

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA DE INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL
PARA O ACIONAMENTO, CONTROLE E MONITORAMENTO DE UM MOTOR A
RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6**

VICTOR HENRIQUE DA CUNHA FARIA

UBERLÂNDIA

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA DE INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL
PARA O ACIONAMENTO, CONTROLE E MONITORAMENTO DE UM MOTOR A
RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6**

Dissertação apresentada por **Victor Henrique da Cunha Faria** à Universidade Federal de Uberlândia para a **obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica** em 16/09/2022 na presença da banca examinadora, composta por:

Prof. **Luciano Coutinho Gomes**, Dr. (UFU) – Orientador

Prof. Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira, Dr. (UFU)

Prof. Marcio Luiz Magri Kimpara, Dr. (UFMS)

Prof. Pedro José dos Santos Neto, Dr. (UFU)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

F224d
2022 Faria, Victor Henrique da Cunha, 1997-
Desenvolvimento de plataforma de instrumentação virtual para o acionamento, controle e monitoramento de um motor a relutância variável 8/6 [recurso eletrônico] / Victor Henrique da Cunha Faria. - 2022.

Orientador: Luciano Coutinho Gomes.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.5346>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia elétrica. I. Gomes, Luciano Coutinho, 1972-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Glória Aparecida
Bibliotecária - CRB-6/2047



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 - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 782, PPGEELT				
Data:	dezesesseis de setembro de dois mil e vinte e dois	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	11:30
Matrícula do Discente:	12012EEL012				
Nome do Discente:	Victor Henrique da Cunha Faria				
Título do Trabalho:	Desenvolvimento de plataforma de instrumentação virtual para acionamento, controle e monitoramento de um Motor à Relutância Variável 8/6				
Área de concentração:	Sistemas de Energia				
Linha de pesquisa:	Máquinas e Aterramentos Elétricos				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Luciano Coutinho Gomes Título do projeto: Monitoramento, controle e diagnóstico em tempo real de máquinas a relutância variável como motor/gerador em ambientes de velocidades variáveis Número do processo na instituição executora: Nenhum Agência financiadora: Projeto sem financiamento externo Número do processo na agência financiadora: Projeto sem financiamento externo Vigência do projeto: Início: 01/03/2019 – Fim: Em aberto				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira - FEELT/UFU; Pedro José dos Santos Neto - FEELT/UFU; Marcio Luiz Magri Kimpara - UFMS; Luciano Coutinho Gomes - FEELT/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, 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 Mestre.

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 16/09/2022, às 11:06, 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 **Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 16/09/2022, às 11:06, 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 **Pedro José dos Santos Neto, Professor(a) do Magistério Superior**, em 16/09/2022, às 11:06, 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 **Marcio Luiz Magri Kimpara, Usuário Externo**, em 16/09/2022, às 11:11, 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 **3924825** e o código CRC **E16BB01A**.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA DE INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL
PARA O ACIONAMENTO, CONTROLE E MONITORAMENTO DE UM MOTOR A
RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR VICTOR HENRIQUE DA CUNHA FARIA À
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCIANO COUTINHO GOMES, Dr.

Orientador

LUIZ CARLOS GOMES DE FREITAS, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-graduação *stricto sensu* em Engenharia Elétrica da UFU

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Clésio de Assis Faria e Cleide Chagas da Cunha Faria, que em todo tempo me apoiaram e deram ânimo, a quem devo tudo que sou. À minha irmã, Izadora Cunha Faria, pelo companheirismo durante esta jornada. À minha amada noiva, Adriellen Loiane Medeiros Ribeiro, por sempre estar presente com um sorriso e um abraço sincero.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes pela oportunidade, pelo apoio, pelos ensinamentos e, sobretudo, pela paciência durante a orientação para a execução do projeto.

A toda a equipe do Laboratório de Acionamentos Elétricos (LAcE), em especial aos amigos e colegas Marcos José de Moraes Filho, Ricardo Tirone Fidelis, Cássio Alves de Oliveira, Gustavo Machado e Vinícius Marcos Pinheiro pelos conselhos e grande suporte em momentos desafiadores.

Aos meus amigos Leonardo Caixeta Côrrea e Thiago Vieira Silva que tiveram participação importante durante a realização do trabalho.

A toda minha família, por toda força e incentivo ao longo da minha vida. Agradeço por todos os valores ensinados, sem os quais a elaboração do trabalho não teria sido possível.

A todos os funcionários do departamento de engenharia elétrica e coordenação da pós-graduação.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que contribuíram para a realização deste trabalho por meio de apoio financeiro.

*"Não julgue quem você é, apenas aceite, se você quer
mudar e ser uma pessoa melhor, terá que aceitar quem
você já foi."*

Yoshihiro Togashi

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma plataforma de instrumentação virtual que permitisse o acionamento de um MRV 8/6, tanto quanto, permitisse o monitoramento de grandezas fundamentais para seu estudo durante os experimentos, agrupando todas as funcionalidades em uma única interface. Portanto, esse trabalho buscou contribuir com o desenvolvimento de plataformas de acionamento de MRVs com o auxílio de técnicas oriundas da instrumentação virtual, possibilitando a implementação de estudos futuros sobre a máquina. Foi utilizado um sistema de acionamento robusto, com capacidade de aplicar o controle implementado através do DSP/FPGA do myRIO-1900, comunicando com uma interface gráfica programada em LabVIEW. O sistema de aquisição de dados aplicado foi composto por sensores de corrente, de tensão, de posição e de conjugado, fornecendo informações para o controle do acionamento e para inspeção em tempo real das grandezas. Para demonstração da capacidade da plataforma criada realizou-se diversos ensaios, englobando o acionamento com regulador de corrente por histerese, controle de velocidade e aplicação de um estimador de conjugado. Os resultados experimentais demonstraram que a plataforma desenvolvida apresentou resultados confiáveis, com baixos erros de medição, e evidenciou a flexibilidade na inserção de novas funcionalidades.

