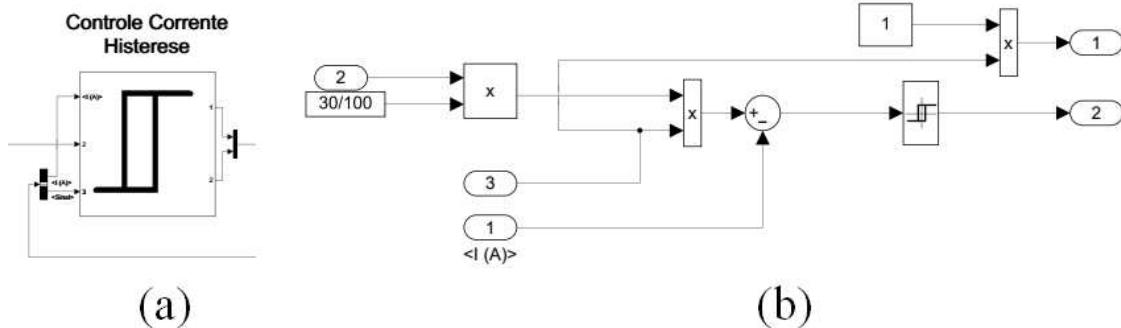
5.1.6 Controle de Corrente

A estratégia adotada para o controle de corrente na simulação da Máquina de Relutância Variável foi a técnica de controle por histerese. Nesse tipo de controle, a corrente é constantemente monitorada e o conversor de potência é acionado de forma a manter a corrente controlada dentro de um limite superior e inferior, conhecido como banda de histerese.

O bloco responsável pelo controle de corrente é ilustrado na Figura 50(a), enquanto o diagrama interno desse bloco é apresentado na Figura 50(b). Esse bloco de controle implementa a lógica de controle por histerese, em que são definidos os limites superior e inferior da corrente desejada. Quando a corrente ultrapassa o limite superior, o conversor de potência é desligado. Já quando a corrente fica abaixo do limite inferior, o conversor de potência é ligado novamente. Essa estratégia permite controlar efetivamente a corrente em um intervalo desejado, evitando oscilações indesejadas.

A técnica de controle por histerese é amplamente utilizada em sistemas de controle de corrente, oferecendo simplicidade de implementação e boa resposta dinâmica. Nesse contexto, ela é aplicada para garantir que a corrente nas fases da MRV seja controlada de forma estável e precisa.

Figura 50 – Controle de corrente

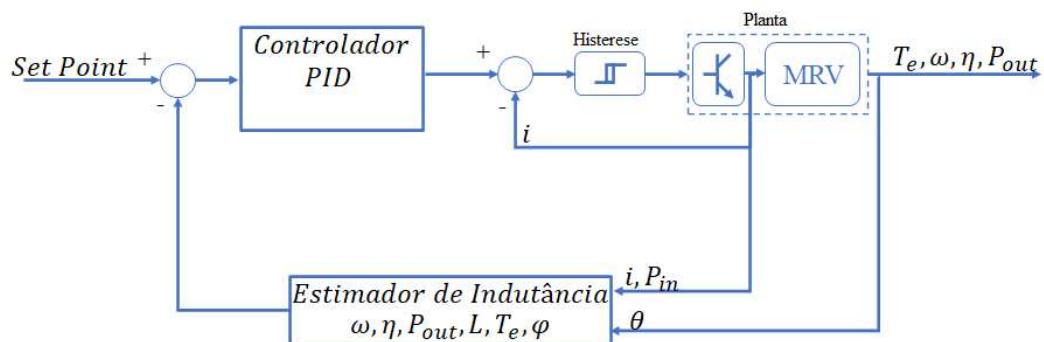


Fonte: Autor

5.1.7 Controle da MRV

O controle de velocidade, potência e conjugado eletromagnético da Máquina de Relutância Variável na simulação foi realizado utilizando um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo). A Figura 51 apresenta um diagrama geral da estrutura de controle implementada.

Figura 51 – Diagrama de blocos do sistema de controle implementado



Fonte: Autor

Nessa estrutura de controle, a malha externa do controlador é realimentada com os valores estimados, fornecidos pelo estimador. Esses valores são utilizados como entrada para o controlador PID, que calcula um sinal de referência para o controle de corrente. Esse sinal de referência é então enviado para a etapa de controle de corrente, que atua diretamente sobre o conversor de potência.

O controlador PID é uma técnica amplamente utilizada no controle de sistemas dinâmicos devido à sua capacidade de ajuste de ganhos proporcionais, integrais e derivativos.

Ele permite controlar de forma eficiente e precisa a velocidade, potência e conjugado eletromagnético da MRV, garantindo um desempenho adequado e estável do sistema.

A utilização do estimador de indutância como realimentação para o controlador PID permite ajustar o controle com base nas características da máquina, proporcionando um controle mais adaptativo e preciso.

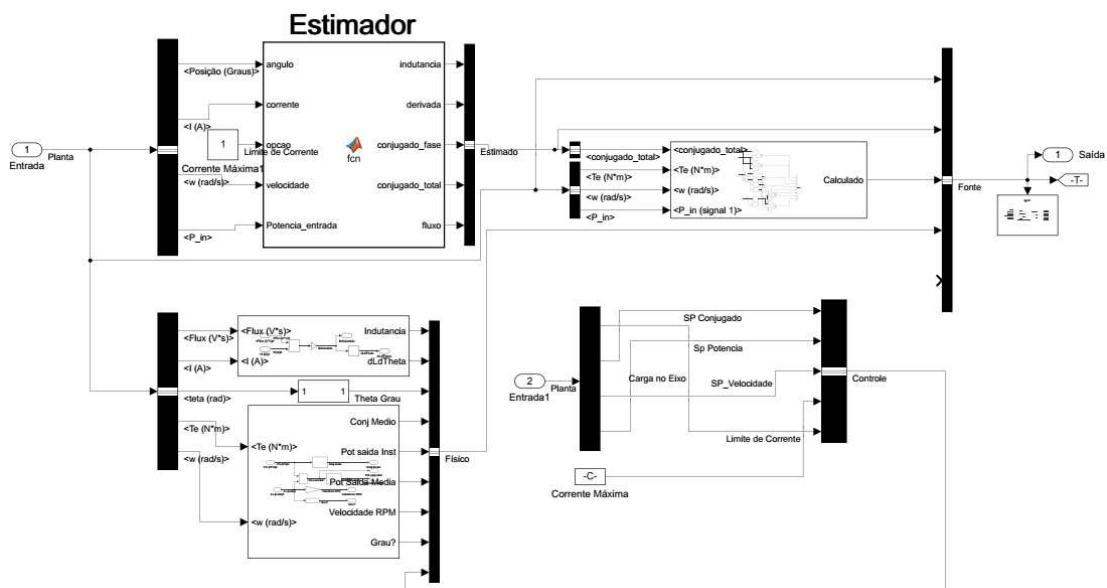
5.1.8 Instrumentação

O bloco denominado "Instrumentação" na Figura 43 desempenha um papel crucial no processamento, análise e cálculo dos valores obtidos no bloco "Planta" e na determinação das grandezas relacionadas ao acionamento da Máquina de Relutância Variável. Dentre as grandezas calculadas estão tensão, corrente, potência de entrada, potência de saída, rendimento, velocidade, indutância, fluxo magnético, entre outras variáveis relevantes.

Além disso, o bloco de instrumentação também abriga o estimador de indutância, que foi construído com base nos polinômios modelados no Capítulo 04 da tese. O estimador de indutância utiliza os resultados obtidos tanto pela simulação como pelo próprio estimador, processando-os de forma independente. Ao final da simulação, os resultados são disponibilizados no ambiente MatLAB, permitindo a comparação e análise dos resultados obtidos.

A Figura 52 apresenta o diagrama de blocos interno ao bloco de instrumentação, revelando a estrutura e a interação dos componentes que realizam o processamento dos dados e o cálculo das grandezas relevantes.

Figura 52 – Diagramas de Blocos para Instrumentação



Fonte: Autor

Essa etapa de instrumentação desempenha um papel fundamental na obtenção e análise das grandezas de interesse no acionamento da MRV. Ao fornecer uma visão geral e detalhada do fluxo de dados e dos cálculos realizados nessa etapa, o diagrama de blocos interno permite compreender a estrutura e o funcionamento do bloco de instrumentação.

5.2 Resultados da Simulação

Nesta seção, serão apresentados os resultados de algumas simulações computacionais realizadas com uma Máquina de Relutância Variável operando como motor. As simulações foram realizadas para uma máquina de potência nominal de 3CV (2,2KW). Durante as simulações, o estimador de conjugado foi implementado e operou em paralelo, de forma independente da simulação. Isso possibilitou a comparação dos resultados obtidos na simulação com os resultados obtidos pelo estimador.

A utilização do estimador de conjugado é de grande importância, uma vez que permite uma análise precisa e comparativa do comportamento da máquina durante o acionamento. Com os resultados obtidos pelo estimador, é possível avaliar a eficiência do estimador em fornecer estimativas precisas do conjugado eletromagnético da MRV.

Ao comparar os resultados da simulação com os resultados obtidos pelo estimador de conjugado, é possível verificar a coerência e a confiabilidade das estimativas realizadas pelo estimador. Essa análise comparativa contribui para a validação do estimador e fornece informações valiosas sobre o desempenho da máquina durante o acionamento.

Por meio da apresentação dos resultados obtidos nessas simulações computacionais, será possível observar o comportamento da MRV como motor e analisar a precisão das estimativas de conjugado fornecidas pelo estimador. Os dados obtidos permitirão uma avaliação abrangente e uma compreensão mais aprofundada do desempenho da MRV.

5.2.1 Velocidade Constante

Neste ensaio, a máquina foi simulada com uma velocidade constante de 1500 rpm, uma tensão no barramento CC de 300V, uma carga constante de 4 Nm e um ângulo de condução de cada fase de 15 graus. Esse ângulo é medido a partir do momento de sobreposição dos polos do estator e do rotor de cada fase, garantindo que nenhuma fase seja acionada enquanto outra fase está em acionamento.

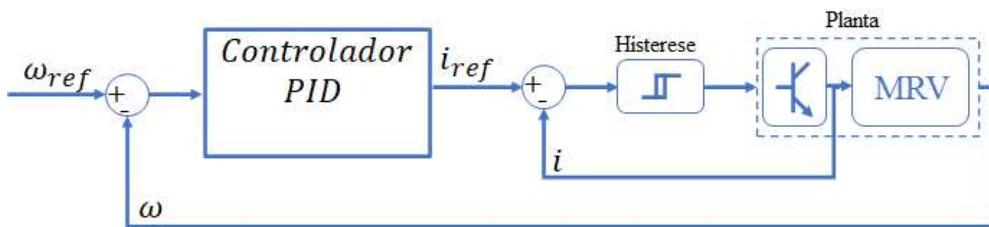
Na simulação, foi implementada uma estratégia de controle para o controle de velocidade da máquina. Essa estratégia utiliza um controlador PID, que é realimentado pela velocidade da máquina. A saída desse controlador é utilizada como referência para o controle de corrente por histerese no conversor de potência. A Figura 53 apresenta um diagrama de blocos simplificado da estratégia de controle implementada.

Essa estratégia de controle permite manter a velocidade da máquina em um valor desejado, mesmo diante de perturbações ou variações na carga. O controlador PID atua

para ajustar o sinal de referência de corrente, garantindo um controle preciso da velocidade da máquina. O controle de corrente por histerese no conversor de potência assegura que a corrente seja mantida dentro de limites pré-definidos, evitando oscilações indesejadas e garantindo uma operação estável da máquina.

O uso dessa estratégia de controle possibilita o ajuste fino da velocidade da máquina e uma resposta dinâmica eficiente, adequando-se às demandas do sistema. Com o diagrama de blocos simplificado da estratégia de controle apresentado na Figura 53, é possível compreender de forma clara e concisa a estrutura do controle implementado.

Figura 53 – Diagrama de blocos simplificado da estratégia de controle implementada



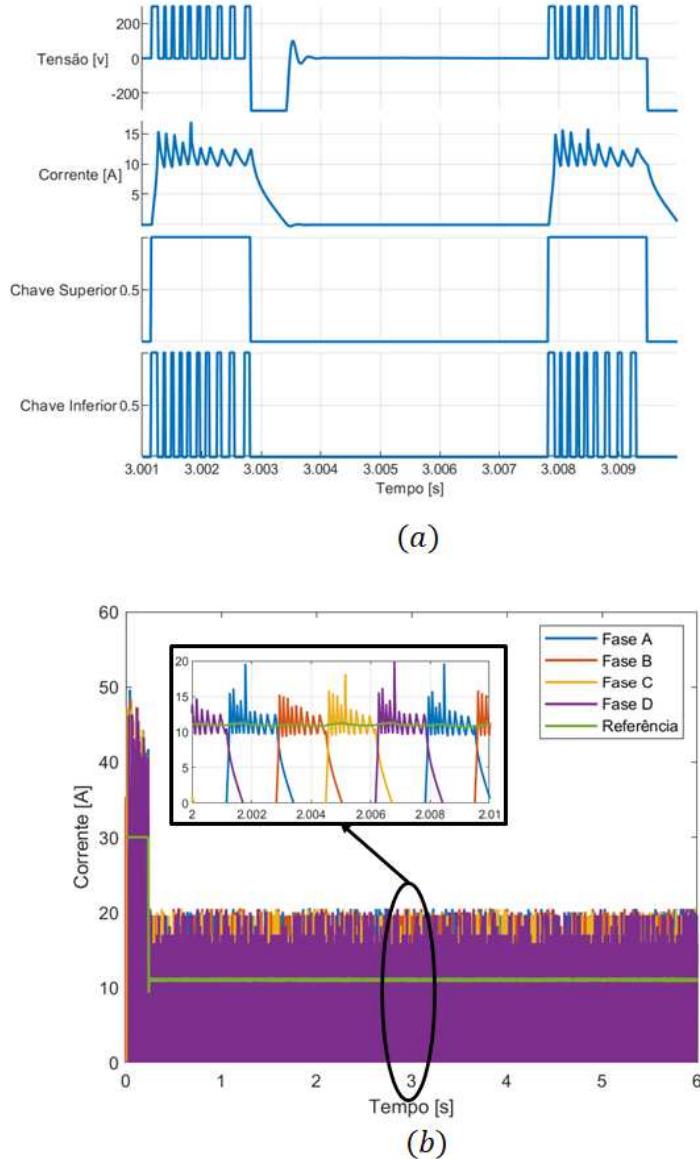
Fonte: Autor

O controlador de histerese atua sobre as chaves IGBTs do conversor de potência, mantendo a chave superior ativada e controlando a chave inferior de acordo com a referência de corrente recebida nos momentos de ativação de cada uma das fases. A figura 54 ilustra a atuação do controlador de corrente sobre as chaves do conversor de potência e, consequentemente, as formas de onda da tensão e corrente.

Na figura 54, em (a), são apresentadas as formas de onda da tensão na fase, corrente na fase, pulso de ativação da chave superior e pulso de ativação da chave inferior do conversor de potência. Essas formas de onda mostram o comportamento dinâmico das variáveis durante o acionamento da máquina. Em (b), são apresentados os resultados obtidos para a corrente, juntamente com a referência de corrente, o sinal de saída do controlador PID e a entrada do controlador de corrente. Esses resultados demonstram a eficácia do controle de corrente por histerese em manter a corrente controlada dentro dos limites desejados.

A análise das formas de onda e dos resultados obtidos permite verificar o desempenho do controlador de corrente na regulação precisa da corrente, garantindo um comportamento adequado da máquina durante o acionamento. Essas informações são essenciais para avaliar a estabilidade e a eficiência do sistema de controle implementado.

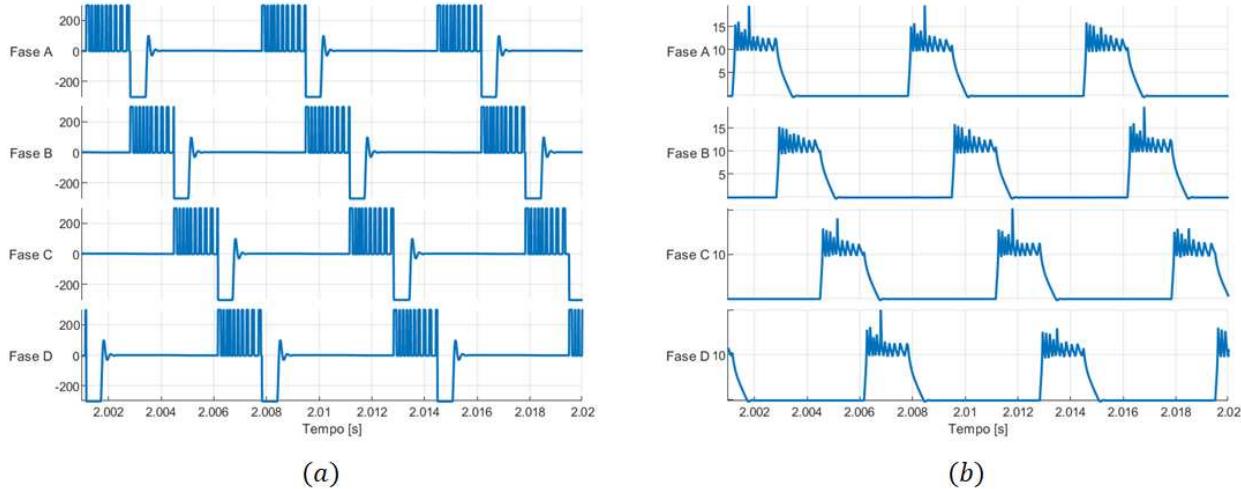
Figura 54 – Representação da atuação do controlador de corrente; (a) sinais de tensão, corrente e pulsos de ativação das chaves IGBT; (b) Corrente nas fases da máquina.



Fonte: Autor

A figura 55 mostra as formas de onda obtidas para a tensão e corrente nas quatro fases da máquina. Em (a), são apresentadas as formas de onda da tensão nas quatro fases da MRV, permitindo observar o comportamento das tensões aplicadas a cada fase durante o acionamento da máquina. Em (b), são apresentadas as formas de onda da corrente nas quatro fases da MRV, evidenciando o perfil de corrente em cada fase ao longo do tempo.

Figura 55 – Formas de onda para a tensão e corrente nas fases da MRV; (a) Tensão; (b) Corrente.



Fonte: Autor

A figura 56 ilustra as grandezas estimadas obtidas a partir do estimador implementado. Em (a), são apresentadas as indutâncias calculadas para as quatro fases da MRV utilizando o estimador. Essas indutâncias estimadas são fundamentais para o cálculo do conjugado eletromagnético da máquina.

Em (b), é mostrado o resultado do cálculo da derivada da indutância estimada. Essa etapa é de extrema importância, pois a partir dessa derivada é possível determinar o conjugado eletromagnético da máquina, que é uma grandeza essencial para o estudo e análise do comportamento da MRV.

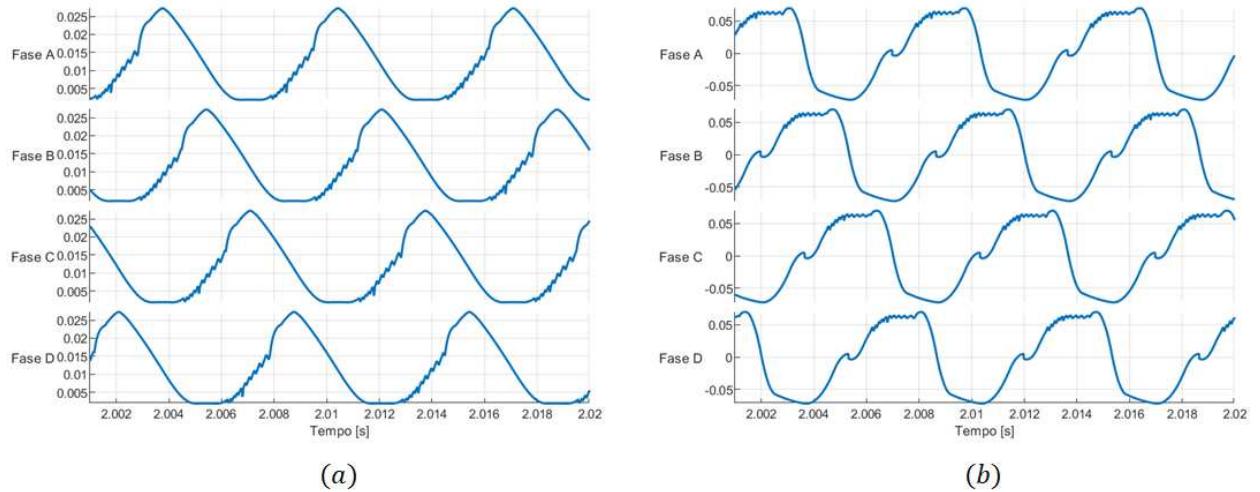
A figura 57 apresenta uma comparação entre as grandezas estimadas e simuladas para a indutância e o fluxo magnético da MRV.

Em (a), são exibidos os resultados comparativos da indutância estimada e simulada. Observa-se que as curvas são bastante similares, demonstrando a precisão do estimador desenvolvido. Isso indica que o estimador foi capaz de obter estimativas confiáveis para a indutância da máquina.

Em (b), são apresentados os resultados comparativos do fluxo magnético estimado e simulado. Mais uma vez, é possível notar uma alta similaridade entre as curvas, evidenciando a capacidade do estimador em fornecer estimativas precisas para o fluxo magnético da MRV.