Palavras-chave: Motor a Relutância Variável, Instrumentação Virtual, LabVIEW.

ABSTRACT

The objective of this work is to develop a virtual instrumentation platform that would allow the drive of an 8/6 SRM, and allow the monitoring of fundamental magnitudes for their study during the experiments, grouping all the functionalities in a single interface. Therefore, this work aimed to contribute to the development of platforms for driving SRM with the aid of techniques from virtual instrumentation, enabling the implementation of future studies on the machine. A robust drive system was used, with capacity to apply the control was embedded in DSP/FPGA of myRIO-1900, communicating with a graphic interface programmed in LabVIEW. The applied data acquisition system was composed by current, voltage, position and torque sensors, providing information for the drive control and for real time inspection of the quantities. To demonstrate the capacity of the platform created, several tests were performed, including the drive with a hysteresis current regulator, speed control and application of an torque estimator. The experimental results showed that the developed platform presented reliable operation, with low measurement errors, and evidenced its flexibility in the insertion of new features.

Keywords: Switched Reluctance Motor, Virtual Instrumentation, LabVIEW.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	XII
LISTA DE TABELAS	XVII
LISTA DE QUADROS.....	XVIII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XIX
LISTA DE SÍMBOLOS	XX
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Objetivo Geral.....	3
1.3 Estrutura do trabalho	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Considerações iniciais.....	5
2.2 Princípio de funcionamento do MRV	8
2.3 Equações elétricas e mecânicas do MRV	11
2.4 Sistema de acionamento do MRV	16
2.4.1 Conversor em meia ponte assimétrica	17
2.4.2 Lógica de acionamento	19
2.5 Aplicações do MRV.....	21
2.6 Contribuições ao estudo de plataformas de acionamento de MRVs	23
2.7 Considerações finais	29
3. PLATAFORMA DE INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL PARA ACIONAMENTO, CONTROLE E MONITORAMENTO DE MOTORES A RELUTÂNCIA VARIÁVEL	30
3.1 Considerações iniciais.....	30
3.2 Descrição dos elementos físicos da Plataforma de Instrumentação Virtual ...	33
3.2.1 Máquina a Relutância Variável 8/6.....	34
3.2.2 Conversor de Potência e Isolador.....	35
3.2.3 Fonte de tensão programável	36
3.2.4 Simulador de Carga.....	37

3.2.5	NI-myRIO 1900	38
3.2.6	Transdutor de posição angular	39
3.2.7	Transdutor de tensão e corrente	40
3.2.8	Transdutor de conjugado.....	41
3.3	Descrição do <i>software</i> da Plataforma de Instrumentação Virtual.....	41
3.3.1	Estratégia de acionamento do MRV	43
3.3.2	Código alocado no FPGA do NI-myRIO-1900	45
3.3.3	Código alocado no Computador	48
3.4	Inserção do controle de velocidade.....	50
3.5	Inserção do estimador de conjugado.....	52
3.6	Considerações Finais	54
4.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	55
4.1	Considerações iniciais.....	55
4.2	Ensaio na plataforma comparados aos instrumentos convencionais.....	55
4.2.1	Ensaio 1	56
4.2.2	Ensaio 2.....	59
4.2.3	Potência de saída e Rendimento dos Ensaio.....	61
4.3	Ensaio com variação de parâmetros	63
4.3.1	Ensaio 1 – Variação da tensão de entrada.....	63
4.3.2	Ensaio 2 – Variação do ângulo de disparo	69
4.3.3	Ensaio 3 – Variação do <i>setpoint</i> de histerese	75
4.3.4	Ensaio 4 – Variação de fases em falta.....	81
4.4	Ensaio com aplicação de controle de velocidade.....	88
4.4.1	Resposta a referência em degrau.....	89
4.4.2	Resposta a referência em Rampa	92
4.5	Ensaio com aplicação do Estimador de conjugado.....	95
4.6	Considerações finais	100