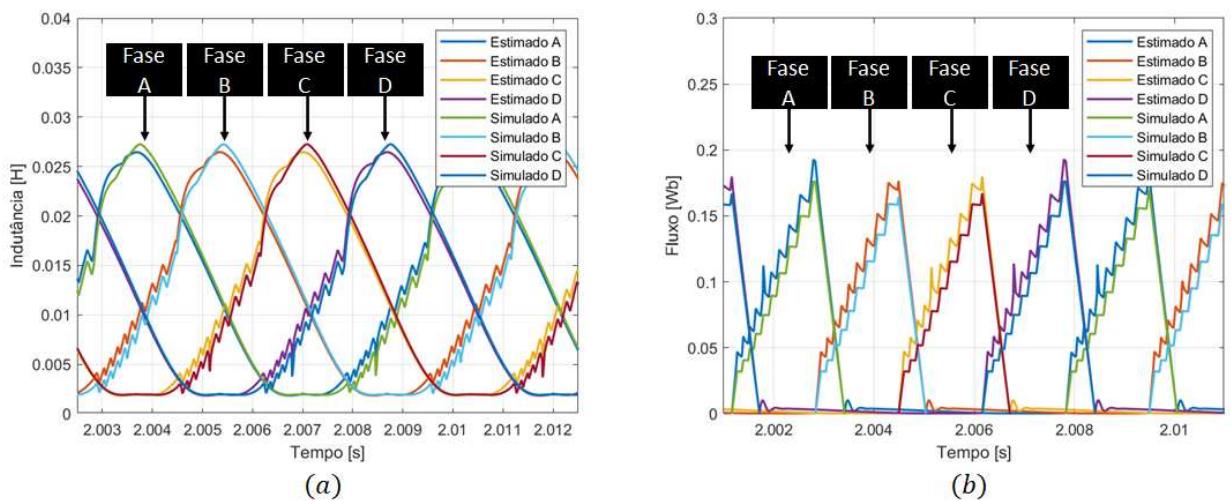
Esses resultados demonstram a eficácia do estimador implementado na simulação, fornecendo estimativas confiáveis para grandezas importantes da máquina, como indutância e fluxo magnético. Essa precisão é fundamental para o estudo e controle adequado do sistema.

Figura 56 – Indutância calculada a partir do estimador; (a) Indutância para as quatro fases da MRV; (b) Derivada da indutância para as quatro fases.



Fonte: Autor

Figura 57 – Comparação entre a indutância e fluxo estimado e simulado; (a) Indutância para as quatro fases da MRV; (b) Fluxo para as quatro fases.



Fonte: Autor

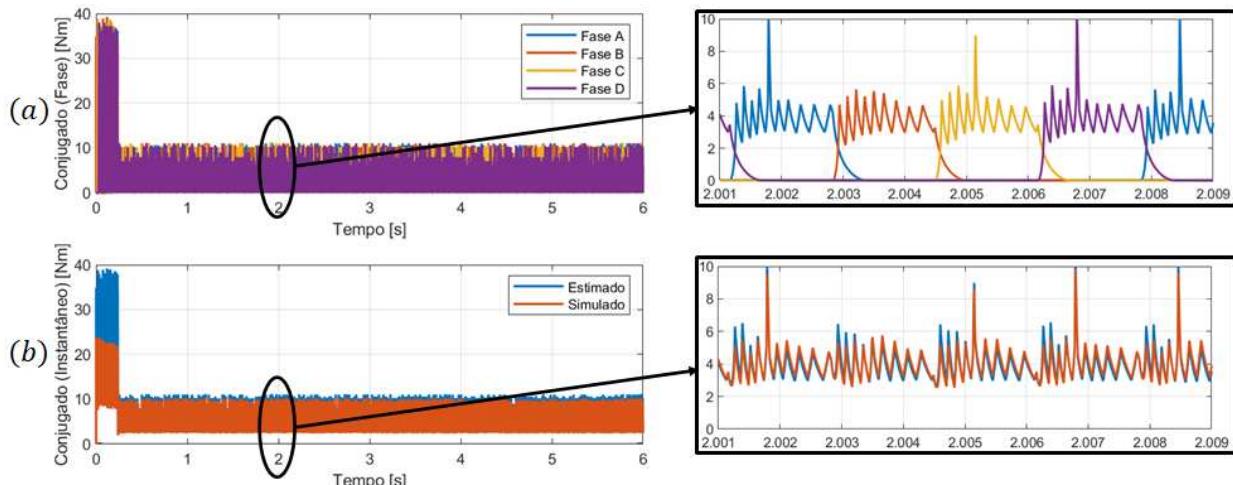
A figura 58 mostra o comportamento do conjugado instantâneo da MRV durante a simulação.

Em (a), são apresentados os resultados do conjugado individual estimado para cada uma das fases da máquina. É possível observar as curvas de conjugado instantâneo para

cada fase, onde se percebe a natureza pulsante do conjugado, típica do funcionamento da MRV. Cada fase contribui com seu próprio conjugado individual, resultando em um conjugado total que varia ao longo do tempo.

Em (b), é feita uma comparação entre o conjugado instantâneo total estimado e o conjugado instantâneo da simulação. Verifica-se que os valores e as formas de onda são muito similares, indicando que o estimador foi capaz de estimar com elevada precisão o comportamento do conjugado instantâneo da MRV. Isso demonstra a confiabilidade do estimador e sua capacidade de reproduzir de forma acurada o conjugado da máquina.

Figura 58 – Conjugado instantâneo da MRV; (a) Conjugado instantâneo estimado para cada uma das fases da MRV; (b) Comparação entre o conjugado instantâneo estimado e simulado.



Fonte: Autor

A figura 59 mostra os resultados obtidos com o estimador para o valor médio do conjugado, potência e rendimento da MRV, em comparação com os resultados simulados.

Em (a), é apresentado o valor médio do conjugado estimado em relação ao tempo. É possível observar a semelhança entre o valor médio estimado e o valor médio simulado, indicando que o estimador foi capaz de estimar adequadamente o comportamento médio do conjugado da máquina.

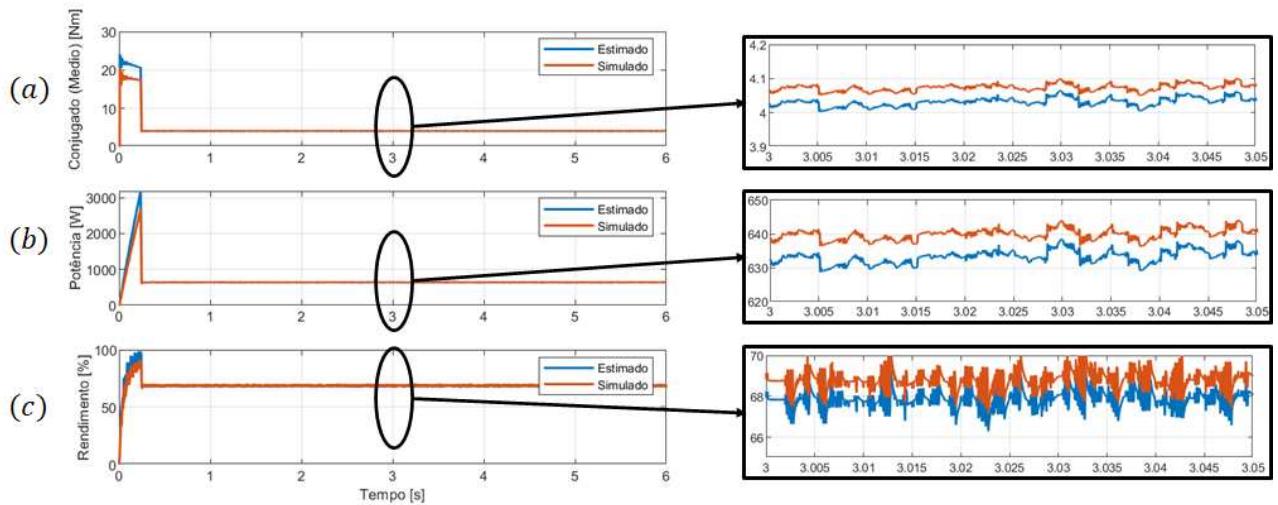
Em (b), são apresentados os resultados obtidos para a potência estimada em relação ao tempo, em comparação com os resultados simulados. Novamente, é possível verificar a similaridade entre os resultados estimados e simulados, demonstrando a capacidade do estimador em estimar a potência de saída da MRV.

Em (c), é mostrado o rendimento estimado em relação ao tempo, comparado com o rendimento simulado. É perceptível a consistência entre os resultados estimados e

simulados, indicando que o estimador foi capaz de fornecer uma boa estimativa para o rendimento da máquina.

Esses resultados são importantes para a avaliação do desempenho da MRV, permitindo analisar o rendimento e a potência de saída do sistema. Com base nessas informações, é possível otimizar o controle e o projeto da máquina, visando melhorar a eficiência e a performance global.

Figura 59 – Valores médios de conjugado, potência e rendimento; (a) Conjugado médio; (b) Potência média; (c) rendimento



Fonte: Autor

5.2.2 Velocidade Variável

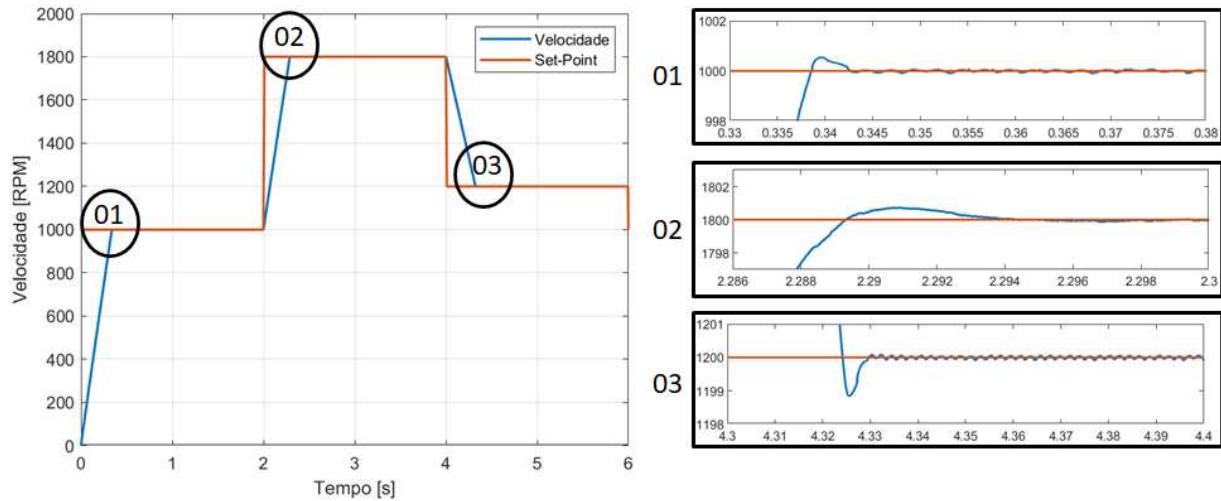
No ensaio realizado, a máquina foi simulada com uma carga constante de 4Nm, uma tensão de 300V no barramento CC e um ângulo de condução de 15 graus para cada fase. Inicialmente, foi aplicado ao controlador um set-point de 1000 RPM, seguido de dois degraus para 1800 RPM e 1500 RPM, respectivamente.

A figura 60 ilustra o perfil de velocidade definido como set-point e o perfil de velocidade resultante durante a simulação da MRV.

O perfil de velocidade imposto, inicia-se em 1000 RPM. Em seguida, ocorrem dois degraus: o primeiro degrau aumenta o set-point para 1800 RPM e o segundo degrau reduz o set-point para 1500 RPM.

É possível observar que o perfil de velocidade realizado durante a simulação segue o perfil imposto, porém, apresenta um tempo de resposta para atingir os novos set-points devido à inércia do sistema. Em geral, a MRV demonstra a capacidade de acompanhar as variações do set-point de velocidade, adaptando-se adequadamente às demandas impostas.

Figura 60 – Perfil de velocidade durante a simulação.



Fonte: Autor

Na figura 61, são apresentados os resultados do conjugado instantâneo obtidos na simulação da MRV, destacando o comportamento do valor estimado em comparação com o resultado da simulação em diferentes momentos.

Nos momentos de regime permanente, identificados como situações 01, 03 e 04, é possível observar que o estimador de conjugado apresenta um desempenho consistente e preciso, seguindo de perto os valores obtidos na simulação. Isso indica que o estimador é capaz de estimar adequadamente o conjugado instantâneo mesmo em condições de regime permanente.

Além disso, em um dos momentos transitórios, identificado como momento 02, o estimador também demonstra um desempenho estável, acompanhando as variações do conjugado instantâneo durante a transição entre diferentes velocidades. Essa capacidade de resposta do estimador em momentos de transição é essencial para garantir um controle preciso da MRV em situações dinâmicas.

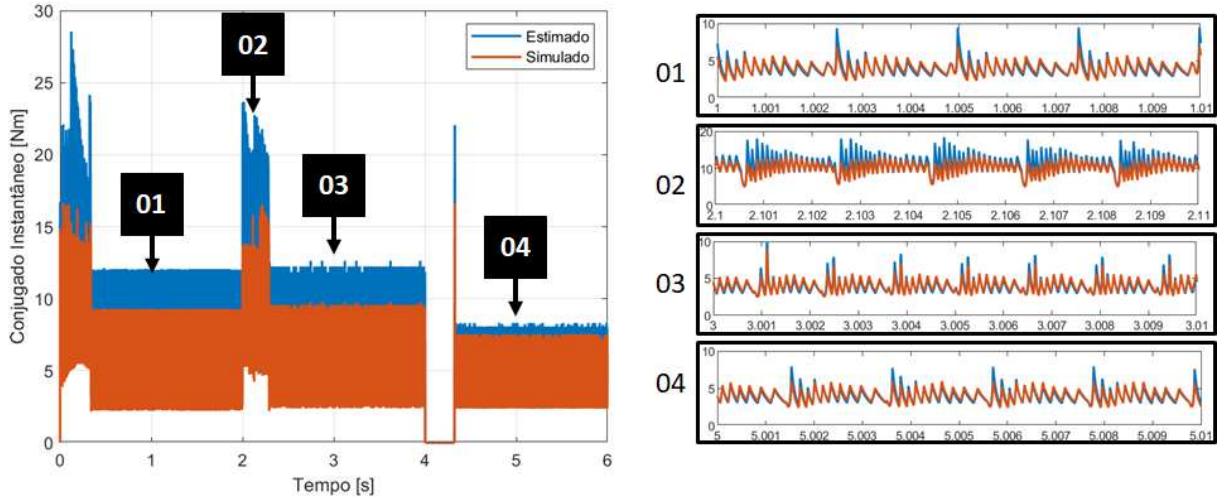
Na figura 62 são apresentados os valores médios estimados e simulados para o conjugado, potência e rendimento da MRV.

Em (a), temos a comparação entre o valor médio estimado e simulado para o conjugado da máquina. Podemos observar que os valores estimados são bastante próximos aos valores simulados, indicando uma boa precisão do estimador na determinação do conjugado médio.

Em (b), temos a comparação entre o valor médio estimado e simulado para a potência de saída da MRV. Novamente, os valores estimados se aproximam dos valores simulados, o que demonstra a capacidade do estimador em estimar a potência média da máquina.

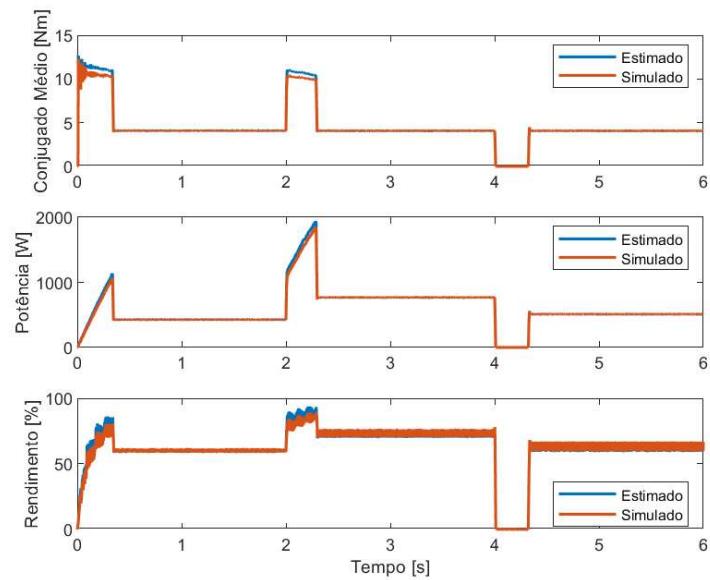
Em (c), temos a comparação entre o valor médio estimado e simulado para o rendimento da MRV. O rendimento é uma medida importante da eficiência da máquina, e os valores estimados se aproximam dos valores simulados, indicando uma boa estimativa do rendimento pelo estimador.

Figura 61 – Comparação do conjugado instantâneo estimado e simulado.



Fonte: Autor

Figura 62 – Valores Médios de Conjugado, potência e rendimento.



Fonte: Autor

Esses resultados evidenciam a capacidade do estimador em estimar com precisão as grandezas médias de interesse, como o conjugado, a potência e o rendimento da MRV. Isso permite uma avaliação confiável do desempenho da máquina e auxilia no projeto e controle adequados da MRV em diversas aplicações.

5.2.3 Ensaio dinâmico do estimador

Na nova simulação realizada, foi investigada a performance do estimador em relação à variação da velocidade e da carga no eixo da máquina. Para isso, a máquina foi simulada com a velocidade variando de 500 a 3000 RPM, a fim de analisar o comportamento do estimador nessa faixa de velocidades.

A figura 63 apresenta os resultados obtidos nessa simulação. Em (a), é exibido o perfil da velocidade da máquina ao longo do tempo. Podemos observar que a velocidade varia dentro da faixa definida, demonstrando a capacidade do sistema de controle em manter a velocidade desejada.

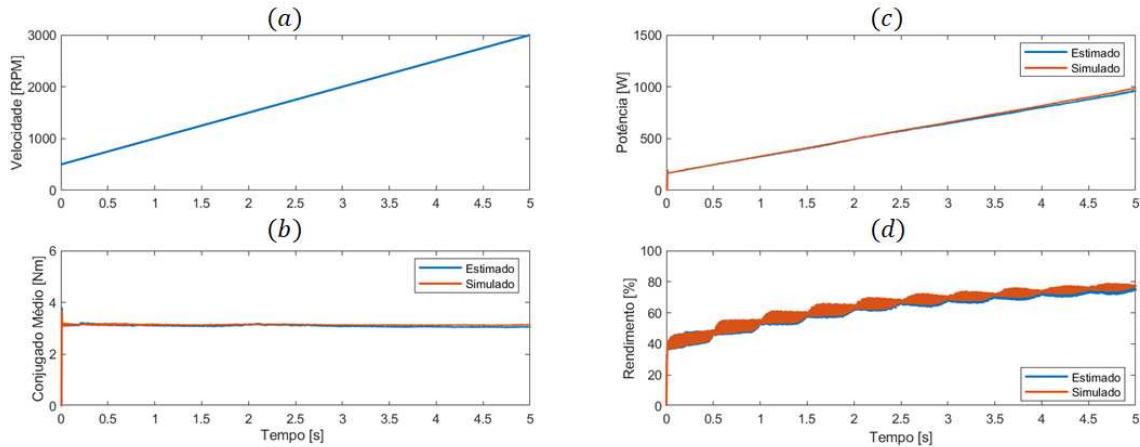
Em (b), temos uma comparação entre o conjugado médio estimado e simulado. Podemos observar que, em geral, os valores estimados estão próximos aos valores simulados, indicando que o estimador consegue acompanhar as variações do conjugado ao longo da faixa de velocidades.

Em (c), é feita uma comparação da potência de saída média estimada e simulada. Novamente, os valores estimados se aproximam dos valores simulados, o que demonstra a eficiência do estimador em estimar a potência média da máquina, mesmo com variações na velocidade.

Por fim, em (d), é apresentada uma comparação do rendimento estimado e simulado. Podemos observar que os valores estimados acompanham os valores simulados, indicando a capacidade do estimador em estimar o rendimento da máquina em diferentes velocidades.

Esses resultados mostram que o estimador apresenta um bom desempenho mesmo diante das variações de velocidade da máquina, sendo capaz de estimar com precisão o conjugado médio, a potência média e o rendimento. Isso é importante para o monitoramento e controle adequados da MRV em diferentes condições de operação.

Figura 63 – Desempenho do estimador para variação da velocidade entre 500 e 3000RPM.



Fonte: Autor

A figura 64 mostra os resultados da simulação com a variação da carga no eixo da máquina, de 1 a 6 Nm. O objetivo era avaliar o comportamento do estimador de conjugado diante de alterações na carga da máquina.

Em (a), é apresentado o perfil da carga imposta ao eixo da máquina ao longo do tempo. Podemos observar que a carga varia dentro da faixa definida, permitindo analisar a resposta do estimador diante dessas variações.

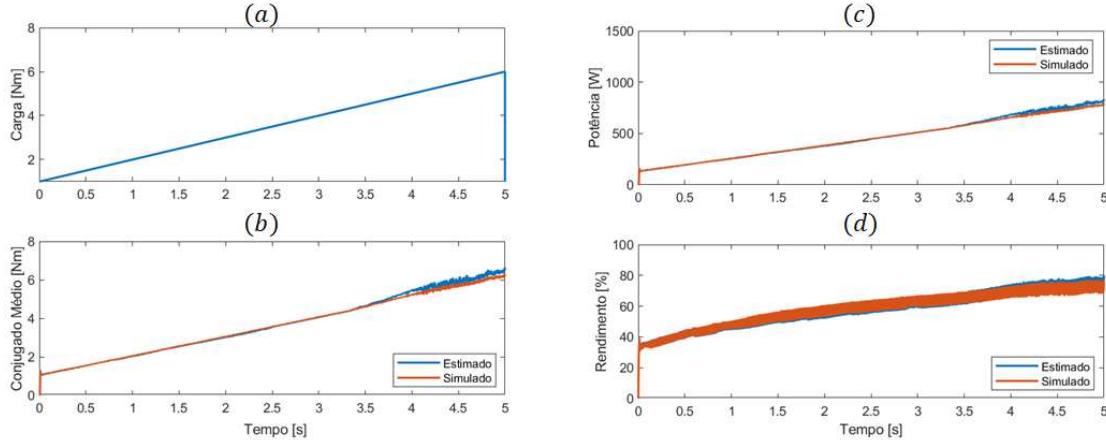
Em (b), é feita uma comparação entre o conjugado estimado e o conjugado simulado. Podemos notar que os valores estimados se aproximam dos valores simulados, indicando que o estimador é capaz de acompanhar as mudanças na carga e estimar o conjugado com uma boa precisão.

Em (c), é apresentado um comparativo entre a potência de saída estimada e a potência de saída simulada. Novamente, os valores estimados se aproximam dos valores simulados, evidenciando que o estimador consegue estimar a potência de saída média da máquina mesmo diante de variações na carga.

Por fim, em (d), é mostrado um comparativo entre o rendimento estimado e o rendimento simulado. Podemos observar que os valores estimados seguem a mesma tendência dos valores simulados, indicando que o estimador consegue estimar o rendimento da máquina de forma adequada, considerando as variações na carga.

Esses resultados evidenciam que o estimador de conjugado apresenta uma boa performance diante de mudanças na carga da máquina, sendo capaz de estimar com precisão o conjugado, a potência de saída e o rendimento.

Figura 64 – Desempenho do estimador para variação da carga no eixo entre 1 e 6Nm.



Fonte: Autor

Com base nos resultados apresentados, é evidente que o estimador demonstrou estabilidade e precisão ao acompanhar os valores esperados durante as simulações. Isso confirma a sua capacidade de estimar com confiabilidade o conjugado, a potência e o rendimento da MRV em diferentes cenários.

A estabilidade do estimador é uma característica essencial, pois garante que as estimativas permaneçam confiáveis ao longo do tempo, mesmo diante de variações na velocidade, carga e outras condições de operação da máquina. Além disso, a precisão do estimador é fundamental para fornecer informações confiáveis para o acionamento e controle da MRV.

Com esses resultados, fica evidente que o estimador possui uma aplicabilidade prática como um instrumento virtual para aplicações de acionamento e controle da MRV. Ele pode ser utilizado como uma ferramenta útil para monitorar o desempenho da máquina, ajustar os parâmetros de controle e otimizar seu funcionamento.

No entanto, é importante ressaltar que os resultados obtidos na simulação devem ser validados experimentalmente para garantir a confiabilidade do estimador em condições reais de operação da MRV. A realização de testes práticos é essencial para verificar a performance do estimador em situações reais e confirmar sua aplicabilidade em ambientes industriais.

5.2.4 Estimador como variável de controle

A simulação realizada para avaliar a estabilidade do estimador na estratégia de controle é uma abordagem importante para verificar sua eficácia no controle do conjugado eletromagnético da MRV diante de variações na carga.

Na nova configuração da malha de controle, o valor do conjugado médio estimado é utilizado como variável de realimentação para o controlador. Isso significa que o esti-

mador fornece uma estimativa confiável do conjugado médio, que é então utilizado como referência para o controle do motor.

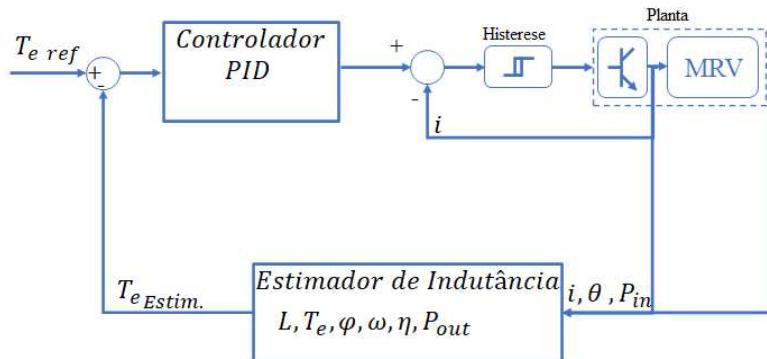
A figura 65 apresenta o diagrama de blocos da nova configuração da malha de controle utilizada na simulação, na qual o valor do conjugado médio estimado é realimentado para o controlador. Essa configuração permite avaliar a estabilidade do estimador na estratégia de controle da MRV.

O objetivo da simulação era manter o conjugado eletromagnético desenvolvido pelo motor constante, mesmo com a variação da carga no eixo. Para isso, foi definido um set-point de 4Nm para o controlador e a carga no eixo foi alterada entre 3,5Nm e 4,5Nm.

Através dos resultados obtidos na simulação, é possível avaliar a estabilidade do estimador na estratégia de controle. Caso o estimador seja capaz de manter o conjugado próximo ao set-point, mesmo com a variação da carga, isso indica que ele é capaz de compensar as mudanças na condição de operação e fornecer um controle preciso do motor.

A análise dos resultados irá fornecer informações importantes sobre a capacidade do estimador em lidar com as variações de carga e manter o conjugado desejado. Caso os resultados sejam satisfatórios, isso indicará que o estimador é estável e confiável o suficiente para ser utilizado em estratégias de controle da MRV.

Figura 65 – Diagrama de blocos com a nova estratégia de controle adotada para o controle de conjugado.



Fonte: Autor

Na simulação, o controle foi capaz de manter o conjugado do motor constante, mesmo com a variação da carga no eixo. Como resultado, houve uma resposta correspondente na velocidade e potência do motor. Essa resposta é esperada devido à relação entre essas três grandezas.

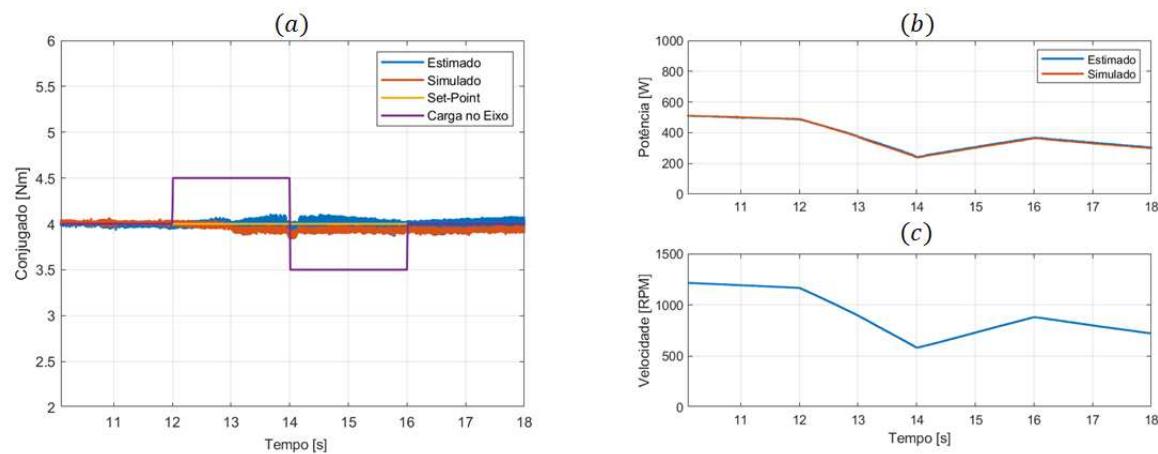
A figura 66 apresenta os resultados obtidos na simulação. No gráfico (a), é possível observar que o conjugado se mantém constante ao longo do tempo, como desejado pelo controle. Já no gráfico (b), a potência do motor varia de acordo com as variações da carga, o que é uma resposta natural, pois a potência é diretamente proporcional ao conjugado

e à velocidade do motor. No gráfico (c), a velocidade do motor também varia de acordo com as mudanças na carga, uma vez que o conjugado é mantido constante.

Esses resultados demonstram a capacidade do controle em manter o conjugado do motor constante, mesmo diante de variações na carga. Isso é importante para garantir um desempenho estável e adequado do sistema de acionamento.

Figura 66 – Resultados obtidos para o controle de conjugado com variação na carga.

Fonte: Autor



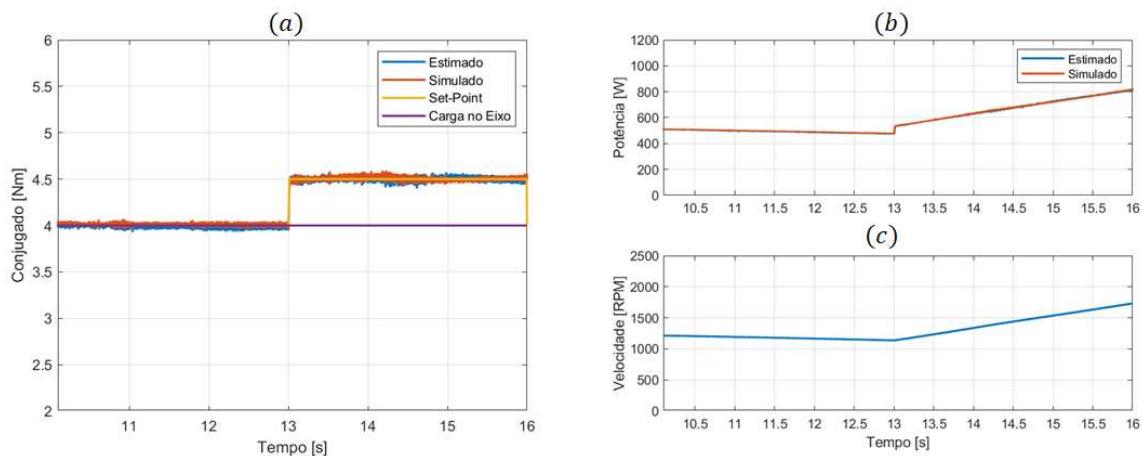
Na figura 67, são apresentados os resultados do controle de conjugado, em que foi aplicado um degrau no set-point, mantendo a carga no eixo da máquina constante em 4 Nm. O controlador foi capaz de ajustar o conjugado da máquina de acordo com o set-point imposto, resultando em respostas correspondentes na velocidade e potência do motor. Esses resultados reforçam a aplicabilidade do estimador como um "instrumento virtual" para ser utilizado em estratégias de controle.

No gráfico (a), são exibidos os resultados para o conjugado estimado e simulado, juntamente com o set-point do controlador e a carga no eixo da máquina. É possível observar que o controlador ajusta o conjugado estimado de forma a seguir o set-point, mantendo-o próximo do valor desejado. Além disso, a carga no eixo se mantém constante ao longo do tempo.

No gráfico (b), é apresentado o comportamento da potência na máquina. É evidente que a potência varia de acordo com as variações do conjugado, o que era esperado devido à relação direta entre essas grandezas.

No gráfico (c), é mostrado o comportamento da velocidade durante a simulação. É perceptível que a velocidade do motor acompanha as variações do set-point do controlador, mantendo-se próxima do valor desejado.

Figura 67 – Resultados obtidos para o controle de conjugado com degrau no set-point.



Fonte: Autor

Esses resultados demonstram a eficácia do controle de conjugado implementado, utilizando o estimador como uma ferramenta virtual para auxiliar nas estratégias de controle. A capacidade de ajustar o conjugado da máquina de acordo com o set-point desejado, resultando em respostas correspondentes na velocidade e potência, é fundamental para o bom desempenho do sistema de acionamento.

5.3 Conclusão

No presente capítulo, foi apresentado o modelo computacional completo desenvolvido para realizar as simulações da máquina. Esse modelo incorporou o estimador de indutância e conjugado previamente implementado no capítulo 4. Os resultados obtidos nas simulações demonstraram um bom nível de precisão do estimador, comparando-os com os valores obtidos na própria simulação. Essa precisão reforça a confiabilidade e a capacidade do estimador em fornecer estimativas precisas das grandezas desejadas.

Além disso, os resultados da simulação evidenciaram que as variáveis estimadas pelo estimador podem ser utilizadas em estratégias de controle. Isso significa que as estimativas de indutância, conjugado, potência, velocidade, entre outras grandezas, podem servir como entradas para os controladores e serem utilizadas para ajustar o comportamento da máquina de acordo com os objetivos desejados. Essa capacidade de utilização do estimador em estratégias de controle amplia sua aplicabilidade e destaca sua utilidade como uma ferramenta virtual para o acionamento e controle da máquina.

Em resumo, o modelo computacional desenvolvido e os resultados obtidos nas simulações demonstraram a eficiência e a precisão do estimador de indutância e conjugado. A utilização dessas estimativas em estratégias de controle abre possibilidades para melhorar

o desempenho da máquina, permitindo um controle mais preciso e adequado às demandas específicas de cada aplicação.

CAPÍTULO 6

Plataforma Experimental

6.1 Plataforma Experimental

6.1.1 Máquina a Relutância Variável

A Máquina de Relutância Variável utilizada na plataforma experimental foi projetada, simulada e construída no Laboratório de Acionamentos Elétricos da UFU. Trata-se de uma máquina 8x6, tetrafásica, com potência nominal de 3CV (2,2 KW), corrente nominal de 10A e velocidade nominal de 3500RPM.

A construção da MRV 8x6 utilizada na plataforma foi realizada por Moraes Filho (2017). Na Figura 68 (a), é possível observar a MRV construída, onde uma carcaça de um motor de indução foi utilizada para acomodar e abrigar a MRV. Na Figura 68 (b), é possível identificar os oito polos do estator, cada um com seu enrolamento, e os seis polos do rotor, formando a relação 8x6 da máquina.

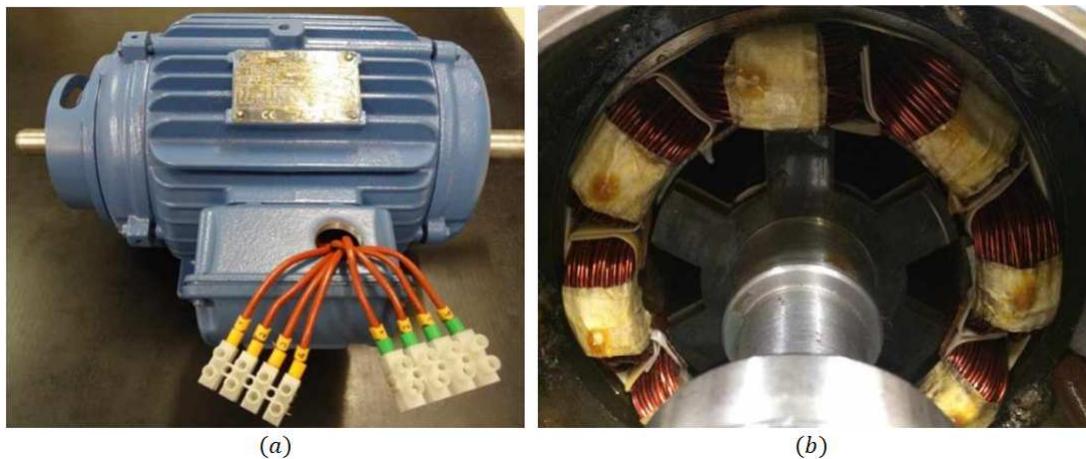
A utilização de uma carcaça de motor de indução para abrigar a MRV facilita a integração da máquina na plataforma experimental, além de permitir a comparação direta entre o desempenho da MRV e de um motor de indução convencional.

As características construtivas da Máquina de Relutância Variável desempenham um papel fundamental na análise e projeto do controle de acionamento. Um aspecto importante é a determinação dos ângulos de sobreposição do rotor e estator, que definem o momento de excitação de cada uma das fases da MRV.

No caso específico da MRV utilizada na plataforma experimental, foi projetada de forma a ter ângulos de condução iguais a 15 graus mecânicos para cada fase. Isso significa que o perfil de indutância da máquina é repetido a cada 60 graus mecânicos.

Essa escolha dos ângulos de condução é estratégica, pois permite um controle mais preciso do acionamento da MRV. Ao manter os ângulos de condução constantes, é possível estabelecer um padrão de excitação das fases, facilitando a determinação e controle do comportamento do conjugado eletromagnético.

Figura 68 – Protótipo utilizado na plataforma experimental; (a) Visão geral da Máquina utilizada; (b) Vista interna da máquina.



Fonte: Autor

Essas características construtivas, aliadas aos modelos teóricos e aos estimadores desenvolvidos, proporcionam uma base sólida para a implementação e análise do controle da MRV na plataforma experimental. A seguir, serão apresentados os detalhes do sistema de acionamento utilizado para controlar a MRV na plataforma.

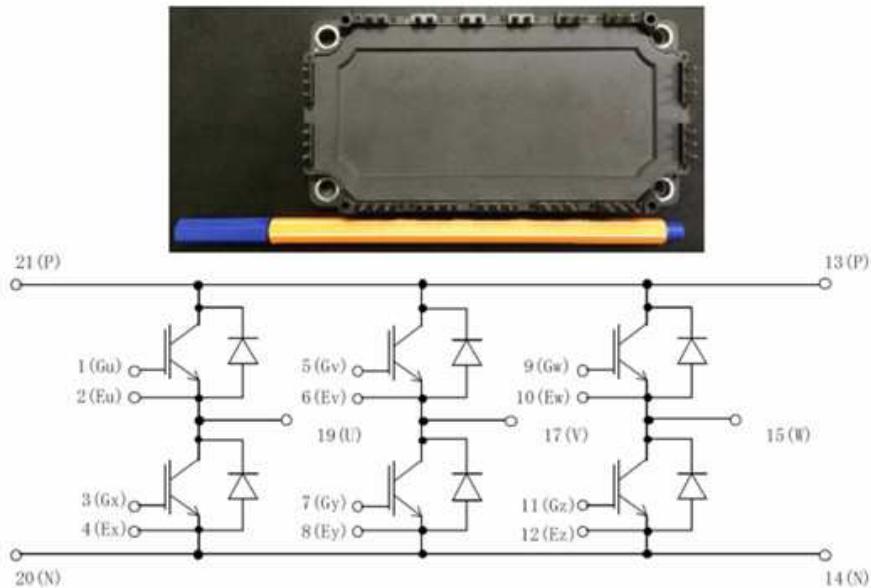
6.1.2 Conversor de Potência

O conversor de potência desempenha um papel fundamental no controle da excitação das fases da Máquina de Relutância Variável. Na plataforma experimental, foi utilizado um conversor do tipo meia ponte assimétrica, que permite a operação nos modos de magnetização, roda livre e desmagnetização.

O conversor de potência escolhido apresenta alta robustez, com capacidade de suportar tensões coletor-emissor de até 600V, corrente contínua de 100A e corrente de pico de até 200A. Para esse propósito, foi utilizado um IGBT da empresa Fuji Electric Co., modelo 6MBI100S-060.

A figura 69 apresenta a foto de um dos módulos utilizados na construção do conversor de potência, bem como o diagrama elétrico interno. Esses componentes são essenciais para a realização dos ensaios e controle da MRV na plataforma experimental.

Figura 69 – Módulo utilizado na construção do conversor de potência.



Fonte: Autor

No caso do conversor de potência utilizado na plataforma experimental, o módulo original está configurado como full-bridge. No entanto, para atender às necessidades de acionamento da máquina tetrafásica, é necessário realizar fechamentos específicos entre os terminais do módulo, a fim de convertê-lo em uma configuração half-bridge.

Para isso, optou-se por conectar entre si os terminais de gate e emissor em algumas chaves específicas do módulo. Essa conexão garante que as chaves em que ocorre o fechamento estejam sempre no estado de corte, enquanto os diodos equivalentes de roda livre permanecem habilitados para uso.

No caso da máquina tetrafásica, são necessários três módulos IGBTs. O fechamento esquemático dessa configuração é ilustrado na figura 70, onde os elementos destacados indicam os gates e emissores que devem ser curto-circuitados entre os módulos.

Essas modificações no conversor de potência permitem o controle independente de cada fase da MRV, garantindo a operação adequada e o acionamento correto da máquina na plataforma experimental.

Na plataforma experimental, são utilizados circuitos isoladores para estabelecer a interface entre o sistema de controle e o sistema de potência, garantindo o desacoplamento elétrico entre eles. Esses circuitos isoladores desempenham um papel fundamental na operação segura e eficiente da plataforma.

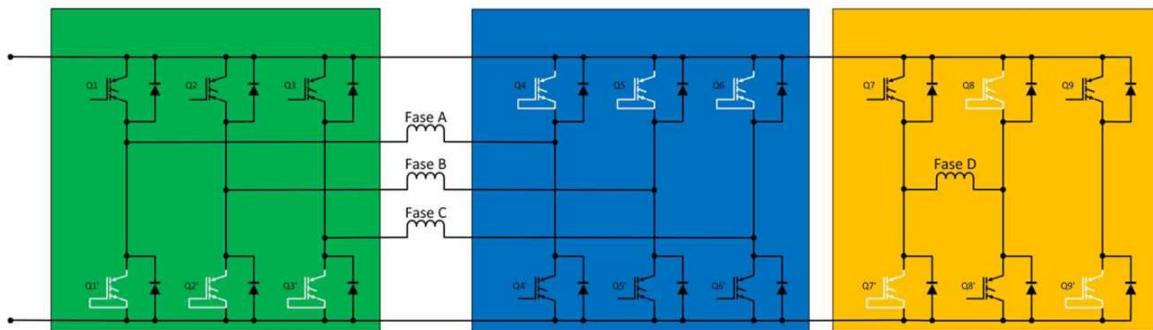
Conforme ilustrado na figura 71, são necessários nove circuitos isoladores no total. Esses circuitos têm a função de amplificar a tensão de saída do microcontrolador, garantindo que as chaves dos módulos IGBTs funcionem corretamente. Além disso, eles criam uma referência de terra própria para cada chave.

É importante destacar que a referência de terra da chave superior de cada braço do conversor não pode ser a mesma da chave inferior. Portanto, os circuitos isoladores garantem que cada chave tenha sua própria referência de terra, evitando interferências indesejadas e garantindo a integridade do sistema.

Esses circuitos isoladores desempenham um papel crucial na transmissão de sinais de controle entre o sistema de controle e o sistema de potência, permitindo um acionamento seguro e eficiente da MRV na plataforma experimental.

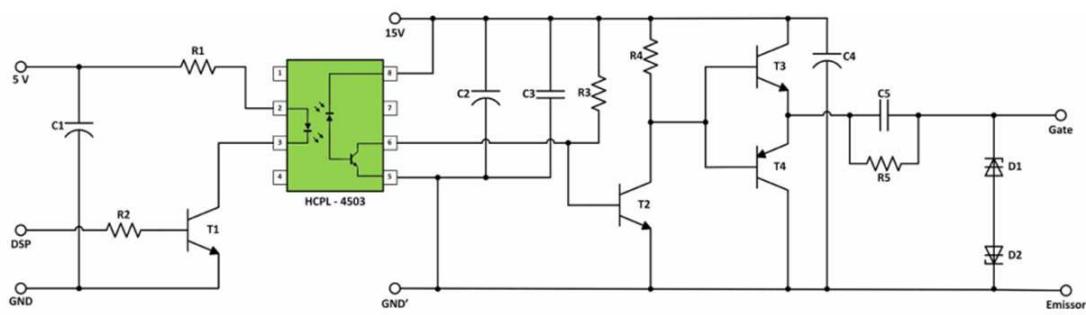
Para acionar as chaves controladas do conversor e garantir o isolamento adequado entre o sistema de controle e o sistema de potência, foi utilizado um circuito isolador baseado em opto-acopladores. A figura 71 ilustra esse circuito isolador, que permite a conexão dos sinais de gate ao conversor de potência composto pelas pastilhas IGBT.

Figura 70 – Arranjo dos Módulos no conversor de potência.



Fonte: Autor

Figura 71 – Circuito isolador optoacoplado.