5. CONCLUSÕES	102
5.1 Considerações finais	102
5.2 Trabalhos Futuros	103
REFERÊNCIAS	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Máquina a Relutância Variável 8/6.....	6
Figura 2.2 – Perfil da indutância ideal do MRV de uma fase.	9
Figura 2.3 – Posições instantâneas do rotor do MRV 8/6.	9
Figura 2.4 – Perfil da indutância real do MRV 8/6 de uma fase.	10
Figura 2.5 – Circuito equivalente monofásico do MRV.	11
Figura 2.6 – Diagrama convencional do sistema de acionamento do MRV.	17
Figura 2.7 – Esquema elétrico de um conversor em meia ponte assimétrica.	18
Figura 2.8 – Modos de operação do conversor em meia ponte assimétrica: (a) magnetização, (b) desmagnetização, (c) roda livre.	18
Figura 2.9 – Pulsos de disparo para acionar um MRV 8/6.....	20
Figura 2.10 – Controle de corrente por histerese em um MRV.	21
Figura 2.11 – Quantidade de pesquisas na Base do IEEE Xplore sobre MaRVs.....	23
Figura 3.1 – Diagrama de Blocos da plataforma de instrumentação virtual.	31
Figura 3.2 – Visão geral da Plataforma de Instrumentação Virtual implementada no trabalho.	33
Figura 3.3 – Carcaça do motor MRV.	34
Figura 3.4 – Estator e Rotor da MRV.....	34
Figura 3.5 – Circuito isolador e circuito conversor de potência AHB.	35
Figura 3.6 – Fonte de tensão programável CSW5550.....	36
Figura 3.7 – Conversor CA-CC.....	37
Figura 3.8 – Placa geradora de sinal PWM.	37
Figura 3.9 – Máquina CC pertencente a plataforma de instrumentação virtual acoplada ao MRV 8/6.	37
Figura 3.10 – NI myRIO-1900.	38
Figura 3.11 – Esquema do NI myRIO-1900.	38
Figura 3-12 – Encoder Absoluto TRD-NA1024NW.....	39
Figura 3-13 – Placa de condicionamento de nível digital.	40
Figura 3.14 – Placa condicionadora de sinais para medição de tensão e corrente.	40
Figura 3.15 – Transdutor de conjugado T22/100NM da HBM.....	41
Figura 3.16 – Interface Gráfica de acionamento e monitoramento.	42
Figura 3.17 – Gráficos de corrente e conjugada da Interface Gráfica.	43

Figura 3.18 – Diagrama do código implementado no FPGA do NI myRIO-1900.	44
Figura 3.19 – Código em LabVIEW executado no FPGA para acionamento do MRV.	45
Figura 3.20 – Código em LabVIEW executado no FPGA para aquisição de dados.	47
Figura 3.21 – Diagrama dos protocolos de comunicação entre o computador e o NI myRIO-1900.	48
Figura 3.22 – Código em LabVIEW executado no Computador para gerenciamento da Interface Gráfica.	49
Figura 3.23 – Código em LabVIEW executado no Computador para aquisição de dados.	50
Figura 3.24 – Controle de velocidade para motores a relutância variável.	51
Figura 3.25 – Código em LabVIEW para implementação do controle de velocidade no Computador.	51
Figura 3.26 – Interface gráfica com a adição do controle de velocidade.	52
Figura 3.27 – Entradas e saídas do estimador de conjugado.	53
Figura 3.28 – Código em LabVIEW alocado no computador aplicando o estimador de conjugado.	53
Figura 3.29 – Interface gráfica com a implementação do estimador de conjugado.	54
Figura 4.1 – Correntes de fase do MRV 8/6 medidas pela plataforma.	56
Figura 4.2 – Correntes de fase do MRV 8/6 medidas pelo osciloscópio.	56
Figura 4.3 – Corrente da fase A e pulsos das chaves controladas da fase A.	57
Figura 4.4 – Tensões de fase do MRV 8/6 medidas pela plataforma do Ensaio 1.	57
Figura 4.5 – Tensões de fase do MRV 8/6 medidas pelo osciloscópio do Ensaio 1.	57
Figura 4.6 – Tensão no barramento CC medida pela plataforma do Ensaio 1.	58
Figura 4.7 – Correntes no barramento CC medida pela do Ensaio 1.	58
Figura 4.8 – Potência no barramento CC medida pela plataforma de instrumentação virtual do Ensaio 1.	58
Figura 4.9 – Tensão, corrente e potência no barramento CC medidas pelo osciloscópio do Ensaio 1.	58
Figura 4.10 – Velocidade média do MRV 8/6 no Ensaio 1.	59
Figura 4.11 – Torque médio do MRV 8/6 no Ensaio 1.	59
Figura 4.12 – Correntes de fase do MRV 8/6 medidas pela plataforma no Ensaio 2.	60
Figura 4.13 - Correntes de fase do MRV 8/6 medidas pelo osciloscópio no Ensaio 2.	60
Figura 4.14 – Corrente da fase A e pulsos das chaves controladas da fase A do Ensaio 2.	60
Figura 4.15 – Potência no barramento CC medida pela plataforma de instrumentação virtual no Ensaio 2.	61