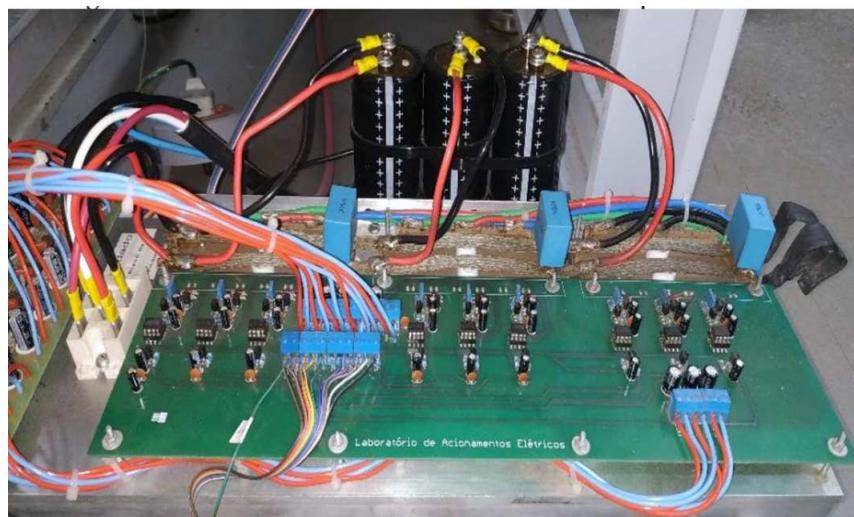
Fonte: Autor

O circuito isolador é responsável por fornecer um sinal isolado com referência distinta para cada uma das chaves do conversor. Ele garante que o sinal de gate seja referenciado em relação ao emissor de cada IGBT, permitindo o acionamento adequado das chaves controladas.

Além disso, o circuito isolador também realiza o interfaceamento entre o sinal de disparo de 3,3V fornecido pelo microcontrolador e a tensão de operação de 15V necessária para acionar os IGBTs. Isso é crucial para garantir que os IGBTs operem corretamente e evita danos ao sistema.

A figura 72 mostra a placa do circuito isolador utilizada na plataforma experimental. Essa placa permite a conexão dos sinais de gate aos IGBTs do conversor de potência, garantindo o isolamento elétrico adequado e facilitando o acionamento controlado das chaves do conversor.

Figura 72 – Fotografia da placa contendo os circuitos isoladores.



Fonte: Autor

6.1.3 Simulador de Carga

O simulador de carga é um componente fundamental da plataforma experimental, pois permite impor cargas mecânicas no rotor da MRV durante os ensaios. Isso possibilita o estudo do comportamento da máquina em diferentes condições de carga e avaliar seu desempenho em situações mais próximas das reais.

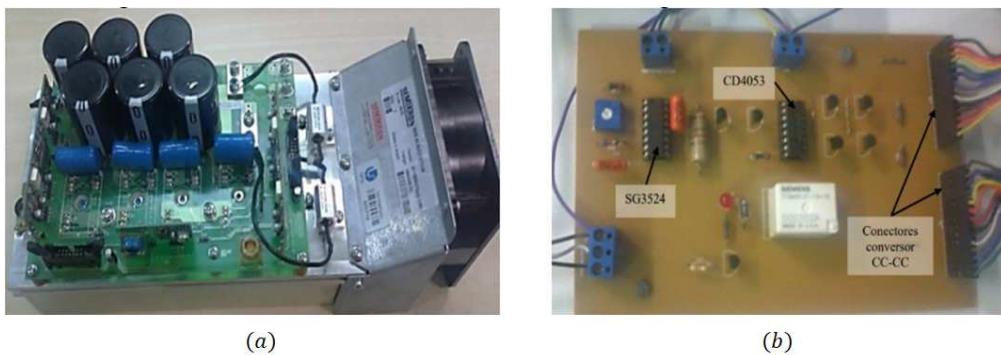
A estrutura do simulador de carga foi desenvolvida e apresentada em um trabalho anterior (SILVA, 2015). Ela é composta por uma máquina de corrente contínua, uma placa geradora de sinal PWM, um conversor CA/CC e um banco de resistência.

A máquina de corrente contínua pode ser acionada tanto como motor quanto como gerador, com excitação independente. Isso permite variar a imposição de conjugado no eixo da MRV através do controle da corrente de armadura da máquina de corrente contínua. Dessa forma, é possível simular diferentes condições de carga e avaliar o desempenho da MRV em resposta a essas variações.

O controle da corrente de armadura da máquina de corrente contínua é realizado através do conversor CA/CC, conforme ilustrado na figura 73 (a). O conversor é responsável por converter a corrente alternada em corrente contínua e controlar o valor eficaz da corrente de armadura. Esse controle é realizado utilizando um potenciômetro que ajusta o duty-cycle do sinal PWM gerado pela placa indicada na figura 73 (b).

Com a estrutura do simulador de carga, é possível realizar ensaios e investigações mais abrangentes, analisando o desempenho da MRV sob diferentes condições de carga. Isso contribui para a validação do modelo teórico, aprimoramento de estratégias de controle e avaliação do comportamento da MRV em aplicações reais.

Figura 73 – Circuitos auxiliares do simulador de carga.



Fonte: Autor

Na plataforma experimental, a máquina de corrente contínua permanece fixada e acoplada ao eixo da MRV. Essa configuração é ilustrada na figura 74. A máquina de corrente contínua desempenha um papel importante no simulador de carga, permitindo impor cargas mecânicas no rotor da MRV durante os ensaios.

Figura 74 – Máquina a Relutância Variável acoplada do Motor/Gerador de Corrente Contínua.



Fonte: Autor

A máquina de corrente contínua utilizada na plataforma experimental apresenta características condizentes com a MRV, permitindo o fornecimento de cargas iguais ou superiores às nominais da MRV. Os dados de placa da máquina de corrente contínua são os seguintes:

- ❑ Tensão de armadura: 180V
- ❑ Tensão de campo: 180V
- ❑ Corrente nominal: 20,4A
- ❑ Potência nominal: 4,5CV
- ❑ Velocidade nominal: 3600RPM

6.1.4 NI MyRIO 1900

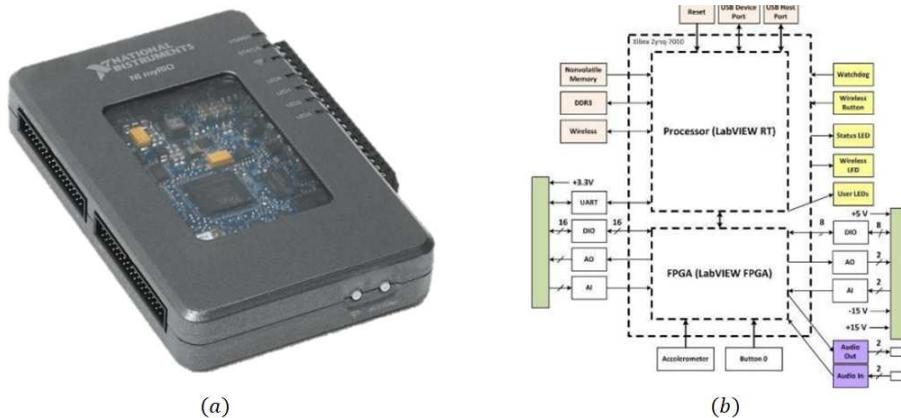
A implementação do controlador utilizando o DSP e FPGA NI myRIO 1900 foi desenvolvida e descrita em detalhes na dissertação de (FARIA, 2022). Esse controlador desempenha um papel fundamental na lógica de acionamento e controle do motor da plataforma experimental.

O NI myRIO 1900 é um dispositivo portátil de entrada e saídas configuráveis, especialmente projetado para aplicações de controle e automação. Ele é equipado com dois núcleos de processamento: o processador em tempo real ARM Cortex A9 dual core 667MHZ/512MB (conhecido como LABVIEW RT) e o módulo FPGA integrado Xilinx Zynq 7 series (conhecido como LABVIEW FPGA). Ambos têm acesso à mesma unidade de memória e aos conectores de entrada e saída.

A figura 75 ilustra o NI myRIO 1900, mostrando uma fotografia do controlador (a) e um esquema simplificado (b). O controlador oferece uma ampla gama de recursos de processamento e E/S, permitindo a implementação de algoritmos de controle avançados e a interface com os demais componentes da plataforma experimental.

O processador em tempo real (LABVIEW RT) é responsável pelo processamento dos algoritmos de controle em tempo real, enquanto o módulo FPGA (LABVIEW FPGA) oferece capacidade de processamento de alta velocidade e paralelismo, adequado para tarefas de controle de baixa latência e alto desempenho.

Figura 75 – Controlador Utilizado na Plataforma Experimental; (a) Fotografia do controlador NI MyRIO 1900; (b) Esquema simplificado do controlador.



Fonte: Autor

6.1.5 Transdutores e Sensores

6.1.5.1 Transdutor de Posição angular

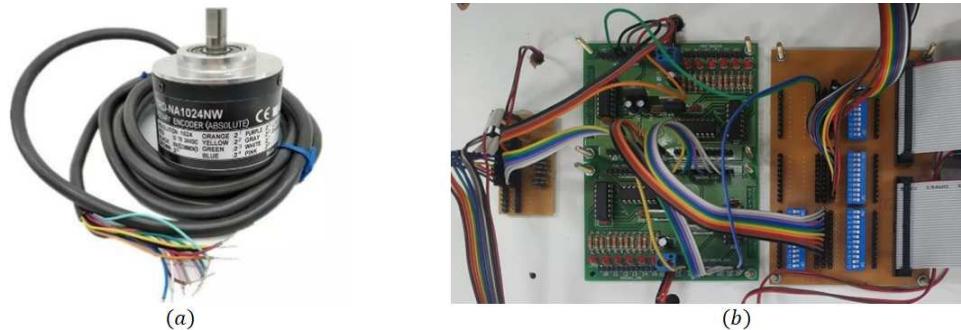
Foi utilizado um encoder absoluto para medir e detectar a posição angular do eixo da MRV na plataforma experimental. Esse encoder proporciona a capacidade de medir instantaneamente a posição do eixo do motor, permitindo também estimar a velocidade média de rotação ao derivar a posição no tempo. O modelo específico de encoder absoluto utilizado foi o TRD-NA1024NW, que pode ser visualizado na figura 76 (a).

O encoder absoluto TRD-NA1024NW possui várias características importantes. Ele possui uma resolução de 10 bits, o que corresponde a uma precisão de 0,351 graus mecânicos. Sua saída é no formato de código gray, com contagem incremental no sentido horário. A velocidade máxima contínua suportada pelo encoder é de 3000 RPM, enquanto a velocidade instantânea máxima é de 5000 RPM. O encoder possui uma saída de coletor aberto com 10 fios, correspondentes aos 10 bits de resolução.

Para conectar o encoder ao controlador, foi necessário utilizar uma placa condicionadora de nível digital. Essa placa é equipada com resistores pull-up e desempenha a função de interface entre a tensão de saída de 15V do encoder e a tensão de entrada de 3,3V do processador. Uma fotografia da placa de condicionamento de nível digital utilizada para o encoder pode ser observada na figura 76 (b).

A utilização do encoder absoluto e da placa de condicionamento de nível digital garante uma medição precisa e confiável da posição angular do eixo da MRV.

Figura 76 – Encoder Absoluto; (a) Fotografia do Encoder; (b) Placa condicionadora de sinais.



Fonte: Autor

6.1.5.2 Transdutor de Corrente e Tensão

As medições dos sinais de tensão e corrente desempenham um papel fundamental na análise do comportamento da MRV e na aplicação das estratégias de acionamento e controle. Para obter esses sinais, foi utilizada uma placa condicionadora composta por dois sensores de efeito Hall: o LV20-P para medição de tensão e o LA55-P para medição de corrente. No total, foram empregadas cinco placas condicionadoras na plataforma, uma para cada fase da MRV e uma para medir a tensão e corrente no barramento de alimentação.

A figura 77 apresenta a placa condicionadora, que possui capacidade para medir tensões de até 500V e correntes de até 25A. Os sinais medidos são condicionados para uma saída de 0 a 3,3V, valores ideais para serem lidos pelo processador utilizado.

Figura 77 – Placa condicionadora de sinais para medição de corrente e tensão.



Fonte: Autor

6.1.5.3 Transdutor de Conjugado

O transdutor de conjugado utilizado na plataforma, trata-se do modelo HBMT22/100NM. Esse transdutor é capaz de medir tanto o conjugado dinâmico quanto o estático, com uma escala máxima de 50Nm. Ele fornece um sinal de -5V a 5V, proporcional ao conjugado medido.

O transdutor de conjugado é conectado entre a MRV e a máquina de corrente contínua utilizada como carga, permitindo a medição do conjugado do lado da carga. Para garantir o encaixe adequado entre os eixos, de acordo com os limites impostos pelo torquímetro, é utilizada uma conexão mecânica com o auxílio de acopladores especiais.

6.1.6 Estratégia de acionamento da MRV

A estratégia de acionamento adotada faz parte da plataforma de instrumentação virtual implementada e descrita em detalhes em (FARIA, 2022). A lógica básica do acionamento é programada e executada no núcleo FPGA do controlador, utilizando a plataforma como uma interface integrada.

A plataforma conta com uma função de acionamento que recebe como entrada as fases a serem acionadas, os ângulos de condução de cada fase e os set-points do controle de corrente por histerese para cada fase. Essas informações são processadas pela plataforma, juntamente com a leitura da posição angular fornecida pelo encoder, e resultam no acionamento das respectivas fases da MRV por meio do conversor de potência.

O diagrama de blocos simplificado na figura 78 ilustra essa estratégia de acionamento, mostrando as variáveis de entrada e saída envolvidas no processo.

Figura 78 – Diagrama de blocos simplificado da estratégia de acionamento da MRV.



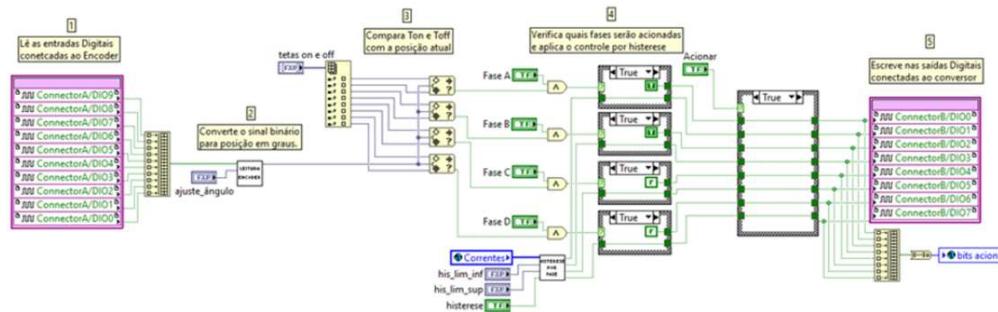
Fonte: Autor

O bloco de acionamento da MRV engloba todos os processos necessários para o acionamento do motor, utilizando as informações fornecidas pelo transdutor de posição. Com base nos ângulos de condução fornecidos como entrada, as chaves do conversor de potência são controladas para realizar o acionamento adequado da MRV. Além disso, quando

o controle por histerese está ativado, as chaves também são controladas com base na comparação entre as correntes de fase medidas e o setpoint de histerese.

O código em LabVIEW, embarcado no FPGA do NI myRIO-1900, que implementa o procedimento de acionamento da MRV está apresentado na figura 79.

Figura 79 – Código embarcado para acionamento da MRV.



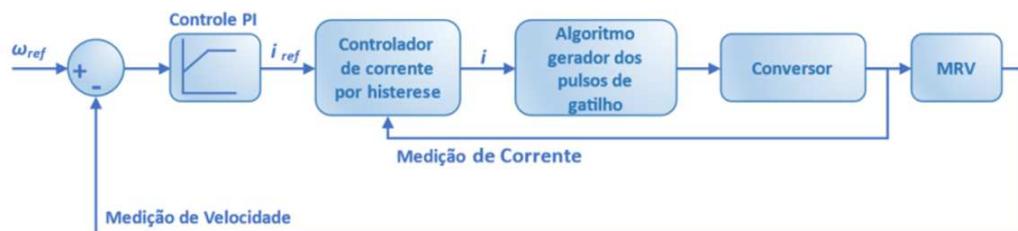
Fonte: Autor

Para a coleta de dados durante o acionamento da MRV, foi utilizado um canal DMA (Direct Memory Access) para transferência dos dados do núcleo FPGA para o núcleo RT, que é conectado ao computador via USB ou Wi-Fi. O uso do DMA é recomendado para transferência de dados em alto rendimento, permitindo a transmissão de grandes volumes de informações em alta velocidade. O DMA opera de forma unidirecional e utiliza dois buffers FIFO (First In First Out), um em cada extremidade da comunicação.

6.1.6.1 Estratégia de controle de velocidade

A figura 80 apresenta um diagrama de blocos do sistema de controle de velocidade implementado, que opera em conjunto com o controlador de histerese para a corrente, mantendo ângulos de condução e tensão de excitação constantes.

Figura 80 – Diagrama de blocos do sistema de controle de velocidade.



Fonte: Autor

No controle de velocidade, a velocidade real da MRV é comparada à velocidade de referência desejada. O erro resultante é utilizado como entrada para um controlador PID,

que atua diretamente sobre o controlador de histerese para a corrente. O sinal de saída do controlador PID é utilizado como referência para o controlador de histerese. Com base no setpoint de corrente definido pelo controlador de histerese, os pulsos de gatilho são gerados e enviados ao conversor de potência. Dessa forma, a máquina pode ser acionada como motor, obedecendo às condições de controle impostas.

Esse sistema de controle permite regular a velocidade da MRV de acordo com a velocidade de referência desejada, garantindo um comportamento dinâmico adequado e mantendo a corrente nos limites definidos pelo controlador de histerese.

6.2 Conclusão

Neste capítulo, foi descrita a concepção e a implementação da plataforma experimental destinada à validação dos métodos propostos. Foram apresentados os principais elementos que compõem a bancada, tais como a Máquina a Relutância Variável, o conversor de potência, o simulador de carga, o controlador NI MyRIO 1900, além dos sistemas de medição de corrente, tensão, posição e conjugado.

A estratégia de acionamento e controle implementada foi delineada de modo a permitir a avaliação precisa do desempenho do estimador em condições de operação reais. A estrutura experimental desenvolvida demonstrou-se adequada para a coleta de dados confiáveis, proporcionando uma base robusta para a análise comparativa entre os resultados estimados e os valores medidos.

CAPÍTULO 7

Resultados Experimentais

Este capítulo tem como objetivo apresentar e analisar os resultados experimentais obtidos com a aplicação do estimador de conjugado eletromagnético desenvolvido ao longo deste trabalho. A validação experimental constitui uma etapa fundamental em qualquer proposta metodológica que almeje aplicação prática, pois é por meio dela que se verifica a aderência entre os modelos teóricos e o comportamento real do sistema, sob diferentes condições de operação.

No contexto das Máquinas de Relutância Variável, a estimação precisa e em tempo real de grandezas como indutância, fluxo magnético, potência e, especialmente, conjugado eletromagnético, é de importância crítica para a implementação de estratégias de controle eficientes, robustas e economicamente viáveis.

A apresentação dos resultados será estruturada de forma a contemplar diversos cenários operacionais da MRV, permitindo uma avaliação abrangente da precisão, robustez e estabilidade do estimador proposto. Inicialmente, serão discutidos os testes realizados com variações de carga, velocidade e tensão de alimentação, com o objetivo de validar a resposta dinâmica do sistema e sua capacidade de estimação em tempo real. Posteriormente, serão apresentados ensaios adicionais, abrangendo condições complementares de operação que ampliam o escopo da análise e reforçam a consistência da abordagem desenvolvida.

Essa estruturação visa fornecer uma visão integrada e aprofundada sobre o desempenho do estimador frente a diferentes desafios práticos, evidenciando sua aplicabilidade em contextos reais de acionamento e controle de máquinas de relutância variável.

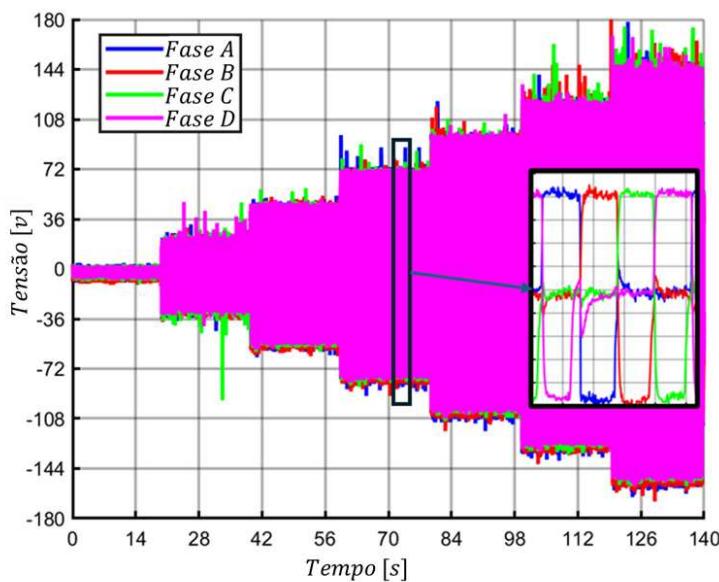
7.0.1 Acionamento em malha aberta

Nesta seção, a Máquina de Relutância Variável foi operada em configuração de malha aberta, com o objetivo de verificar o funcionamento da máquina, validar a montagem da bancada experimental, testar a integridade dos componentes eletrônicos e realizar a calibração dos dispositivos de medição. Essa etapa preliminar é fundamental para assegurar

a confiabilidade dos resultados obtidos nas fases subsequentes de experimentação.

Durante o experimento, a tensão do barramento CC foi variada de forma incremental, em valores específicos de 20 V, 45 V, 70 V, 95 V, 120 V e 150 V. Essa variação foi conduzida para avaliar o comportamento da máquina sob diferentes níveis de excitação elétrica, permitindo a observação de sua resposta dinâmica sem a interferência de sistemas de controle. A evolução da tensão aplicada ao longo do experimento é apresentada na Fig. 81.