Figura 4.16 – Tensão, corrente e potência no barramento CC medidas pelo osciloscópio no Ensaio 2.	61
Figura 4.17 – Velocidade média do MRV 8/6 no Ensaio 2.	61
Figura 4.18 – Torque médio do MRV 8/6 no Ensaio 2.	61
Figura 4.19 – Código para controle da fonte programada e variação da tensão.	64
Figura 4.20 – Tensão no barramento CC para o Ensaio de variação de tensão.	64
Figura 4.21 – Corrente no Barramento CC para o Ensaio de variação de tensão.	65
Figura 4.22 – Correntes de Fase médias para o Ensaio de variação de tensão.	66
Figura 4.23 – Correntes da Fase A em função da posição em graus.	66
Figura 4.24 – Correntes de Fase instantâneas para o Ensaio de variação de tensão.	67
Figura 4.25 – Velocidade média para o Ensaio de variação de tensão.	67
Figura 4.26 – Conjugado médio para o Ensaio de variação de tensão.	67
Figura 4.27 – Potência de entrada e Potência de saída para o Ensaio de variação de tensão.	68
Figura 4.28 – Rendimento do ensaio de variação de tensão.	68
Figura 4.29 – Código em LabVIEW para alteração do valor de θ_{off}	70
Figura 4.30 – Valores de θ_{off} implementados para o Ensaio de variação de θ_{off}	71
Figura 4.31 – Curva de indutância e ângulo de condução para $\theta_{off} = 15^\circ$ e $\theta_{off} = 5^\circ$	71
Figura 4.32 – Correntes de fase instantâneas para $\theta_{off} = 15^\circ$ e $\theta_{off} = 5^\circ$	72
Figura 4.33 – Média das Corrente de Fase para o Ensaio de variação de θ_{off}	72
Figura 4.34 – Corrente média de entrada para o Ensaio variação de θ_{off}	72
Figura 4.35 – Velocidade média para Ensaio variação de θ_{off}	73
Figura 4.36 – Conjugado médio para Ensaio variação de θ_{off}	73
Figura 4.37 – Potência de entrada e Potência de saída para Ensaio variação de θ_{off}	73
Figura 4.38 – Rendimento para Ensaio variação de θ_{off}	74
Figura 4.39 – Limites e <i>setpoint</i> no Regulador de Corrente por Histerese.	76
Figura 4.40 – Código em LabVIEW para alteração <i>setpoint</i> para o Ensaio de variação do <i>setpoint</i> de histerese.	76
Figura 4.41 – Janela de histerese durante o Ensaio de variação do <i>setpoint</i> de histerese.	77
Figura 4.42 – Corrente de fase para o Ensaio de variação do <i>setpoint</i> de histerese.	77
Figura 4.43 – Corrente de fase média para o Ensaio de variação do <i>setpoint</i> de histerese.	77
Figura 4.44 – Corrente de fase para <i>setpoint</i> de 17 A para o Ensaio de variação do <i>setpoint</i> de histerese.	78

Figura 4.45 – Tensão de fase para <i>setpoint</i> de 17 A para o Ensaio de variação do <i>setpoint</i> de histerese	78
Figura 4.46 – Corrente do barramento CC para o Ensaio de variação do <i>setpoint</i> de histerese.	78
Figura 4.47 – Tensão do barramento CC para o Ensaio de variação do <i>setpoint</i> de histerese.	78
Figura 4.48 – Potência do barramento CC estimada para o Ensaio de variação do <i>setpoint</i> de histerese.	79
Figura 4.49 – Velocidade média para o Ensaio de variação do <i>setpoint</i> de histerese.	79
Figura 4.50 – Conjugado médio para o Ensaio de variação do <i>setpoint</i> de histerese.....	79
Figura 4.51 – Potência de entrada e de saída para o Ensaio de variação do <i>setpoint</i> de histerese.	80
Figura 4.52 – Rendimento para o Ensaio de variação do <i>setpoint</i> de histerese.....	80
Figura 4.53 – Código em LabVIEW para variação da perda de uma fase e a perda de duas fases.	82
Figura 4.54 – Corrente instantânea das quatro fases para o Ensaio de variação da falta de fase.	84
Figura 4.55 – Média móvel das correntes de fase para o Ensaio de variação da falta de fase.	85
Figura 4.56 – Gráfico de barra das correntes de entrada para o Ensaio de variação da falta de fase.....	86
Figura 4.57 – Gráfico de barra das potências de entrada e de saída para o Ensaio de variação da falta de fase.....	86
Figura 4.58 – Velocidade média para o Ensaio de variação da falta de fase.....	87
Figura 4.59 – Conjugado médio para o Ensaio de variação da falta de fase.	87
Figura 4.60 – <i>Setpoint</i> e velocidade média para o Ensaio de controle de velocidade com degrau.	89
Figura 4.61 – Saída do controlador PI para o Ensaio de controle de velocidade com degrau.	90
Figura 4.62 – Correntes de fase para o Ensaio de controle de velocidade com degrau.	90
Figura 4.63 – Corrente do barramento CC para o Ensaio de controle de velocidade com degrau.	91
Figura 4.64 – Conjugado médio para o Ensaio de controle de velocidade com degrau.....	91
Figura 4.65 – Potência de entrada e Potência de saída para o Ensaio de controle de velocidade com degrau.	92
Figura 4.66 – <i>Setpoint</i> e velocidade para o Ensaio de controle de velocidade com rampa.	93
Figura 4.67 – Saída do controlador PI para o ensaio de controle de velocidade com rampa.	93