Figura 81 – Tensão utilizada durante o experimento



Fonte: Autor

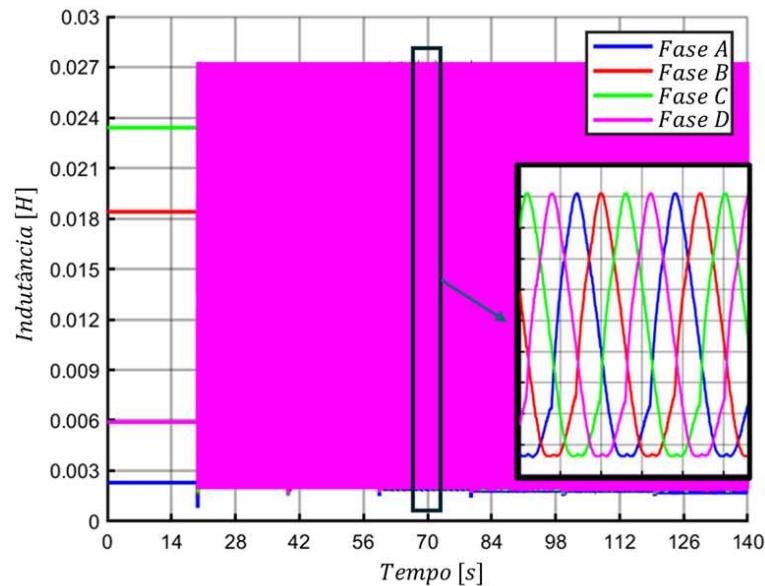
Utilizando-se da leitura da posição angular do eixo da máquina, obtida a partir de um encoder absoluto, e das correntes de fase medidas pelos transdutores de corrente instalados, foi possível estimar, em tempo real, duas grandezas fundamentais: a indutância e o fluxo magnético. A Fig. 82 apresenta as formas de onda estimadas para a indutância das quatro fases da máquina, enquanto a Fig. 83 ilustra os resultados obtidos para o fluxo magnético.

Com base nas estimativas de indutância e fluxo magnético, procedeu-se ao cálculo do conjugado eletromagnético instantâneo da MRV. Esta estimativa permitiu determinar o conjugado por fase, o conjugado total instantâneo e o conjugado médio da máquina. A Fig. 84 apresenta o perfil do conjugado instantâneo estimado, evidenciando a característica pulsante do conjugado, fenômeno intrínseco às máquinas de relutância variável devido à sua natureza de funcionamento baseada na variação cíclica de permeabilidade magnética.

Para validar a acurácia do estimador de conjugado, foram realizadas comparações com os valores medidos por um torquímetro instalado no eixo da máquina. A Fig. 85 apresenta

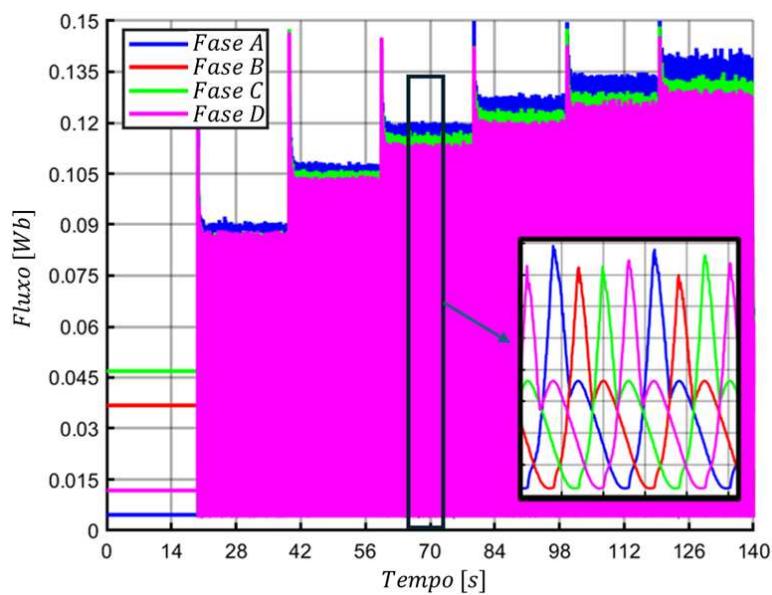
a comparação entre os valores estimados e medidos do conjugado médio, possibilitando uma avaliação crítica da precisão do modelo em condições de variação de tensão.

Figura 82 – Indutância estimada durante o acionamento



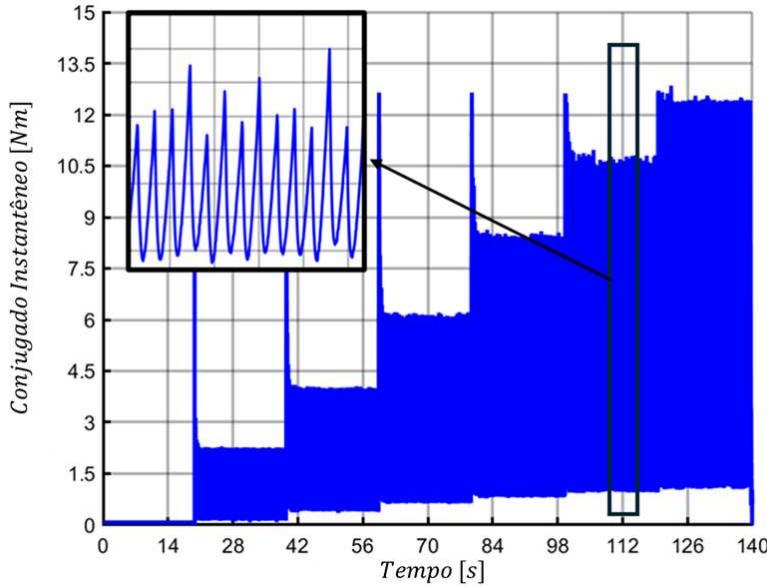
Fonte: Autor

Figura 83 – Fluxo magnético estimado durante o acionamento



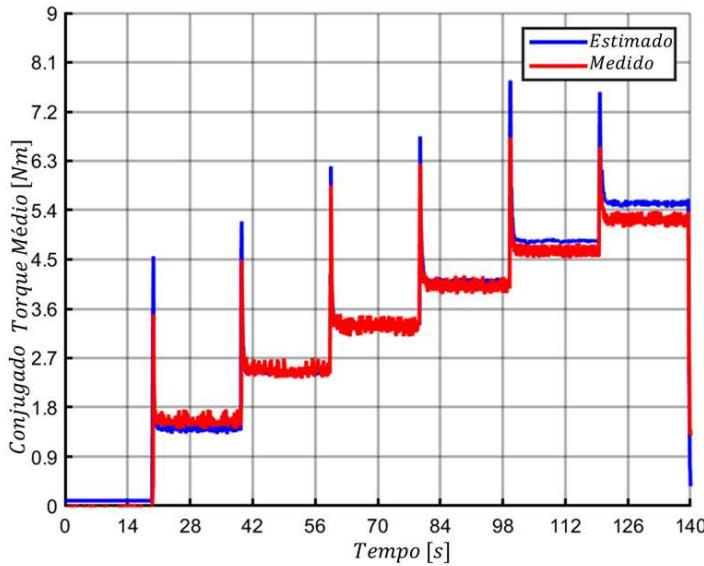
Fonte: Autor

Figura 84 – conjugado instantâneo estimado



Fonte: Autor

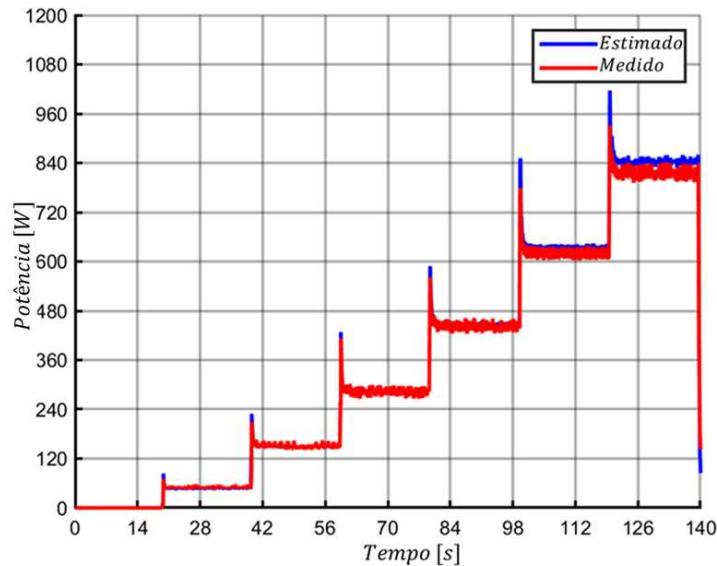
Figura 85 – Comparaçāo entre os valores medidos e estimados para o conjugado médio.



Fonte: Autor

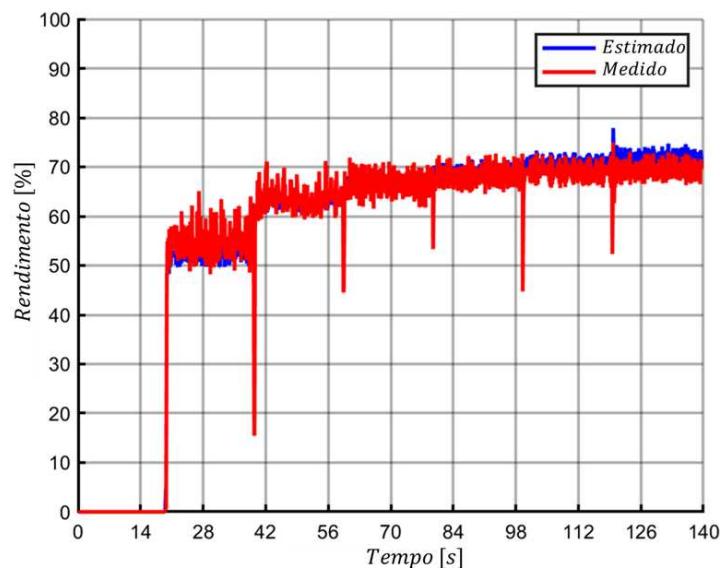
Complementarmente, as Figs. 86 e 87 apresentam as comparações dos valores estimados e medidos de potência e eficiência, respectivamente. Esses resultados permitem avaliar a capacidade do estimador em predizer o comportamento energético da máquina com elevada fidelidade, mesmo em operação em malha aberta.

Figura 86 – Comparação entre os valores obtidos para a potência de saída, medida e estimada.



Fonte: Autor

Figura 87 – Comparação entre os valores obtidos para o rendimento, medido e estimado.

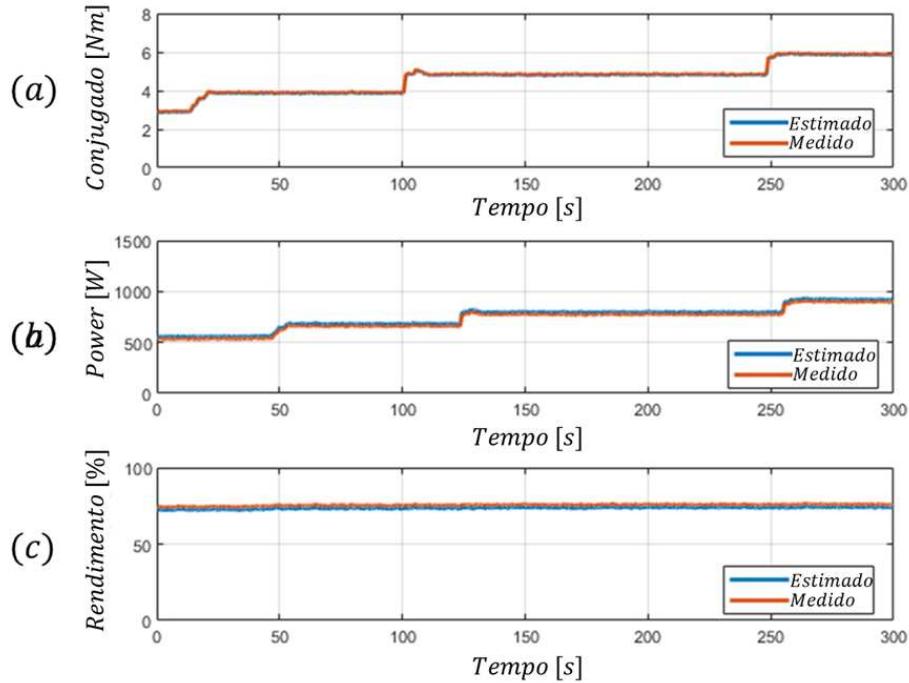


Fonte: Autor

Além das variações de tensão, também foram realizados ensaios aplicando diferentes níveis de carga mecânica ao eixo da MRV. As cargas foram incrementadas em degraus de 2,5 Nm, 4 Nm, 5 Nm e 6 Nm, permitindo observar a robustez do estimador sob diferentes

condições de carga. A Fig. 88 resume os resultados obtidos: o painel (a) apresenta o comportamento do conjugado, o painel (b) mostra a potência, e o painel (c) exibe a eficiência.

Figura 88 – Comparação entre os valores medidos e estimados com a variação da carga:
(a) conjugado; (b) Potência; (c) Rendimento.



Fonte: Autor

A análise dos resultados obtidos para a operação em malha aberta revelou:

- Forte correlação entre os valores de indutância e fluxo magnético estimados e o comportamento esperado da máquina;
- Excelente correspondência entre os valores estimados e medidos de conjugado médio, potência e eficiência;
- Estabilidade e consistência do estimador frente às variações de tensão e carga aplicadas;
- Preservação das características pulsantes do conjugado, compatíveis com o funcionamento típico de MRVs.

Tais resultados validam a eficácia do estimador proposto para aplicações práticas, destacando sua aplicabilidade tanto para plataformas de instrumentação quanto para

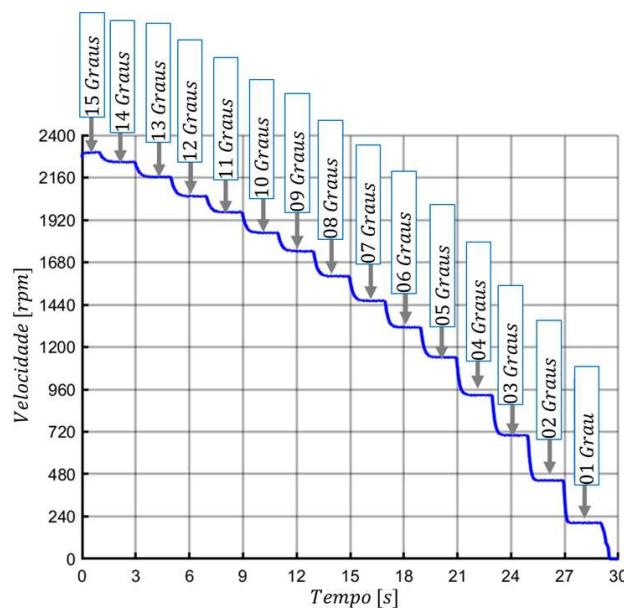
sistemas de controle em tempo real. A precisão e estabilidade observadas indicam o potencial do método para integração em estratégias de controle de máquinas de relutância variável, inclusive em ambientes industriais que demandem alta confiabilidade e baixo custo computacional.

7.0.2 Variação dos ângulos de ativação

Nesta seção, a máquina foi acionada com uma tensão constante de 150 V no barramento CC, e os ângulos de ativação foram variando de 15 a 0 graus, com o objetivo de avaliar o comportamento do estimador de conjugado sob diferentes ângulos de ativação, e de 15 a 24 graus para avaliar o comportamento do estimador com o acionamento simultâneo de uma ou mais fases.

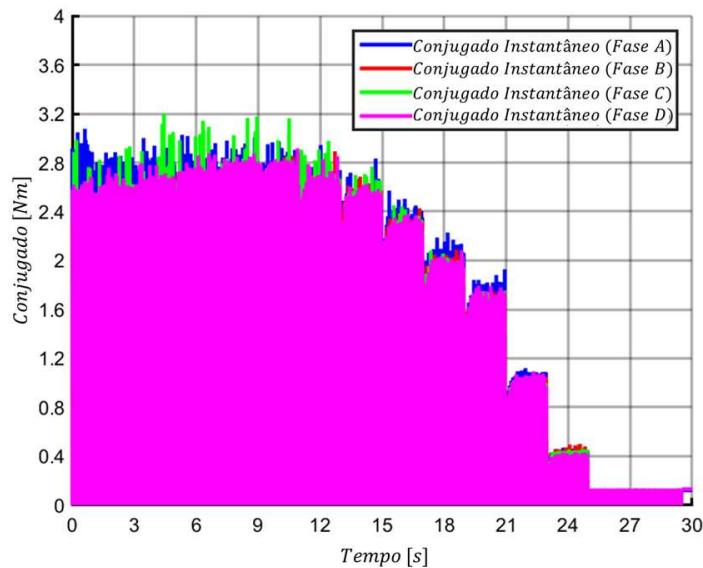
A Fig. 89 apresenta o comportamento da velocidade durante a ativação, mostrando uma mudança em degrau na velocidade conforme os ângulos foram alterados de 15 para 0 graus. A Fig. 90 ilustra o comportamento do conjugado instantâneo estimado nas quatro fases da máquina, na Fig. 91, observa-se o conjugado médio estimado, e na Fig. 92, é apresentada a potência estimada.

Figura 89 – Velocidade obtida para diferentes ângulos de ativação.



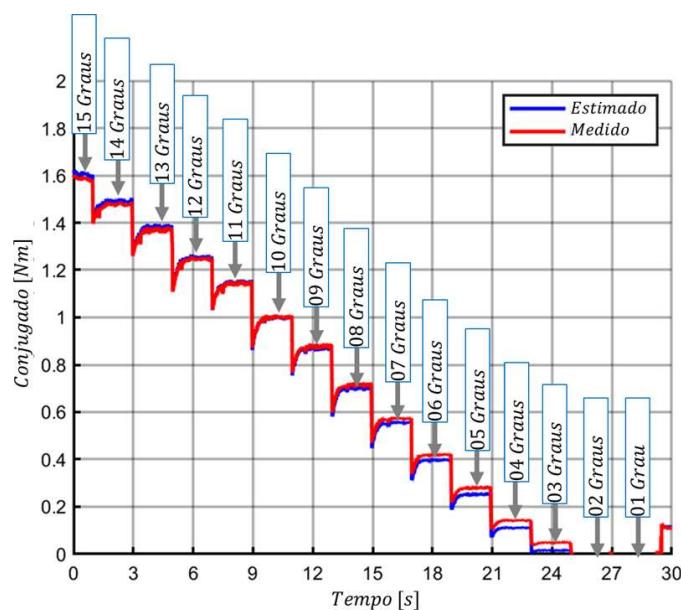
Fonte: Autor

Figura 90 – conjugado instantâneo estimado para diferentes ângulos de ativação.



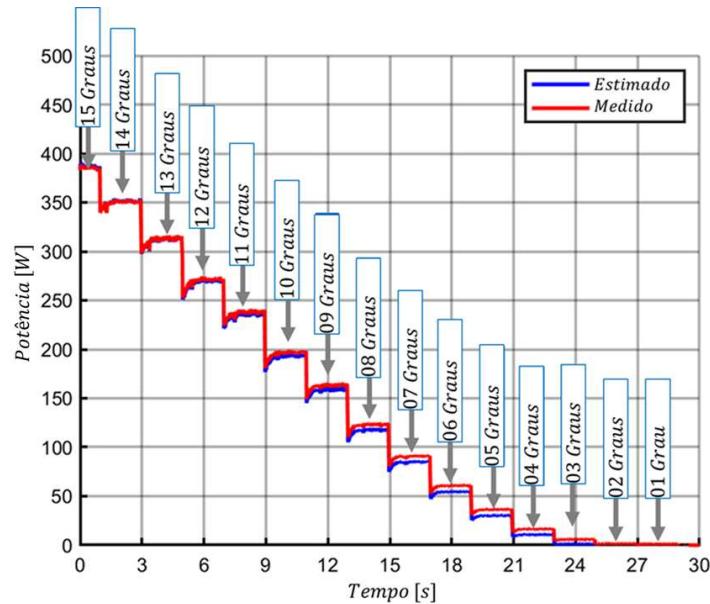
Fonte: Autor

Figura 91 – conjugado médio estimado e medido para diferentes ângulos de ativação.



Fonte: Autor

Figura 92 – Potência medida e estimada para diferentes ângulos de ativação.



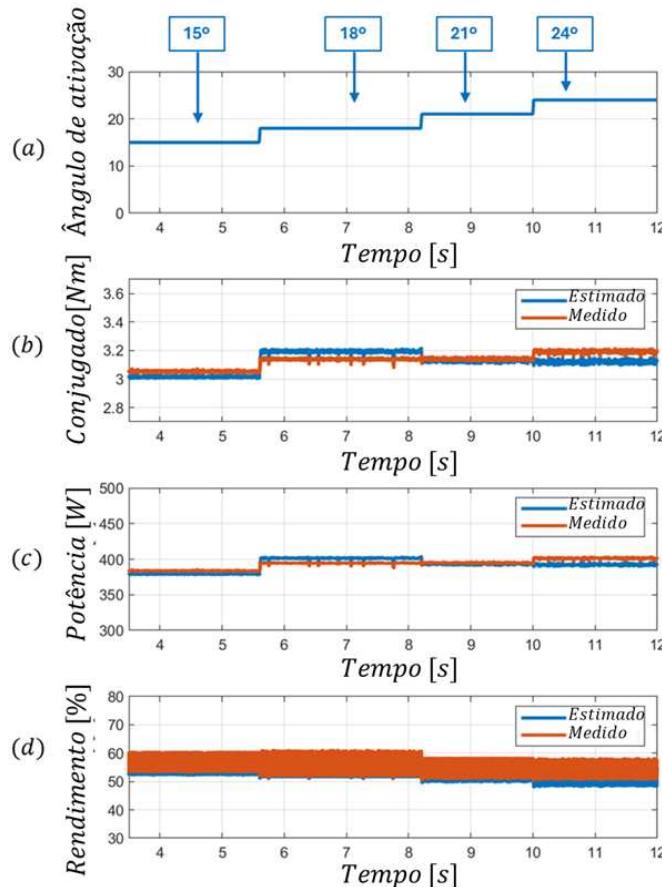
Fonte: Autor

Observou-se que o estimador de conjugado demonstrou excelente precisão em todas as condições, mesmo com a variação dos ângulos de ativação de 15° a 0°.

Nesta seção, a máquina foi operada com uma tensão constante de 150 V no barramento CC, enquanto os ângulos de ativação foram aumentados 15° a 24°, com o objetivo de avaliar o desempenho do estimador de conjugado sob diferentes condições de comutação, em situações em que mais de uma fase operou acionada simultaneamente, tal condição pode ser necessária em algumas estratégias de acionamento, especialmente técnicas para redução do ripple no conjugado instantâneo. Optou-se por limitar o acionamento até 24 graus, para proteger os componentes da plataforma experimental e evitar sobrecarga nos circuitos, bem como outras condições não controladas.