Figura 4.68 – Correntes de fase para o Ensaio de controle de velocidade com rampa.	94
Figura 4.69 – Corrente do Barramento CC para o Ensaio de controle de velocidade com rampa.	94
Figura 4.70 – Conjugado médio saída para o Ensaio de controle de velocidade com rampa. .	95
Figura 4.71 – Potência de entrada e Potência de saída para o Ensaio de controle de velocidade com rampa.	95
Figura 4.72 – Tensão no barramento CC para o Ensaio aplicando o estimador de conjugado.	96
Figura 4.73 – Correntes de fase instantânea para o Ensaio aplicando o estimador de conjugado.	97
Figura 4.74 – Velocidade média para o Ensaio aplicando o estimador de conjugado.	97
Figura 4.75 – Indutância estimada da Fase A para o Ensaio aplicando o estimador de conjugado.	98
Figura 4.76 – Indutância estimada das quatro fases para o Ensaio aplicando o estimador de conjugado.	98
Figura 4.77 – Conjugado instantâneo estimado para o Ensaio aplicando o estimador de conjugado.	99
Figura 4.78 – Conjugado médio medido e estimado para o Ensaio aplicando o estimador de conjugado.	99
Figura 4.79 – Potência de entrada e de saída para o Ensaio aplicando o estimador de conjugado.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Grandezas obtidas nos ensaios de comparação da plataforma com instrumentos convencionais.	62
Tabela 4.2 – Parâmetros ensaio de variação de tensão.	63
Tabela 4.3 – Resumo dos resultados para o ensaio de variação de tensão.	69
Tabela 4.4 – Parâmetros Ensaio de variação de θ_{off}	70
Tabela 4.5 – Resumo dos resultados para Ensaio variação de θ_{off}	74
Tabela 4.6 – Parâmetros de Ensaio de variação do <i>setpoint</i> de histerese.	75
Tabela 4.7 – Resumo dos resultados para Ensaio de variação do <i>setpoint</i> de histerese.	81
Tabela 4.8 – Parâmetros para o Ensaio de variação da falta de fase.	82
Tabela 4.9 – Fases em falta para o Ensaio de variação da falta de fase.	83
Tabela 4.10 – Resumo dos resultados para o Ensaio de variação da falta de fase.	88
Tabela 4.11 – Parâmetros para o Ensaio de controle de velocidade com degrau.	89
Tabela 4.12 – Parâmetros para o Ensaio de controle de velocidade com rampa.	92
Tabela 4.13 – Parâmetros para o Ensaio aplicando o estimador de conjugado.	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Funcionalidades da plataforma através da Interface Gráfica.....	32
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS

AHB	Conversor de meia ponte assimétrica
AI	Entradas Analógicas
AO	Saídas Analógicas
CA	Corrente alternada
Capes	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CC	Corrente Contínua
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
Conversor CA-CC	Corrente Alternada/ Corrente Contínua
CV	Cavalo-vapor
DAQ-NI	Data Acquisition – National Instruments
DIO	Entradas e Saídas Digitais
DMA	Acesso direto à memória
DSP/FPGA	Digital Signal Processor / Field Programmable Gate Array
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
FIFO	<i>First in First out</i>
FPGA	Field Programmable Gate Array
GRV	Gerador a relutância variável
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc
IGBT	Insulated-gate Bipolar Transistor
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LAcE	Laboratório de Acionamentos Elétricos
LUT	Lookup table
MaRV	Máquina a Relutância Variável
MIT	Motor de Indução Trifásico
MRV	Motor a relutância variável
NI	National Instruments
PWM	Pulse Width Modulation
rpm	Rotações por minuto
RT	Real Time
VRMS	Tensão eficaz

LISTA DE SÍMBOLOS

$L(\theta, i)$	Indutância da fase, dependente da posição do rotor e da corrente da fase
R	Resistência do enrolamento da fase
e	Força contra eletromotriz
i	Corrente que circula no enrolamento da fase
v	Tensão na fase da máquina
$\lambda(\theta, i)$	Fluxo concatenado pelo enrolamento da máquina
ω_m	Velocidade angular mecânica do eixo
ρ_e	Potência instantânea na entrada circuito
Ri^2	Potência da perda resistiva
T_{emg}	Conjugado eletromagnético produzido pela fase
ρ_{ent}	Potência instantânea entregue no entreferro
T_A	Torque eletromagnético produzido pela fase A
T_B	Torque eletromagnético produzido pela fase B
T_C	Torque eletromagnético produzido pela fase C
T_D	Torque eletromagnético produzido pela fase D
T_{mec}	Torque mecânico produzido no eixo da máquina
D	Coefficiente de atrito viscoso do sistema
J	Momento de inércia do sistema
η	Rendimento
P_e	Potência de entrada
P_m	Potência fornecida ao eixo do motor elétrico

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A busca por maior eficiência nos processos produtivos tem sido um dos grandes focos deste século, principalmente devido à escassez de recursos naturais e ao aumento da população. Tais fatores culminaram em uma maior preocupação na forma de consumo dos recursos, almejando o equilíbrio entre desenvolvimento e sustentabilidade (REIS, 2020; SILVEIRA, 2008). Essa visão abrange as mais diversas áreas, incluindo a área de máquinas elétricas, que representa grande parcela dos equipamentos presentes nas indústrias. Desse modo, a procura por máquinas elétricas mais eficientes, que apresentem maior durabilidade, robustez e necessitem cada vez de menos matéria prima para serem produzidas, tem crescido exponencialmente (FANG *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a Máquina a Relutância Variável (MaRV) vem tornando-se uma atraente alternativa às máquinas elétricas tradicionais em uma gama de aplicações, principalmente as aplicações que requisitam velocidade variável, altos níveis de conjugado mecânico e que necessitam de conversores eletrônicos (MARK, 2020; UYSAL *et al.*, 2019). As MaRVs apresentam estrutura simples, robusta e com menores perdas de potência comparadas ao Motor de Indução Trifásico (MIT), considerando que o rotor é construído apenas com chapas de material ferromagnético, não havendo enrolamentos (GUO, 2014; MORAES FILHO, 2017). Ainda, por não possuir ímãs permanentes de custo elevado e frágeis, ou escovas ocasionando manutenções frequentes, a MaRV oferece maior confiabilidade e eficiência. Assim, pode ser instalada em ambientes com condições de trabalho adversas, como alta vibração, poeira e umidade (OLIVEIRA, 2015). Dessa forma, diferentes estudos, como o de Jeong, Dee, Ahn (2017), o de Lebsir *et al.* (2013), o de Viajante *et al.* (2021), têm se empenhado em pesquisar a aplicabilidade das propriedades dessa máquina em indústrias automobilísticas, indústrias aeroespaciais e na geração eólica.