Observou-se que, para ângulos de comutação superiores a 15°, situação em que ocorre a ativação simultânea de múltiplas fases, o estimador permaneceu estável e preciso. Esta análise é ilustrada na Figura 93, que apresenta: (a) o ângulo de disparo imposto; (b) a comparação entre o conjugado médio estimado e o medido; (c) a comparação entre a potência estimada e a medida; e (d) a eficiência estimada e medida.

Figura 93 – conjugado, potência e rendimento para diferentes ângulos de ativação.



Fonte: Autor

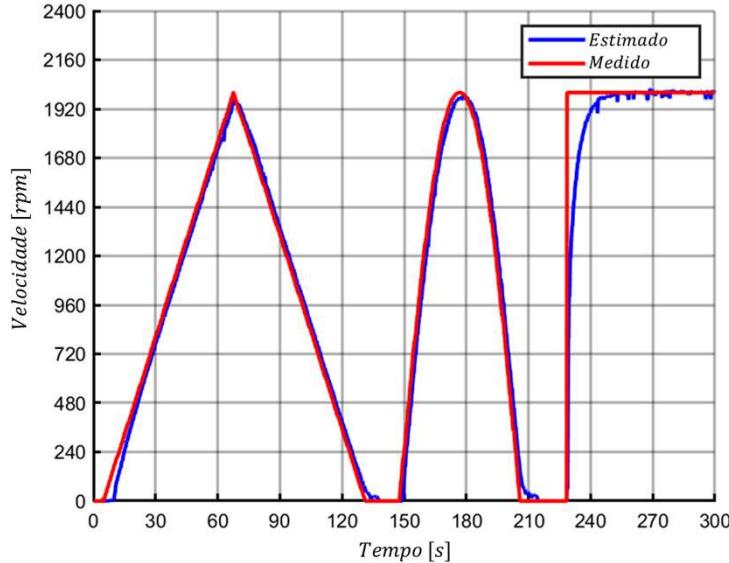
7.0.3 Operação em malha fechada — Controle de Velocidade

Nesta etapa experimental, a máquina de relutância variável foi operada em malha fechada com controle de velocidade, utilizando um controlador proporcional–integral–derivativo (PID). O sinal de realimentação para o controle foi fornecido por um encoder absoluto de 10 bits, instalado na plataforma experimental, permitindo medições precisas da posição e, consequentemente, da velocidade do rotor.

Visando a proteção dos componentes eletrônicos e dos circuitos da bancada de testes, implementou-se um controle de corrente por histerese dentro da malha de controle. Essa estratégia limitou a corrente de fase a um valor máximo de 30 A, prevenindo sobrecargas térmicas e evitando danos aos dispositivos semicondutores. O esquema geral da estratégia de controle empregada é apresentado na Figura 53. Ressalta-se que a mesma configuração de controle foi previamente utilizada nas simulações numéricas realizadas, garantindo, assim, a coerência entre os resultados simulados e experimentais. A Figura 94 apresenta o perfil de velocidade imposto à máquina e o respectivo valor de referência definido no

controlador PID.

Figura 94 – Velocidade da máquina durante o acionamento.



Fonte: Autor

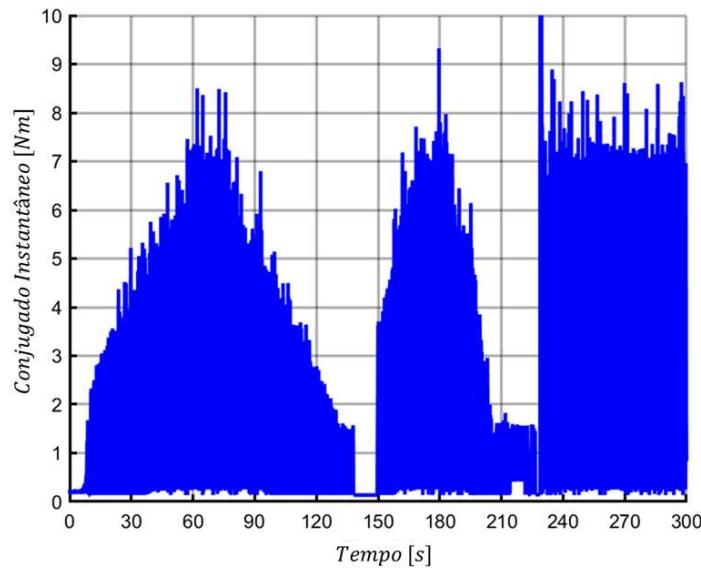
Durante o experimento, diferentes perfis de velocidade foram aplicados à máquina a fim de avaliar a robustez e a resposta dinâmica do estimador de conjugado. Os testes incluíram:

- Rampa de aceleração de 10 a 70 segundos;
- Rampa de desaceleração de 70 a 130 segundos;
- Perfil senoidal de variação de velocidade entre 150 e 210 segundos;
- Perfil de velocidade constante a partir de 230 segundos.

As Figuras 95 e 96 ilustram o comportamento do conjugado instantâneo estimado durante os diferentes regimes de operação. A Figura 95 apresenta uma visão geral do comportamento do conjugado estimado ao longo de toda a duração do ensaio, enquanto a Figura 96 oferece um detalhamento do perfil pulsante do conjugado instantâneo, evidenciando as contribuições individuais somadas das quatro fases da máquina.

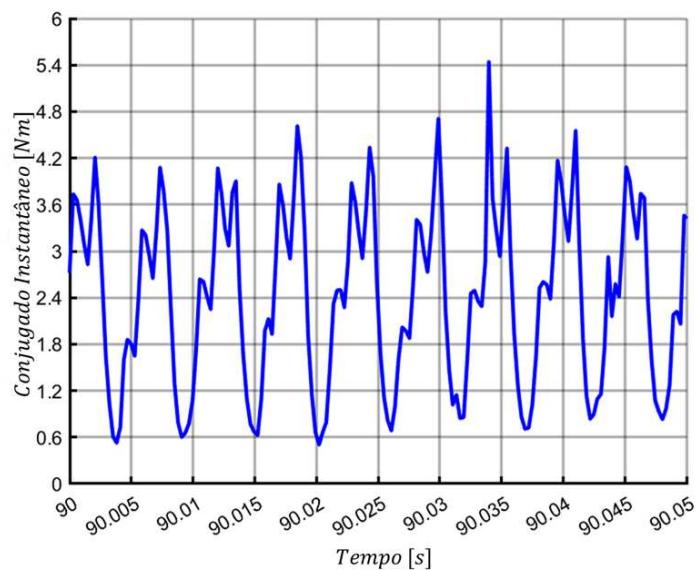
Para validar o desempenho do estimador de conjugado, os valores estimados foram comparados com medições diretas obtidas através do torquímetro instalado na bancada experimental. As Figuras 97, 98 e 99 apresentam, respectivamente, a comparação entre o conjugado médio estimado e medido, a comparação entre a potência estimada e medida, e a comparação entre o rendimento estimado e o rendimento medido.

Figura 95 – Conjugado instantâneo estimado durante o experimento.



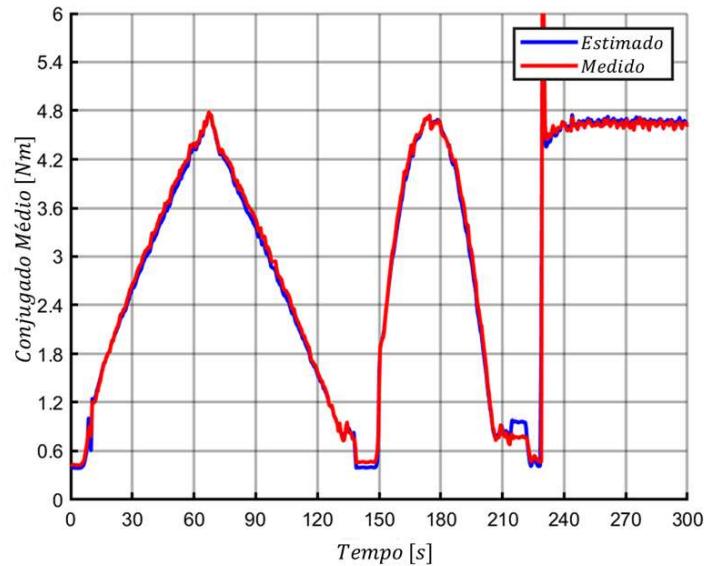
Fonte: Autor

Figura 96 – Detalhamento do perfil pulsante do conjugado instantâneo estimado.



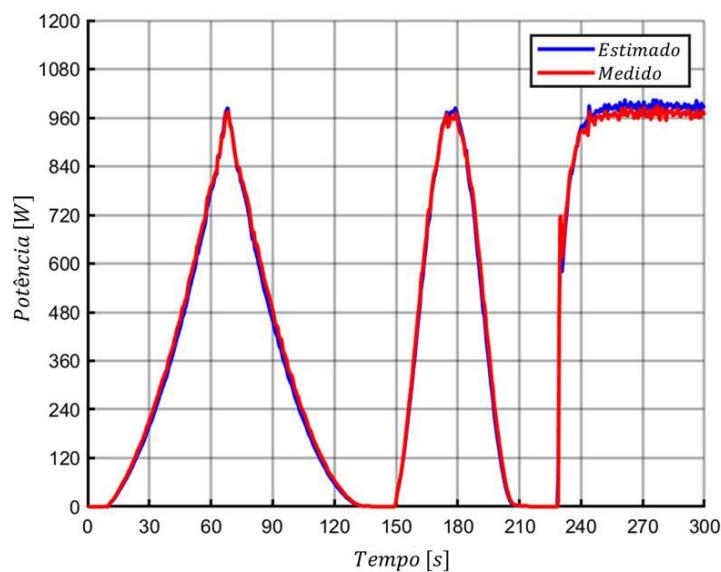
Fonte: Autor

Figura 97 – Comparação entre o conjugado médio estimado e medido.



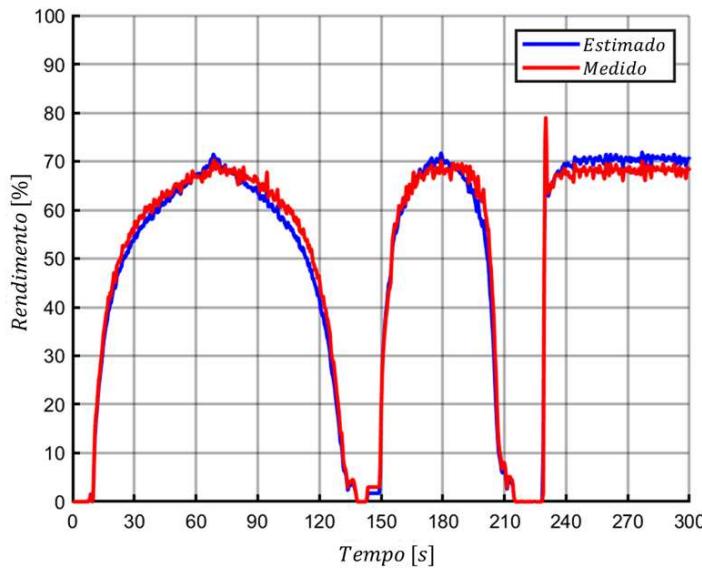
Fonte: Autor

Figura 98 – Comparação entre a potência estimada e medida.



Fonte: Autor

Figura 99 – Comparaçāo entre o rendimento estimado e medido.



Fonte: Autor

Os resultados obtidos demonstram que o estimador apresentou elevada precisão, tanto na dinâmica quanto no regime permanente, mesmo diante de perfis de velocidade variados e condições transientes. A capacidade do estimador de acompanhar com precisão as variações rápidas de conjugado e potência, além de reproduzir corretamente a eficiência da máquina, evidencia a exatidão, robustez e estabilidade do método proposto.

Esses resultados experimentais corroboram a eficácia da abordagem de estimativa desenvolvida nesta tese, comprovando seu potencial para aplicações em controle em tempo real de máquinas de relutância variável em cenários industriais e automotivos.

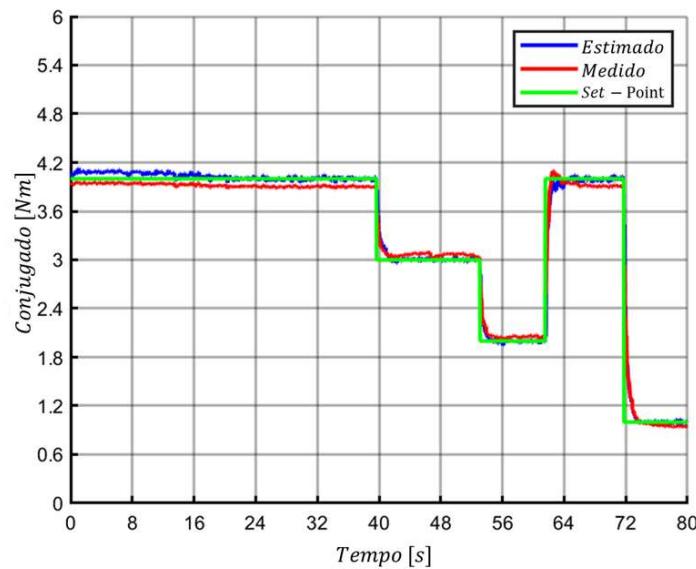
7.0.4 Operação em malha fechada — Controle de Conjugado

Nesta seção, são apresentados os resultados de dois experimentos realizados para avaliar o desempenho da máquina de relutância variável operando com um sistema de controle em malha fechada, utilizando a estimativa do conjugado médio como variável de realimentação. O objetivo dos testes foi analisar a precisão e a estabilidade do estimador sob diferentes condições de carga, bem como verificar a eficácia do controle baseado no conjugado estimado.

Neste experimento, o sistema de controle de conjugado foi configurado inicialmente com um valor de referência de 4 Nm. Durante a operação, foram aplicadas mudanças em degrau no set-point, alterando-o sequencialmente para 3, 2, 4 e 1 Nm. Essa estratégia permitiu observar a resposta do sistema às variações bruscas na referência de conjugado.

A Figura 100 apresenta as formas de onda do conjugado estimado, conjugado medido e do valor de referência (set-point). Observa-se que o sistema responde rapidamente às variações impostas, com excelente correspondência entre o valor estimado e o valor medido. Apesar da boa precisão, foi notado um aumento no nível de ruído acústico da máquina durante a ativação do controle de conjugado, bem como oscilações perceptíveis na velocidade, características típicas de controle direto por conjugado em máquinas de relutância variável.

Figura 100 – Conjugado durante o acionamento: comparação entre o conjugado estimado, conjugado medido e set-point.



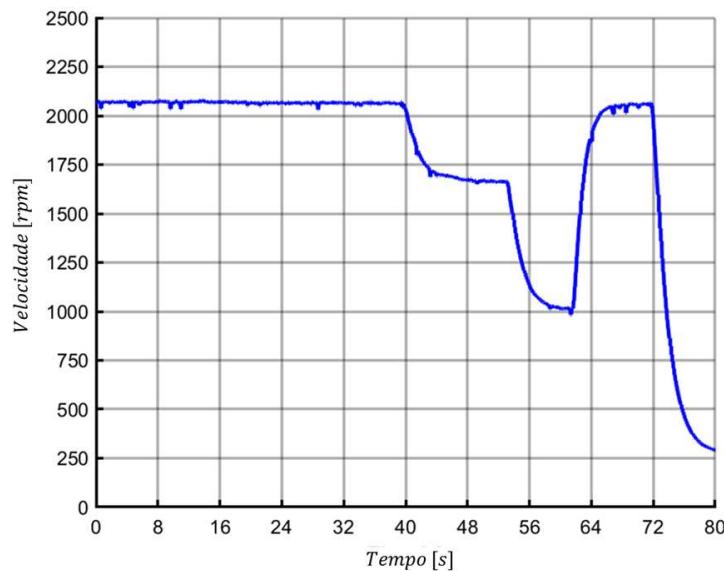
Fonte: Autor

A variação da velocidade da máquina em função das mudanças no conjugado é ilustrada na Figura 101. A relação inversa entre conjugado e velocidade é claramente observada, validando a efetividade do controle implementado e evidenciando a dinâmica acoplada entre torque e velocidade.

A Figura 102 apresenta a potência de saída da máquina, comparando os valores estimados e medidos. As variações de potência seguem de maneira consistente as alterações nos valores de conjugado, indicando a coerência entre os diferentes parâmetros elétricos estimados.

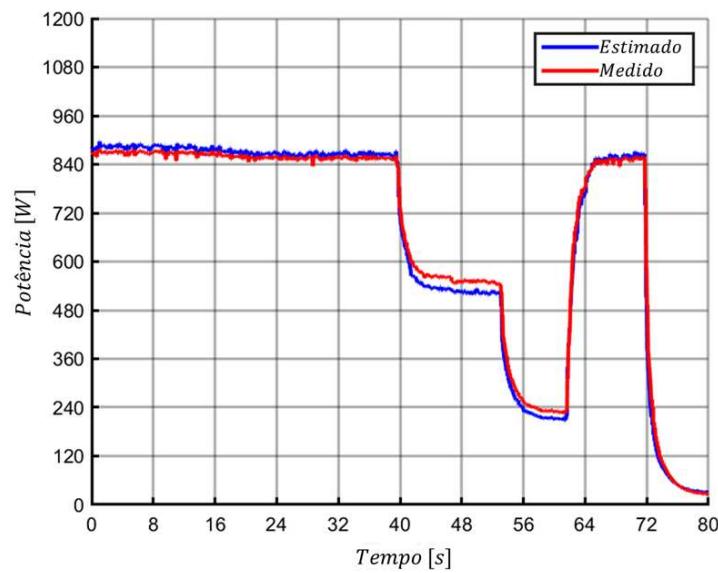
Por fim, a Figura 103 mostra a eficiência (rendimento) da máquina, tanto estimada quanto medida. A boa proximidade entre os valores evidencia a capacidade do estimador em reproduzir com fidelidade o comportamento energético da máquina em tempo real.

Figura 101 – Velocidade da máquina durante o acionamento.



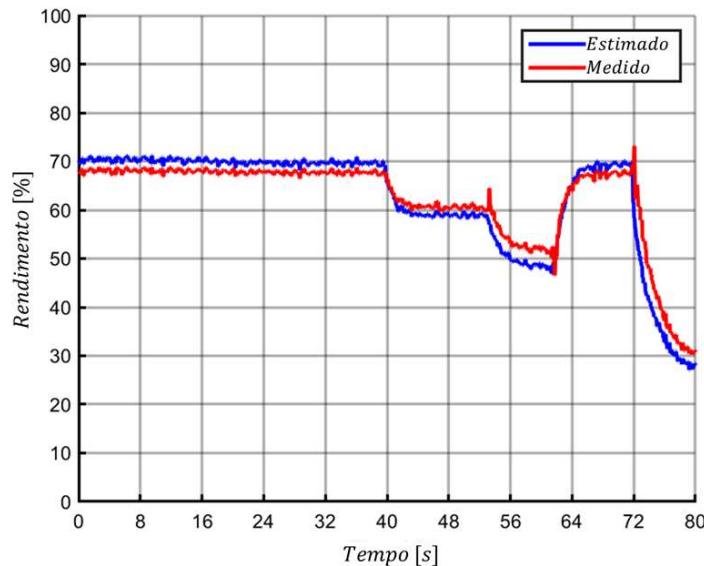
Fonte: Autor

Figura 102 – Potência de saída: comparação entre valores estimados e medidos.



Fonte: Autor

Figura 103 – Comparação entre eficiência estimada e medida durante o experimento.



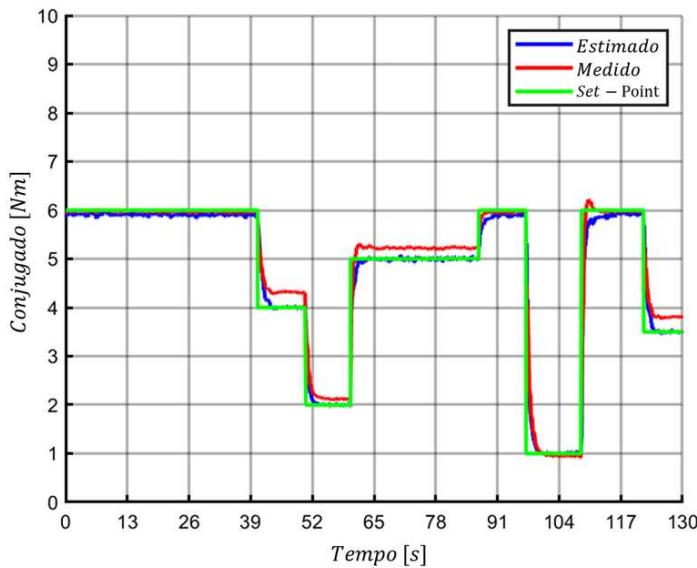
Fonte: Autor

Um segundo experimento foi realizado, com o objetivo validar a robustez do sistema de controle para um conjunto mais amplo de variações no valor de referência de conjugado, estressando o algoritmo implementado e avaliando sua performance. Neste novo acionamento, foi estabelecido um set-point de 6 Nm, com mudanças subsequentes para 4, 2, 5, 6, 1, 6 e 3,5 Nm.

A Figura 104 apresenta o comportamento do conjugado durante o ensaio, comparando os valores estimados, medidos e o set-point aplicado. A resposta do sistema às variações em degrau mostra-se rápida e precisa, reforçando a capacidade do estimador de acompanhar mudanças abruptas nas condições de operação.

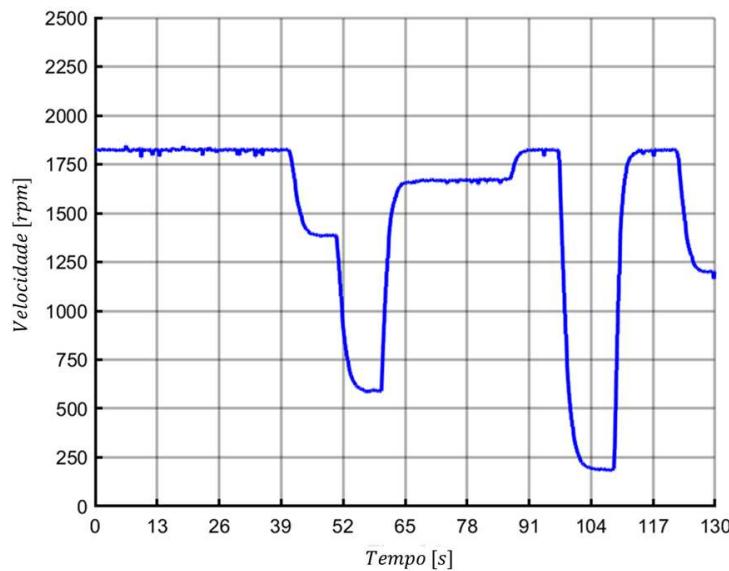
A variação da velocidade resultante das alterações de conjugado é exibida na Figura 105. A influência direta do controle de conjugado sobre a dinâmica da velocidade é novamente observada, demonstrando a interação entre variáveis eletromecânicas na máquina.