Apesar das promissoras características, durante muitos anos o uso da MaRV foi desconsiderado em virtude da complexidade do seu acionamento e controle (KULA; COSMAN, 2016; SHIN *et al.*, 2018). Além dos desafios encontrados no acionamento da MaRV, outras características precisam ser levadas em consideração, já que devido a sua construção, com estator e rotor apresentando polos salientes, a máquina possui comportamento não linear, resultando em oscilações de conjugado e conseqüentemente, produzindo ruído

sonoro (KANDHASAMY, 2020). Também é preciso considerar que para ser acionada é preciso o conhecimento da posição mecânica do rotor, necessitando de transdutores ou técnicas de estimação de posição (PENG; YE; EMADI, 2016).

Entretanto, contrapondo as desvantagens, fatores como a simplicidade e robustez da MaRV vem impulsionando um expressivo aumento de pesquisas científicas, apontando novas metodologias que aprimorem o seu desempenho nos últimos anos, buscando suprimir as características negativas (AHN; LUKMAN, 2019; MORAES FILHO, 2017). Nesse 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 e plataformas de acionamento de MaRVs para validação das novas metodologias estudadas, podendo citar: Kandhasamy (2020), Kachapornkul *et al.* (2022) e Miyauchi, Goto e Yoshizawa (2020).

Embora seja possível enumerar uma série de vantagens, como a possibilidade de validar as hipóteses levantadas em situações muito próximas as reais, o desenvolvimento de uma plataforma experimental pode não ser uma tarefa simples, principalmente quando se trata de aplicações que requerem muitas medições e controle de acionamento bem ajustado (DIAS, 2011; MORAES FILHO, 2017). Esse é o caso das plataformas experimentais para MaRVs, levando em consideração que o sistema de acionamento necessita de um conversor de potência que acione cada fase individualmente, além de um controlador que consiga processar o acionamento em tempo real. Além disso, é necessário considerar também que os instrumentos de medição convencionais podem apresentar custo elevado, como osciloscópios de canais isolados, torquímetros, velocímetros, entre outros (LOPES, 2007).

Dessa forma, a instrumentação virtual pode ser uma grande aliada na construção de plataformas de acionamento de MaRVs, pois ela permite o agrupamento de diversos instrumentos convencionais em um único instrumento virtual, tornando a estrutura física mais enxuta e flexível, sendo possível adicionar mais elementos quando necessário (FARIA *et al.*, 2021; SUN *et al.*, 2012). Além disso, o emprego da instrumentação virtual também possibilita atuar sobre o sistema, permitindo acionar uma MaRV controlando os conversores e aplicando a lógica de acionamento desejada (SONG; MA; ZHANG, 2013). Com isso, é possível reduzir o custo do projeto e torná-lo mais flexível, sendo ideal para aplicações voltadas a pesquisa e estudo de máquinas elétricas (LOPES, 2007).

Uma plataforma experimental desenvolvida com técnicas de instrumentação virtual pode beneficiar o estudo de novas metodologias e pesquisas futuras, considerando que traz a possibilidade de agrupar em uma interface o controle dos parâmetros de acionamento e o acesso

às grandezas elétricas e mecânicas monitoradas. Isto torna mais simples e menos dispendioso o estudo das características dessa máquina, tanto quanto, a alteração das características de acionamento mediante a inserção de novas funcionalidades. Ainda, com todas as informações agrupadas em um único local, torna-se possível a coleta dos resultados sem grandes transtornos, salvando grandes amostras de dados em diferentes formatos de arquivos.

1.2 Objetivo Geral

Frente ao exposto, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma plataforma de instrumentação virtual com o foco no acionamento e controle de um motor a relutância variável 8/6, permitindo o monitoramento em tempo real das principais grandezas envolvidas. A plataforma deverá permitir ao usuário através de uma interface gráfica o manuseio de forma simples e intuitiva das características de acionamento, ao mesmo tempo em que garante a confiabilidade nos resultados exibidos no supervisor, possibilitando o estudo de novas metodologias.

Com a finalidade de atingir o objetivo geral as seguintes metas foram traçadas:

1. Compreender o princípio de funcionamento da Máquina a Relutância Variável 8/6, as formas de acionamento e as estratégias de controle.
2. Analisar e compreender as tecnologias empregadas no desenvolvimento de plataformas de acionamento de Motor a Relutância Variável (MRV)s.
3. Implementar o sistema de acionamento da plataforma de instrumentação virtual.
4. Desenvolver o *software* responsável por acionar o MRV 8/6 e o *software* responsável por adquirir os sinais durante o acionamento do MRV 8/6.
5. Desenvolver a interface gráfica responsável por fornecer supervisor durante o acionamento do MRV 8/6.
6. Analisar a flexibilidade da plataforma desenvolvida agregando novas funcionalidades ao acionamento, incluindo controle de velocidade e estimador de conjugado.
7. Efetuar ensaios experimentais e comparar as medições com instrumentos convencionais para analisar o sistema de medição da plataforma de instrumentação virtual;
8. Efetuar ensaios experimentais variando parâmetros, de modo a mostrar as capacidades da plataforma de instrumentação virtual e analisar os resultados obtidos;
9. Efetuar ensaio experimental empregando o controle de velocidade adicionado;
10. Efetuar ensaio experimental aplicando o estimador de conjugado agregado;

11. Promover contribuições científicas a partir do trabalho, por meio de publicações em conferências e periódicos;
12. Propor novos estudos a partir dos resultados obtidos.

1.3 Estrutura do trabalho

Para alcançar os objetivos propostos e apresentar os resultados encontrados, este trabalho foi organizado da seguinte forma:

O **capítulo 2** apresenta uma breve revisão bibliográfica a respeito das Máquinas a Relutância Variável, descrevendo brevemente seu princípio de funcionamento e seu sistema de acionamento. Também são discutidas algumas aplicações e apresentado um modelo matemático capaz de descrever o comportamento da máquina. Por fim, o capítulo destaca as contribuições recentes no âmbito de plataformas de acionamento de MaRVs voltadas ao estudo e desenvolvimento de pesquisas, enfatizando as facilidades da instrumentação virtual nesse propósito.

O **capítulo 3** detalha todas as características e funcionalidades da plataforma de instrumentação virtual implementada, apresenta os principais componentes utilizados tanto em âmbito de *hardware* quanto em *software* e discute os processos realizados para desenvolvimento. Mostra ainda, a montagem final da plataforma e a Interface de Usuário que permite controlar os parâmetros de acionamento e a supervisão das medições realizadas.

O **capítulo 4** registra os resultados experimentais de diversos ensaios que foram realizados com o objetivo de validar a plataforma desenvolvida e compreender o comportamento do MRV 8/6 diante diferentes condições de operação. Os ensaios englobaram a comparação das medições de dois testes realizados pela plataforma de instrumentação virtual com as medições encontradas em instrumentos convencionais, osciloscópio e tacômetro. Nesse capítulo, são exibidos e discutidos os resultados encontrados a partir dos ensaios experimentais realizados para diferentes casos abordados, de modo a demonstrar a capacidade da plataforma de instrumentação virtual.

Por fim, o **capítulo 5** apresenta a conclusão do trabalho e propõe algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações iniciais

A MaRV enquadra-se no grupo de máquinas elétricas que produzem conjugado devido a variação da relutância do circuito magnético (KRISHNAN, 2001; VIAJANTE, 2013). Portanto, nessa máquina, o conjugado é gerado pela tendência de movimentação dos polos do rotor para a posição angular em que a indutância do enrolamento excitado é máxima. Esse comportamento característico advém da dupla saliência da máquina e da presença de enrolamentos somente no estator (CHUMACERO-POLANCO, 2014; LI, 2017; SILVEIRA, 2008;). Seu acionamento é fundamentado na comutação das correntes das diferentes fases, sincronizada com a posição do rotor, de acordo com a curva de indutância (KANDHASAMY, 2020).

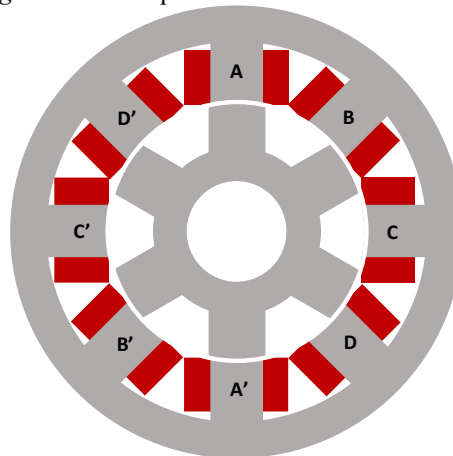
Construtivamente, a MaRV é considerada simples e robusta, apresentando projeto e construção de baixa dificuldade (AHN; LUKMAN, 2019; XIAO *et al.*, 2022). O rotor é composto por ferro laminado, moldado para formar polos salientes. O estator também apresenta polos salientes, enrolados por bobinas com pares de polos diametralmente opostos, comumente conectadas em série e percorridas pela mesma corrente chaveada (SILVEIRA, 2011). A construção de uma MaRV aplica habitualmente número de polos pares, tanto do rotor como do estator, garantindo uma dualidade magnética a fim de criar um caminho para o fluxo magnético. Em sua operação, quando há um alinhamento dos polos do rotor com o estator, um caminho de relutância mínima é gerado (GUO, 2014; KACHAPORNKUL *et al.*, 2022; SCALCON, 2019).

Outra característica que traz robustez em sua construção, é que a MaRV não aplica anéis coletores, ímãs permanentes, escovas ou comutadores na alimentação, diminuindo a necessidade de manutenção frente à outras máquinas (GUO, 2014; KANDHASAMY, 2020). Na ocorrência de falha em uma ou mais fases, as outras fases podem manter a máquina acionada, com uma redução no seu desempenho, já que cada fase da máquina pode operar eletricamente isolada (KACHAPORNKUL *et al.*, 2022; LI, 2017; XIAO *et al.*, 2022).

Assim como as demais máquinas elétricas, a MaRV pode ser utilizada como motor e/ou gerador sem grandes alterações no sistema de acionamento (FANG *et al.*, 2021; UYSAL *et al.*, 2019). A motorização ou geração é definida de acordo com o momento angular em que cada bobina do estator é energizada pelo sistema de acionamento da máquina (KRISHNAN, 2001; SCALCON, 2019). O sistema de acionamento é composto por um conversor de energia, um

sistema de controle e um sistema de medição de grandezas elétricas e/ou mecânicas (EMERY, 2021; GUO, 2014). A necessidade do sistema de acionamento é justificada pelo princípio de funcionamento da MaRV, que opera segundo a máxima energia armazenada no circuito magnético. Quando uma determinada fase da máquina é energizada, os polos do rotor mais próximos a fase energizada, tendem a alinhar-se com os polos do estator, caso o rotor esteja livre. Uma mudança cíclica da excitação dos enrolamentos de cada fase fará com que o rotor da máquina acompanhe a sequência de energização aplicada, fazendo com que o eixo gire em sincronia a energização, caracterizando a operação como motor (KRISHNAN, 2001; MARK, 2020; WANG *et al.*, 2018). A Figura 2.1 apresenta a estrutura básica de uma MaRV 8/6.