Figura 104 – Conjugado durante o segundo experimento: comparação entre valores estimados, medidos e set-point.



Fonte: Autor

Figura 105 – Velocidade da máquina durante o segundo experimento.

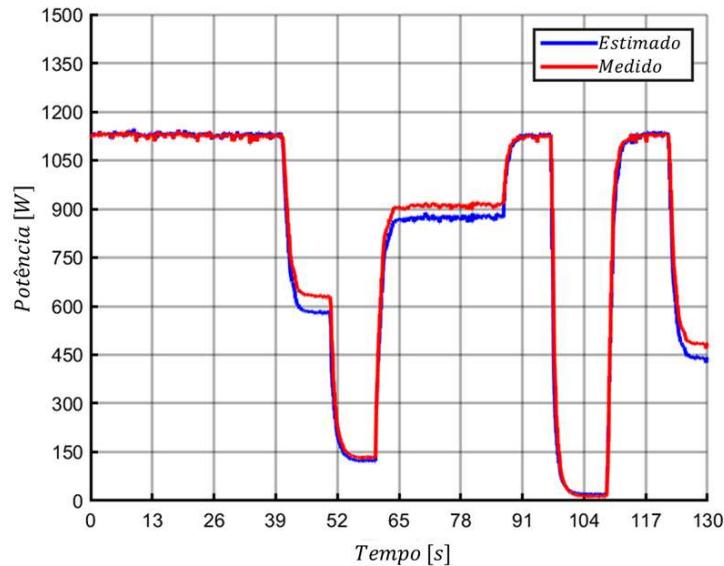


Fonte: Autor

O comportamento da potência elétrica de saída ao longo do segundo experimento é ilustrado na Figura 106. As curvas de potência estimada e medida apresentam boa concordância, indicando a consistência dos resultados obtidos.

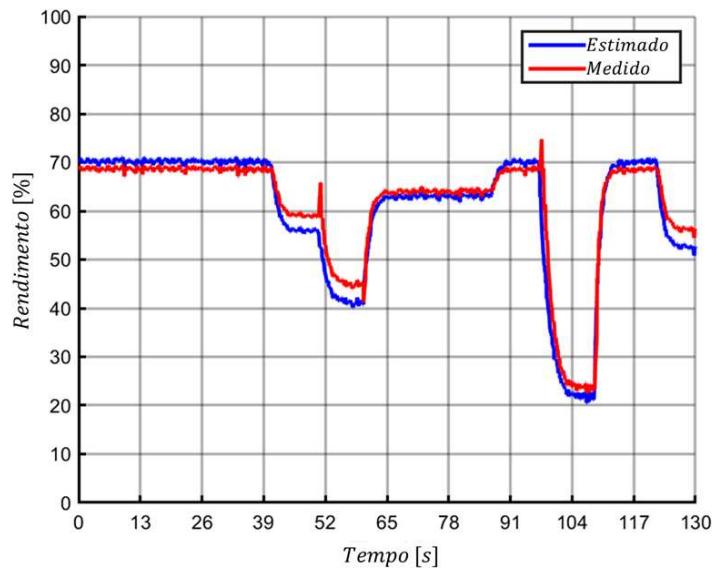
Por fim, a Figura 107 mostra a comparação entre o rendimento estimado e o rendimento medido da máquina. A proximidade entre os valores reforça a confiabilidade do sistema de estimação implementado.

Figura 106 – Potência elétrica durante o segundo experimento: comparação entre valores estimados e medidos.



Fonte: Autor

Figura 107 – Comparação entre rendimento estimado e medido no segundo experimento.



Fonte: Autor

7.0.4.1 Análise dos Resultados

Os dois experimentos realizados demonstraram de maneira consistente a eficácia do sistema de controle de conjugado em malha fechada baseado em estimativas. Em ambos os casos, o estimador foi capaz de acompanhar com alta fidelidade as variações impostas nos valores de referência, tanto sob perfis suaves quanto sob variações abruptas.

A resposta rápida do sistema e a estabilidade observada, mesmo sob condições dinâmicas de carga, validam a robustez do método de estimativa proposto. A elevada precisão dos valores estimados de conjugado, potência e rendimento reforça a viabilidade da abordagem para aplicações em sistemas de tração elétrica, automação industrial e outras áreas que exigem controle dinâmico eficiente de máquinas de relutância variável.

Os resultados obtidos neste capítulo confirmam que o sistema de controle desenvolvido é capaz de garantir operação precisa, eficiente e segura da máquina, consolidando a proposta de utilização do conjugado médio estimado como variável de realimentação para estratégias de controle em tempo real.

7.1 Robustez e Limitações do Método

O método proposto para a estimativa de grandezas em Máquinas de Relutância Variável demonstrou elevada robustez sob diversas condições operacionais. A utilização de uma modelagem polinomial da superfície de indutância, baseada em técnicas de interpolação por splines cúbicas, mostrou-se eficaz para reproduzir o comportamento dinâmico da máquina com boa acurácia, mesmo frente a variações amplas de velocidade, carga e tensão de excitação.

A robustez da abordagem foi evidenciada pelos resultados experimentais apresentados, os quais indicaram baixos erros percentuais médios absolutos (MAPE) para a estimativa do conjugado, da potência e do rendimento da máquina, em diferentes regimes de operação. Adicionalmente, a implementação do estimador em uma plataforma de instrumentação virtual permitiu a obtenção de respostas em tempo real, com baixo custo computacional, tornando a solução viável para aplicações em sistemas embarcados de desempenho limitado.

Entretanto, algumas limitações intrínsecas ao método devem ser consideradas. O desempenho do estimador está diretamente relacionado à qualidade da modelagem inicial da superfície de indutância; imprecisões na aquisição de dados experimentais ou na parametrização da máquina podem comprometer a precisão das grandezas estimadas. Além disso, o modelo desenvolvido é válido apenas dentro da faixa de corrente e de posição angular mapeadas na geração da superfície de referência. Nos resultados apresentados, a superfície foi construída considerando o intervalo de corrente de 1 A a 40 A. Correntes superiores a este limite extrapolam a região de validade da modelagem, resultando em degradação da precisão da estimativa. Dessa forma, é fundamental o conhecimento prévio

dos limites operacionais da máquina para que a superfície de referência seja construída de maneira adequada e compatível com a aplicação.

Outro ponto a ser considerado é que, embora a abordagem baseada em splines cúbicas tenha apresentado boa eficiência em termos de processamento, métodos alternativos de interpolação — como funções de base radial (RBF) ou técnicas baseadas em redes neurais artificiais — poderiam ser explorados em trabalhos futuros, visando aumentar a precisão da estimativa, especialmente em regimes fortemente não lineares ou sob condições operacionais extremas.

Em síntese, o método proposto apresenta elevada robustez e boa aplicabilidade para a estimativa em tempo real de grandezas em MRVs, configurando-se como uma alternativa viável para sistemas de controle e monitoramento dinâmico.

7.1.1 Comparação entre Valores Estimados e Medidos

Para validar a precisão do estimador proposto, foi realizada uma comparação entre os valores estimados e os valores medidos sob diferentes condições operacionais da Máquina de Relutância Variável. A análise quantitativa de desempenho utilizou como métrica o Erro Percentual Absoluto Médio (*Mean Absolute Percentage Error* — MAPE).

O MAPE mede a diferença relativa média entre os valores estimados e os valores de referência, expressando essa diferença em termos percentuais. A equação utilizada para o cálculo do MAPE é apresentada a seguir:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100 \quad (92)$$

Onde:

- y_i : Valor medido (experimental ou simulado);
- \hat{y}_i : Valor estimado pelo método proposto;
- n : Número total de pontos de análise.

Os resultados obtidos para o MAPE em cada condição operacional analisada são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados do MAPE (%) para diferentes condições operacionais

Grandeza/Condição	A	B	C	D
Conjugado (Simulação)	1,96%	2,87%	1,71%	2,97%
Conjugado (Experimental)	5,34%	4,61%	3,07%	3,71%
Potência (Simulação)	2,23%	2,91%	1,89%	4,93%
Potência (Experimental)	3,72%	4,00%	3,78%	5,63%
Rendimento (Simulação)	3,03%	2,43%	2,03%	4,32%
Rendimento (Experimental)	2,76%	3,08%	3,78%	6,20%

As condições de teste consideradas são descritas a seguir:

- ❑ **Condição A:** Operação em malha aberta;
- ❑ **Condição B:** Modificação dos ângulos de ativação;
- ❑ **Condição C:** Operação em malha fechada — controle de velocidade;
- ❑ **Condição D:** Operação em malha fechada — controle de conjugado.

Os resultados apresentados na Tabela 8 evidenciam uma excelente correlação entre os valores estimados e os valores medidos, tanto em simulação quanto em ambiente experimental. A análise quantitativa revelou baixos valores de MAPE para as grandezas de conjugado, potência e rendimento em todas as condições de operação analisadas.

Destaca-se a manutenção da precisão do estimador mesmo sob condições dinâmicas de operação, como variações abruptas de carga, modificações nos ângulos de ativação e regimes de velocidade variável. Essa capacidade reforça a robustez e a confiabilidade do modelo proposto, evidenciando sua aplicabilidade prática em cenários críticos que exigem controle em tempo real de MRVs.

Em síntese, os resultados obtidos validam a eficácia da estratégia de estimação desenvolvida, confirmando seu potencial para aplicações industriais que demandam alta precisão no monitoramento e no controle dinâmico de máquinas de relutância variável.

7.1.2 Comparação entre o Uso de Splines Cúbicas e a Consulta Direta em Tabelas

Nesta seção, apresenta-se uma comparação entre o método proposto de estimação, baseado em splines cúbicas, e a consulta direta por meio de tabelas de consulta (*Lookup Tables* — LUTs). O método proposto utiliza uma superfície de indutância modelada via interpolação por splines cúbicas, permitindo a derivação matemática contínua das principais grandezas da máquina: indutância, fluxo magnético, conjugado, potência e eficiência. Essa abordagem gera curvas contínuas com derivadas contínuas em todo o domínio de corrente e posição angular, possibilitando o cálculo preciso e eficiente dessas variáveis em tempo real.

Por outro lado, o método tradicional de consulta direta baseia-se na leitura de uma superfície discretizada representando o conjugado. A utilização direta da superfície de indutância neste contexto implicaria elevada complexidade para a obtenção das derivadas necessárias, devido à natureza discreta dos dados. Pequenos ruídos ou oscilações locais na superfície de referência podem provocar erros significativos nas derivadas numéricas, tornando a obtenção de grandezas que dependam da derivada da indutância, como o conjugado, potência e rendimento, altamente imprecisa. Dessa forma, para viabilizar a comparação prática, nas análises a seguir optou-se pela utilização de uma tabela de

consulta contendo apenas os valores de conjugado em função da corrente e da posição angular.

Essa limitação evidencia uma vantagem adicional do método proposto: além de estimar o conjugado com alta precisão, a abordagem baseada em splines cúbicas é capaz de estimar diretamente outras grandezas fundamentais, como a indutância, o fluxo magnético, a potência e o rendimento, ampliando sua aplicabilidade em sistemas de controle e monitoramento avançados.

Foram avaliados cinco cenários distintos, conforme descrito a seguir:

- ❑ **Cenário 1:** LUT com resolução de 1 A e 1°;
- ❑ **Cenário 2:** LUT com resolução de 0,5 A e 0,5°;
- ❑ **Cenário 3:** LUT com resolução de 0,25 A e 0,25°;
- ❑ **Cenário 4:** LUT com resolução de 0,125 A e 0,125°;
- ❑ **Cenário 5:** Método proposto com splines cúbicas (modelo de Lagrange), proporcionando resolução contínua em corrente e posição angular.

A Tabela 9 apresenta um resumo dos resultados obtidos para cada cenário.

Tabela 9 – Comparação entre os cenários avaliados.

Cenário	¹ Armazenamento	² Tempo (μs)	Viabilidade	Resolução
1	19,2 kB	8,63	Sim	1 unidade
2	76,8 kB	10,83	³ Não	0,5 unidade
3	307,2 kB	15,08	Não	0,25 unidade
4	1,2288 MB	23,60	Não	0,125 unidade
5	512 bytes	6,27	Sim	Contínua

¹ Armazenamento necessário exclusivamente para as tabelas embarcadas.

² Tempo de execução relativo à leitura das entradas analógicas/digitais, acesso às tabelas e processamento das grandezas conjugado, potência e eficiência. O tempo total de execução do sistema, incluindo estratégias de controle e atuação, não está contemplado.

³ Impossibilidade de armazenamento integral na memória RAM, demandando carregamento parcial e comprometendo o desempenho.

Analizando a Tabela 9, observa-se que os cenários 2, 3 e 4 tornaram-se inviáveis para aplicações em tempo real, principalmente devido ao elevado consumo de memória e ao aumento do tempo de processamento. Assim, uma comparação direta foi realizada entre os cenários 1 (LUT tradicional) e 5 (splines cúbicas).

❑ **Cenário 1 — Consulta Direta via LUT:**

- ↓ **Armazenamento:** Tabela 60×40 (19,2 kB); embora compatível com a capacidade de RAM, reduz significativamente o espaço disponível para o restante do código de controle da SRM.

- ↓ **Performance:** Tempo de execução de 8,63 µs, com operações de leitura e interpolação linear simples.
- ↑ **Complexidade:** Implementação relativamente simples, com baixo custo de desenvolvimento e manutenção do código.
- ↓ **Conclusão:** Método prático, porém com limitações de resolução (1 A e 1°) e elevado consumo de memória, o que restringe a escalabilidade de aplicações mais complexas.

□ **Cenário 5 — Método Proposto com Splines Cúbicas:**

- ↑ **Armazenamento:** Quatro tabelas 4×4 (total de 512 bytes), representando um consumo de memória extremamente reduzido.
- ↑ **Performance:** Tempo de execução de 6,27 µs, com cálculos adicionais devido à avaliação dos polinômios.
- ↓ **Complexidade:** Implementação mais sofisticada, exigindo cálculo prévio dos coeficientes dos polinômios de spline para cada célula da matriz de interpolação.
- ↑ **Conclusão:** Oferece melhor desempenho, uso eficiente da memória e resolução contínua sem a necessidade de aumentar a dimensão das tabelas, sendo altamente indicado para aplicações de alto desempenho em tempo real.

7.2 Conclusão

Os resultados obtidos demonstram que o método baseado em splines cúbicas proporciona vantagens significativas em termos de eficiência de memória, desempenho de execução e flexibilidade na estimação de grandezas. Embora a sua implementação inicial seja mais complexa, essa abordagem é justificada em sistemas que exigem alta precisão, operação contínua e uso otimizado de recursos computacionais.

Além disso, a possibilidade de derivação contínua das grandezas amplia o potencial de aplicação do método em estratégias de controle mais sofisticadas, como maximização de torque, rastreamento de pontos ótimos de operação ou controle direto de fluxo magnético, reforçando o valor da solução desenvolvida para cenários industriais e embarcados de alta exigência técnica.

CAPÍTULO 8

Considerações Finais

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma metodologia para estimar o conjugado eletromagnético em tempo real em Máquinas a Relutância Variável, a partir da modelagem da indutância instantânea da máquina. A proposta foi fundamentada na construção de uma superfície geométrica da indutância em função da posição angular do rotor e da corrente elétrica, modelada por polinômios interpoladores de terceira ordem, com o objetivo de permitir a estimação precisa e eficiente das principais grandezas eletromagnéticas da MRV.

O método proposto demonstrou ser capaz de operar em tempo real, mesmo em dispositivos de baixo desempenho computacional, devido à sua estrutura matemática simplificada e à utilização de equações analíticas deriváveis. Através da modelagem da superfície de indutância, foi possível obter estimativas consistentes para o conjugado eletromagnético, fluxo magnético, potência e rendimento da máquina, com baixos erros percentuais em diferentes condições de operação.

A validação da metodologia foi conduzida em duas frentes: simulações computacionais e ensaios experimentais. As simulações permitiram analisar o comportamento do estimador sob condições controladas, enquanto os ensaios em plataforma experimental permitiram avaliar o desempenho do método frente às variabilidades naturais dos sistemas físicos, como ruídos, imprecisões de sensores e não idealidades do acionamento. Em ambos os casos, os resultados mostraram forte aderência entre os valores estimados e medidos, confirmando a eficácia da metodologia.

Entre as principais contribuições deste trabalho, destacam-se:

- ❑ A proposta de um modelo compacto e eficiente para o cálculo da indutância instantânea em MRVs;
- ❑ A implementação de um estimador de conjugado eletromagnético de baixo custo computacional e alta precisão;
- ❑ A validação experimental em uma plataforma real de acionamento de MRV;

- O suporte ao desenvolvimento de sistemas de controle de conjugado baseados em estimativas em tempo real.

O conjunto de resultados obtidos demonstra o potencial da metodologia proposta para aplicações práticas em sistemas de controle de MRVs, particularmente em áreas como veículos elétricos, geração distribuída e acionamentos industriais. Além disso, este trabalho abre caminho para futuras pesquisas voltadas à aplicação do estimador em estratégias de controle mais avançadas, como controle direto de conjugado, otimização de eficiência energética e operação robusta em ambientes adversos.

Conclui-se, portanto, que a metodologia desenvolvida atende aos objetivos propostos no início desta pesquisa e contribui de forma relevante para o avanço do estado da arte no campo da modelagem, instrumentação e controle de Máquinas a Relutância Variável.

8.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

Com base nos resultados e nas limitações observadas ao longo deste trabalho, algumas direções de pesquisa futura podem ser sugeridas, visando aprimorar e expandir a aplicação da metodologia desenvolvida:

- **Aplicação em estratégias de minimização do ripple de conjugado:** Investigar a utilização do método de estimação proposto em técnicas de suavização e redução do ripple do conjugado eletromagnético, a fim de melhorar o desempenho dinâmico da Máquina a Relutância Variável, especialmente em baixas velocidades.
- **Aplicação em sistemas de tração elétrica:** Adaptar e validar o estimador em sistemas de tração de veículos elétricos, considerando condições operacionais variáveis, ciclos de carga dinâmicos e a necessidade de alta eficiência e robustez em aplicações automotivas.
- **Integração com estratégias de maximização de conjugado:** Integrar o método de estimação a estratégias de maximização do conjugado instantâneo da MRV, bem como no rastreamento de pontos ótimos de operação, de modo a otimizar a relação entre eficiência, potência e desempenho.
- **Desenvolvimento de versões adaptativas do estimador:** Investigar a possibilidade de criação de versões adaptativas do estimador, capazes de ajustar automaticamente seus parâmetros frente a variações de temperatura, saturação magnética ou envelhecimento da máquina.
- **Implementação em controladores de alto desempenho:** Avaliar a integração do estimador em controladores avançados de tempo real, como MPC (Model Predictive Control) e técnicas baseadas em aprendizado de máquina (Machine Learning) para predição e compensação de efeitos dinâmicos não modelados.

- ❑ **Expansão para outras topologias de MRV:** Aplicar e adaptar a metodologia para máquinas com outras configurações (por exemplo, topologias 10/8 ou 12/8) e em MRVs lineares, considerando as particularidades geométricas e magnéticas de cada projeto.
- ❑ **Análise em condições de falha:** Avaliar o desempenho do estimador sob condições de falha, como curto-círcuito de fase, falhas em sensores ou degradação de componentes, visando ampliar sua robustez em aplicações críticas.
- ❑ **Estudo e desenvolvimento de projetos de MRVs:** Aplicação da metodologia apresentada no capítulo 3 em técnicas de projetos e otimização da Máquina a Relutância Variável, possibilitando avaliar em tempo real os parâmetros de projetos e seu impacto na performance da máquina projetada.

8.2 Contribuições em Produção Bibliográfica

- ❑ ★ Fidelis, Ricardo T; Viajante, Ghunter P., Chaves, Eric N., Tavares, Carlor E., Silveira, Augusto W. F. V., Gomes, Luciano C., Torque Estimation in Switched Reluctance Machines: A Comprehensive Approach Involving Inductance Modelling Techniques; IEEE ACCESS, Abr 2025.
- ❑ Fidelis, Ricardo T; Faria, Victor H. da Cunha; Viajante, Ghunter P; Chaver, Eric N.; Oliveira, Marcelo E.; Gomes, Luciano, C., Virtual Instrumentation and Torque Estimator for the drive and control of the Switched reluctance machine; EEEIC 2023, Int. Conference on Environment and Electrical Engineering, jun 2023.
- ❑ Fidelis, Ricardo T. ; Faria, Victor H. C.; Filho, Marcos J. M.; Viajante, Ghunter P.; Nery, Eric C.; Silveira, Augusto W. F. V.; Gomes, Luciano C.; A new inductance estimator based on Lagrange Form polynomials for real-time switched reluctance machine control. RESEARCH, SOCIETY AND DEVELOPMENT, v. 11, p. e30911528358, 2022
- ❑ Faria, Victor H. C.; Gomes, Luciano C.; Fidelis, Ricardo T.; Moraes Filho, Marcos José de ; Costa, Ana C. M.; Machado, Gustavo O.; Desenvolvimento de uma Plataforma de Instrumentação Virtual para um MRV 8/6. RESEARCH, SOCIETY AND DEVELOPMENT, v. 11, p. e13411326114, 2022.
- ❑ Machado, G. O; Fidelis, Ricardo T.; Moraes Filho, Marcos José de ; Viajante, Ghunter P.; Silveira, Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da ; GOMES, LUCIANO COUTINHO . Projeto otimizado e análise por elementos finitos de um motor a relutância variável 8/6 tetrafásico. RESEARCH, SOCIETY AND DEVELOPMENT, v. 11, p. e23411225681, 2022.

- Viajante, G. P.; Chaves, Eric N. ; Miranda, Luis C.; Freitas, M. A.; Queiroz, C. A.; Santos, Josemar A.; Gomes, Luciano C.; Fidelis, Ricardo T. Design and Implementation of a Fuzzy Control System Applied to a 6×4 SRG. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, v. 57, p. 528-536, 2021.

APÊNDICE A

Código Fonte dos Algoritmos Desenvolvidos

A.1 Obtenção dos Coeficientes Utilizando Splines Cúbicas no Modelo de Lagrange

Arquivo splineCubica.m

```

1 function [ resultado ] = spline_cubica( x , y )
2 %Determina os coeficiente a partir de um conjunto de pontos de
   entrada
3 %O conjunto de pontos e arbitrario, sem limite maximo ou minimo
   de pontos,
4 %aconselha-se escolher o menor numero de pontos necessarios a
   reproduzir o comportamento da curva
5 %Esse codigo utiliza toolbox simbolic do Matlab
6 %%Limpeza das variaveis no ambiente Matlab
7 clear h; %limpa as variaveis, caso ja existam no ambiente
8 clear a; %limpa as variaveis, caso ja existam no ambiente
9 clear b; %limpa as variaveis, caso ja existam no ambiente
10
11 for i=1:length(x)-1
12 h(i) = x(i+1)-x(i);
13 end
14 for i=1:length(x)-2
15 a(i,i) = h(i);
16 a(i,i+1)= 2*(h(i)+h(i+1));
17 a(i,i+2)= h(i+1);
18 b(i) = 6*(((y(i+2)-y(i+1))/h(i+1))-((y(i+1)-y(i))/(h(i))));
19 end

```

```

20 a(:,1)=[];
21 a(:,length(x)-1)=[] ;
22 c=a\b';
23 c=[0;c;0];
24 syms X;
25 for i=1:length(x)-1
26 a1=c(i); a2=c(i+1); h1=h(i); y1=y(i); y2=y(i+1);x1=x(i);x2=x(i+1)
27 ;
28 r=((a1)/(6*h1));
29 r=r*((x2-X)^3);
30 s=((a2)/(6*h1));
31 s=s*((X-x1)^3);
32 t=(y1/h1 - (a1*h1/6));
33 t=t*(x2-X);
34 u=(y2/h1 - (a2*h1/6));
35 u=u*(X-x1);
36 polinomio=vpa(simplify(collect(r+s+t+u)),5));
37 % pretty((vpa(simplify(collect(r+s+t+u)),5)))
38 resultado(i,:)= [x(i) x(i+1) coeffs(polinomio)];
39 end
40 % resultado
41 sucesso=1;
42 end

```

Arquivo Poliômios.m

```

1
2 function [ppi ppt curva Perfil_Corrente Perfil_Angulo Erro pt Pi
] =Polinomios(CurvaFEM,AnguloInicial,AnguloFinal,
CorrenteInicial, CorrenteFinal, PontosAngulo, PontosCorrente)
3 [Perfil_Corrente Perfil_Angulo CurvaPrincipal Erro] = extrairBase
(CurvaFEM);
4 for i=1:length(PontosAngulo)
5 pt(i) = interp1([1:60]*pi/180,Perfil_Angulo,PontosAngulo(i),'
spline');
6 end
7 for i=1:length(PontosCorrente)
8 Pi(i)=interp1([1:40],Perfil_Corrente,PontosCorrente(i),'spline');
9 end
10 Pi(i+1) = 0; PontosCorrente(i+1)=PontosCorrente(i)*2;
11 ppi=spline_cubica(PontosCorrente,Pi);
12 ppt=spline_cubica(PontosAngulo,pt);
13 curva=recomporCurva(ppi,ppt,CorrenteInicial,CorrenteFinal,

```

```

    AnguloInicial ,AnguloFinal);
14 end

```

Arquivo RecomporCurva.m

```

1 function [curva] =recomporCurva(ppi,ppt,mini , maxi , mint , maxt)
2 %Reconstroi as curvas a partir dos coeficientes
3 format long
4 [a b]=size(ppt); %Descobre o tamanho do vetor de coeficientes
5 ppt=double(ppt);ppi=double(ppi); %Converte as variaveis
   simbolicas para double
6 for t=mint:maxt
7 angulo=t*pi/180; %converte o angulo para radiano
8 for i=1:a
9 if (angulo>=ppt(i,1) && angulo<=ppt(i,2))
10 coeficientes_angulo = [ppt(i,3) ppt(i,4) ppt(i,5) ppt(i,6)];
11 Vetor_angulos = [1 angulo , angulo^2, angulo^3];
12 propriaTeta(t) = dot(Vetor_angulos,coeficientes_angulo);
13 end
14 end
15 end
16 [a b] =size(ppi);
17 for t=mini:maxi
18 for i=1:a
19 if (t>=ppi(i,1) && t<=ppi(i,2))
20 coeficientes_corrente = [ppi(i,3) ppi(i,4) ppi(i,5) ppi(i,6)];
21 Vetor_corrente = [1 t , t^2, t^3];
22 propriaI(t) = dot(coeficientes_corrente,Vetor_corrente);
23 end
24 end
25 end
26 for i=1:length(propriaTeta)
27 PROPRIA(i,:)= propriaI.*propriaTeta(i);
28 end
29 curva = PROPRIA;
30 format short
31 end

```

Arquivo ExtrairBase.m

```

1 function [ CURVA_BASE CURVA_PRINCIPAL MATRIZ_PRINCIPAL
2          MATRIZ_RESIDUAL ] = extrairBase( MATRIZ_ORIGINAL )
%Separa a matriz original em curvas para modelagem
   posterior

```

```

3      [a , b] = size (MATRIZ_ORIGINAL);
4      for i=1:b
5          CURVA_BASE(i) = max(MATRIZ_ORIGINAL(:,i));
6          MATRIZ_ORIGINAL(:,i) = MATRIZ_ORIGINAL(:,i)/CURVA_BASE(i)
7              ;
8      end
9      %curva PRINCIPAL
10     CURVA_PRINCIPAL = MATRIZ_ORIGINAL(:,1);
11     for i=1:b
12         MATRIZ_PRINCIPAL(:,i) = CURVA_PRINCIPAL;
13     end
14     MATRIZ_RESIDUAL = MATRIZ_ORIGINAL - MATRIZ_PRINCIPAL;
15 end

```

A.2 Estimador Implementado na Simulação (Simulink - bloco MATLAB FCN)

```

1      function [indutancia,derivada,conjogado_fase,
2          conjogado_total, fluxo] = fcn(angulo, corrente, opcao,
3          velocidade, Potencia_entrada)
4
5          x =1; %Ajuste entre as referencias de angulo do estimador
6              e da simulacao
7          [a1, b1, c1, d1] = teste(angulo(1)+x, corrente(1),opcao);
8          [a2, b2, c2, d2] = teste(angulo(2)+x, corrente(2),opcao);
9          [a3, b3, c3, d3] = teste(angulo(3)+x, corrente(3),opcao);
10         [a4, b4, c4, d4] = teste(angulo(4)+x, corrente(4),opcao);
11         indutancia = [a1 ;a2 ;a3 ;a4];
12         derivada = [b1 ;b2 ;b3 ;b4];
13         conjogado_fase = [c1 ;c2 ;c3 ;c4];
14         conjogado_total = (c1+c2+c3+c4);
15         fluxo = [d1 ;d2 ;d3 ;d4];
16     end
17
18
19     function [indutancia,derivada,conjogado, fluxo] = teste(
20         angulo, corrente,opcao)
21     angulo=mod(angulo+30,60);% Corrigir a entrada de angulo
22     % Estimador considera alinhamento em 30 graus
23     % Simulacao considera alinhamento em 60 graus
24     %%Definicao de limites

```

```

20 corrente_minima=0;
21 corrente_maxima=40;
22 angulo_minimo=0;
23 angulo_maxima=60;
24 if (corrente<corrente_minima)
25 corrente=abs(corrente);
26 end
27 if (corrente>corrente_maxima)
28 corrente=corrente_maxima;
29 end
30 if (angulo<angulo_minimo)
31 angulo=angulo_minimo;
32 end
33 if (angulo>angulo_maxima)
34 angulo=angulo_maxima;
35 end
36 %-----%
37
38 A = zeros(1,4); B=A;C=A;D=A; %Inicializacao das variaveis
39 com valor zero
40 if (opcao <=1)
41 angulo = angulo*0.017453292520;A=[0 0 0 0]; B = [0 0 0
42 0]; C=[0 0 0 0]; D=[0 0 0 0];
43 if((angulo< 0.087266462600 )&&(angulo>= 0.017453292520
44 ))
45 A= [52.181180903033 -2.732200243010 -0.089633757070
46 0.076411307449]; C= [52.181180903033 -2.732200243010
47 -0.089633757070 0.076411307449];
48 elseif((angulo< 0.261799387799 )&&(angulo>=
0.087266462600 ))
49 A= [-21.182095411943 16.474260583189 -1.765713652432
50 0.125166495283]; C= [-21.182095411943 16.474260583189
51 -1.765713652432 0.125166495283];
52 elseif((angulo< 0.436332312999 )&&(angulo>=
0.261799387799 ))
53 A= [0.502640559490 -0.556891222531 2.693031463820
54 -0.263932418646]; C= [0.502640559490 -0.556891222531
55 2.693031463820 -0.263932418646];
56 elseif((angulo< 0.523598775598 )&&(angulo>=
0.436332312999 ))
57 A= [-98.227806825584 128.680962190207 -53.697620042731
58 7.937755382471]; C= [-98.227806825584 128.680962190207
59

```

```

        -53.697620042731 7.937755382471];
49  elseif((angulo< 0.610865238198 )&&(angulo>=
      0.523598775598 ))
50  A= [89.181696095533 -165.701196604728 100.440517860261
      -18.964424710532]; C= [89.181696095533
      -165.701196604728 100.440517860261 -18.964424710532];
51  elseif((angulo< 0.785398163397 )&&(angulo>=
      0.610865238198 ))
52  A= [2.896300211229 -7.574949875108 3.846690486433
      0.704179078526]; C= [2.896300211229 -7.574949875108
      3.846690486433 0.704179078526];
53  elseif((angulo< 0.959931088597 )&&(angulo>=
      0.785398163397 ))
54  A= [23.369618615976 -55.814069896325 41.733606755006
      -9.214592406184]; C= [23.369618615976 -55.814069896325
      41.733606755006 -9.214592406184];
55  elseif((angulo< 1.047197551197 )&&(angulo>=
      0.959931088597 ))
56  A= [-43.871761941882 137.827205016656 -144.148673069489
      50.263467334742]; C= [-43.871761941882 137.827205016656
      -144.148673069489 50.263467334742];
57  end
58  if((corrente< 5.00 ))%&(corrente>= 1.00 )
59  B = [-0.000024641752 0.000073925255 0.000623109043
      0.026217556341]; D = [0.000007412817 -0.000022238452
      -0.000128902682 0.000143728316];
60  elseif((corrente< 10.00 )&&(corrente>= 5.00 ))
61  B = [0.000024636888 -0.000665254343 0.004319007032
      0.020057726359]; D = [-0.000007670799 0.000204015787
      -0.001260173875 0.002029180304];
62  elseif((corrente< 30.00 )&&(corrente>= 10.00 ))
63  B = [-0.000001284976 0.000112401582 -0.003457552220
      0.045979590533]; D = [0.000000569168 -0.000043183208
      0.001211816071 -0.006210786181];
64  elseif((corrente< 40.00 )&&(corrente>= 30.00 ))
65  B = [0.000000151307 -0.000016863918 0.000420412787
      0.007199940467]; D = [-0.000000268063 0.000032167577
      -0.001048707476 0.016394449294];
66  elseif((corrente< 80.00 )&&(corrente>= 40.00 ))
67  B = [-0.000000010775 0.000002585928 -0.000357581034
      0.017573191411]; D = [-0.000000000000 0.000000000000
      -0.000000000000 0.000000000000];

```

```
68 end
69 end
70 k1=1;k2=1;k3=1;k4=1; %fator de correcao para ajuste
71 cor = [corrente^3 corrente^2 corrente 1]; %Vetor Corrente
72 Dang = [3*angulo^2 2*angulo 1 0]; %Vetor para Derivada
    do angulo
73 ang = [angulo^3 angulo^2 angulo 1]; %Vetor para o Angulo
74 indutancia = dot(A,ang).*dot(B,cor) + dot(C,ang).*dot(D,
    cor);
75 fluxo = indutancia.*corrente;
76 derivada = dot(k1*A,Dang).*dot(k2*B,cor) + dot(k3*C,Dang)
    .*dot(k4*D,cor);
77 conjugado = 0.5*corrente*corrente*derivada;
78 end
```

Referências

- ANDRADE, D.; KRISHNAN, R. Characterization of switched reluctance machine using fourier series approach. **IEEE Industry Applications Society**, 2001.
- ARKADAN, A. A.; KIELGAS, B. W. Switched reluctance motor drive systems dynamic performance prediction and experimental verification. **IEEE Transaction on energy Conversion**, v. 9, n. 1, p. 36–44, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/3456207>
- BABITHA, S.; PADMASHREE, V. K.; JYOTHI, K. P. Vector control based speed and flux estimation in switched reluctance motor using ann controller. **4th International Conference on Recent Trends on Electronics, Information, Communication and Technology (RTEICT-2019)**., 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/RTEICT46194.2019.9016823>
- BERNADELI, V. **Controle de conjugado em motores a relutância variável**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14383>>. Acesso em: 20/08/2022.
- BILGIN, B.; JIANG, J. W.; EMADI, A. **Switched Reluctance Motor Drives - Fundamentals to Applications**. [S.l.]: CRC Press, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9780203729991>
- CHANG, Y.-C.; LIAW, C. M. Establishment of a switched reluctance generator based common dc micro grid system. **Journal IEEE**, 2005.
- DIAS, R. J. **Motores a relutância Variável 6x4 e 6x6. Estudo comparativo de operação e desempenho**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- FANG, G. Advanced control of switched reluctance motors (srms): A review on current regulation, torque control and vibration suppression. **IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society**, v. 2, p. 280–301, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/OJIES.2021.3076807>
- FARIA, V. H. d. C. et al. Development of a virtual instrumentation platform for an 8/6 srm. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, p. e13411326114, Feb. 2022. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/26114>>.

FARIA, V. H. da C. **Desenvolvimento de Plataforma de Instrumentação Virtual para o Acionamento, Controle e Monitoramento de um Motor a Relutância Variável 8/6.** Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2022.

FERREIRA, C. et al. Design and implementation of a five horsepower switched reluctance, fuel-lube, pump motor drive for a gas turbine engine. **Proceedings of 1994 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - ASPEC'94**, p. 56–62 vol.1, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/APEC.1994.316419>

FIDELIS, R. T. **Modelagem Matemática e Sistema Embocado em DSP/FPGA para acionamento e controle de um GRV8/6 com estimativa em tempo real das curvas de indutância e conjugado.** Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/22335/5/ModelagemMatematicaSistema.pdf>>. Acesso em: 28/08/2022.

FIDELIS, R. T. et al. A new inductance estimator based on lagrange form polynomials for real-time switched reluctance machine control. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 5, p. e30911528358, Apr. 2022. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/28358>>.

_____. Proposal of a test bench for switched reluctance machine 8/6 for wind energy application. **Renewable Energy and Power Quality Journal**, v. 1, n. 2., 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.24084/repqj16.359>

FILHO, M. J. de M. **Desenvolvimento de plataforma de acionamento digital para motor a relutância variável 8/6.** Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/19237>>. Acesso em: 26/08/2013.

GILAT, A. **Métodos Numéricos para Engenheiros e Cientistas.** [S.l.]: Bookman, 2008.

HIEU, P. T.; LEE, D. H.; AHN, J. W. Design of 2-phase 4/2 srm for torque ripple reduction. In: **20th International Conference on Electrical Machines and Systems.** [S.l.: s.n.], 2017. p. 11–14. Disponível em: <https://doi.org/10.12968/sece.2017.14.11>

HUISAIN, I.; ISLAM, M. S. Design, modeling and simulation of an electric vehicle system. **SAE Technical Paper Series**, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/1999-01-1149>

J, C.; LIU, Z. An unsaturated inductance reconstruction based universal sensorless starting control scheme for srm drives. **IEEE Transactions on Industry Electronics**, 2020.

KACHAPORNKUL, S. et al. Performance improvement of a switched reluctance motor and drive system designed for an electric motorcycle. **Energies - MDPI**, n. 15, p. 694, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15030694>

KAEWTHAI, S.; KITTIRATSATCHA, S. A torque estimation method for a switched reluctance machine. **2005 International Conference on Power**

Electronics and Drives Systems, v. 2, p. 1135–1139, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/PEDS.2005.1619858>

KIM, J.; LAI, J.-S. Dsp-based switched reluctance motor incremental inductance measurement through current loop. **10th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.23919/ICPE2019-ECCEAsia42246.2019.8797072>

KRISHNAM, R. **Switched Reluctance Motor drives, Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications**. [S.l.]: Boca Raton, 2001. ISBN ISBN 0-8493-0838-0.

KUCUK, F. et al. Artificial neural network based torque calculation of switched reluctance motor without locking the. **Journal of applied physics**, v. 105, n. 7, p. 07–103, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.3062962>

KUSHWAHA, A.; KANAGARA, R. Peak-current estimation using simplified current-rise model of switched reluctance generator operating in single-pulse mode. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems.**, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105971>

LE-HUY, H.; BRUNELLE, P. Design and implementation of a switched reluctance motor generic model for simulink simpowersystems. **Electric machines converters and systems Conference**, 2005.

LEBSIR, A. State of the art. 4th international conference on power engineering, energy and electrical drives. In: **4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives**. [S.l.: s.n.], 2013.

LOPES, V. J. S. **Instrumentação Virtual aplicada ao ensino experimental de engenharia elétrica**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

MACHADO, G. d. O. et al. Optimized design and finite element analysis of a four-phase 8/6 switched reluctance motor. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, p. e23411225681, Jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i2.25681>.

MAMEDE, A. C. F. **Modelagem Pseudoinversa e Análise de efeitos dos parâmetros no desempenho da máquina de relutância variável 6/4 e 8/6**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/31567/2/ModelagemPseudoinversaAn%C3%A1lise.pdf>>. Acesso em: 28/08/2022.

MANOLAS, I. S.; KLADAS, A. G.; MANIAS, S. N. Finite-element-based estimator for high-performance switched reluctance machine drives. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 45, n. 3, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2034569>

MARK, C. **18/12 Switched Reluctance motor design for a mild-hybrid electric powertrain application**. Tese (Doutorado) — McMaster Univesity, 2020.

MATWANKAR, C. S.; PRAMANICK, S.; SINGH, B. Flux-linkage characterization and rotor position estimation of switched reluctance motor using bézier curves. **2nd International Conference on Smart Technologies for power, energy and Control**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/STPEC52385.2021.9718708>

PINTO, D. et al. Combined signal-injection and flux-linkage approach for sensorless control of switched reluctance machine. **IEEE**, 2016.

POMING, Z.; QISHUANG, M.; PING, X. Magnetic field calculation of switched reluctance machines using an improved conformal mapping method. In: **2020 IEEE 19th Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–4. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/CEFC46938.2020.9451364>

PYRHONEN, J.; JOKINEN, T.; HRABOVCOVA, V. **Design of Rotatins Electrical Machines**. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2014.

RADUN, A. High-power density switched reluctance motor drive for aerospace applications. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 28, n. 1, p. 113–119, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/28.120219>

RAHMAN, K. et al. Advantages of switched reluctance motor applications to ev and hev: design and control issues. **Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (Cat. No.98CH36242)**, v. 1, p. 327–334 vol.1, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IAS.1998.732314>

RAHMAN, K.; SCHULZ, S. Design of high-efficiency and high-torque-density switched reluctance motor for vehicle propulsion. **IEEE Transaction on Industry Applications**, v. 38, n. 6, p. 1500–1507, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TIA.2002.805571>

REIS, M. R. da C. **Técnicas de acionamento e controle ótimo aplicado ao motor a relutância chaveado para maximizar o rendimento**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Goiás, 2020.

SAHOO, S.; PANDA, S.; XU, J. Piece-wise polynomial based model for switched reluctance machine motor. **IEEE Power and Energy Society**, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596253>

SAWATA, T. et al. Fault-tolerant operation of single phase sr generator. **IEEE Transaction on Industry Applications.**, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/28.777184>

SILVEIRA, A. F. V. da. **Modelagem, Construção, Testes e Análise de Desempenho de um Gerador a Relutância Chaveado**. Tese, 2008.

SONG, S. et al. Unsaturated-inductance-based instantaneous torque online estimation of switched reluctance machine with locally linearized energy conversion loop. **IEEE Transaction on Industrial Electronics**, Vol. 65, No. 8., 2021.

UEMATSU, T.; WALLACE, R. Design of a 100 kw switched reluctance motor for electric vehicle propulsion. **Proceedings of 1995 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC'95**, v. 1, p. 411–415 vol.1, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/APEC.1995.468981>

UYDAL, A. et al. Fuzzy proportional-integral speed control of switched reluctance motor with matlab/simulink and programmable logic controller communicatio. **Measurement and Control**, v. 52, p. 1137–1144, 2019.

VELMURUGAN, G.; YEOH, S. S.; BOZHKO, T. Y. Piecewise modelling approach for specific switched reluctance machines. **2019 International Conference on Electrotechnical Complexes ans Systems**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0020294019858188>

VIAJANTE, G. P. **Gerador a relutância variável em conexão com a rede elétrica para injeção de potência ativa.** Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14329>>. Acesso em: 26/08/2022.

VIAJANTE, G. P. et al. Design and implementation of a fuzzy control system applied to a 6x4 srg. In: **2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / ICPS Europe)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.

WAIDE, P.; BRUNNER, C. U. Energy-efficiency policy opportunitiesfor electric motor-driven systems. **International Energy Agency Working Paper**, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2019.8783645>

WANG, a. a. Q. Inductance estimation method for linear switched reluctance machines considering iron loses. **IET Electric Power Applications**, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2015.0318>

XUE, X. D. et al. Multi-objective optimization design of in-wheel switched reluctance motors in electric vehicles. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 57, n. 9, p. 2980–2987, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2051390>

YU, Z. et al. A phase current sampling strategy for multiphase switched reluctance machines by pulses injection and multi-frequency pluse auxiliary. **2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)**, p. 1–5, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2019.8921922>

ZAHARIA, M. V. **Contributions to the study of switched reluctance machine for automotive integrated starter-alternator application.** Tese (Doutorado) — Ecole Centrale de Lille, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2016.7732734>