Figura 2.1 – Máquina a Relutância Variável 8/6.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Apesar de serem conhecidas desde o século XIX, somente nas últimas décadas as MaRVs tornaram-se competitivas frente às outras máquinas elétricas, mesmo diante da necessidade de conversores e controladores para operação dessa máquina (KANDHASAMY, 2020; SILVEIRA, 2008). Isso foi resultado dos avanços da eletrônica de potência e microprocessamento, em conjunto a diminuição do custo destes componentes, os quais são essenciais para desenvolvimento dos conversores e controladores (AHN; LUKMAN, 2019; KANDHASAMY, 2020; VIAJANTE, 2013). Assim, associado à robustez construtiva e simplicidade do conversor de potência empregado, as MaRVs vêm ganhando destaque em aplicações que necessitam de velocidade variável, alta relação conjugado/volume e tolerância a faltas (SCALCON, 2019; SILVEIRA, 2011; XIAO *et al.*, 2022). Apesar disso, o mercado de MaRVs ainda está pouco aquecido, contendo poucas aplicações comerciais (SILVEIRA, 2008; VIAJANTE, 2013). Entretanto, diversos estudos trazem essas máquinas como soluções para aplicações nos setores aeronáutico e espacial, no setor automotivo na área de tração elétrica e

no setor de geração de energia eólica (FIDELIS, 2018; KACHAPORNKUL *et al.*, 2022; SILVA *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2017).

Um exemplo da aplicação comercial do Motor a Relutância Variável (MRV) foi citado por Scalcon (2019), referente a uma versão de um automóvel da *Land Rover 10 Defender*, em que o motor a diesel foi trocado por um MRV de potência nominal de 70 kW. Com o motor substituído, o veículo foi capaz de alcançar velocidades de 100 km/h, apresentando somente uma caixa de engrenagem, sem o uso de marchas. A empresa responsável pela produção do motor é de origem Inglesa, conhecida como *Nidec SR Drives Ltd.*, que desenvolve motores a relutância variável para uma grande linha de aplicações, destacando: aplicações de ventiladores de resfriamento, aplicações de bombeamento centrífugo de alta velocidade, controladores de compressores de parafuso e transportadores de carga.

Outra aplicação comercial, agora no setor industrial, foi desenvolvida por Jeong, Dee, Ahn (2017). Seu trabalho contribuiu com a criação de um Motor a Relutância Híbrido monofásico para uso em um martelo demolidor elétrico. O motor em questão apresenta funcionamento semelhante a um MRV monofásico, entretanto, foi acrescentado em seu estator ímãs permanentes, resultando em uma máquina de potência de 4,7 kW e eficiência de 72 %. A empresa Hilti Corporation, especializada em produtos para construção civil e mineração, usam o motor em seus produtos de martelo demolidores, como Hilti TE 700-AVR, TE 1000, 1500 e 3000-AVR.

Apesar das vantagens, a Máquina a Relutância Variável manifesta alguns desafios em sua operação, considerando que a estrutura com dupla saliência ocasiona um perfil magnético demasiadamente não linear, trazendo dificuldade para o acionamento e controle eficaz da máquina. Além disso, também decorrente da geometria duplo saliente, identifica-se um torque oscilante, a presença de vibrações mecânicas e a ocorrência de intensos ruídos sonoros (FANG *et al.*, 2021; LI, 2017; VIAJANTE, 2013). A oscilação de conjugado pode restringir o uso em situações com requisitos de alto desempenho, como robótica e controle preciso de posição e velocidade, dessa forma seu acionamento tradicional coloca essa máquina em desvantagem (BERNARDELI, 2008).

Uma série de pesquisas demonstram esforços dedicados à redução da oscilação do conjugado e redução de vibrações através de novas técnicas de acionamento (ABRAHAM; ASHOK, 2020; SHIN *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2017). Alguns trabalhos abordam melhorias no projeto e construção da MaRV buscando minimizar esses problemas (HIEU; LEE; AHN, 2012; XU; LEE; AHN, 2015). Pesquisas como a de Kandhasamy (2020) fazem uso de aprendizado de máquina para encontrarem pontos de operação e controle ótimos, visando

reduzir a oscilação do conjugado eletromagnético. Por meio de duas redes neurais artificiais executadas em tempo real no controlador FPGA, foi realizado a previsão da corrente e conjugado, calculando a referência do controlador de corrente de modo a minimizar as oscilações instantâneas de conjugado. Verificou-se bom desempenho e redução considerável das oscilações para diferentes velocidades de operação, baixas, médias e altas.

Outra desvantagem comumente apontada no emprego de MaRVs é a necessidade de conhecimento da posição angular do rotor para o correto acionamento, seja operando como motor ou como gerador (SILVEIRA, 2011; GUO, 2014; WANG *et al.*, 2018). Assim, a utilização de sensores de posição ou de velocidade são requeridos. Muitos trabalhos buscam soluções para realização do acionamento da máquina sem a necessidade de sensores e transdutores, utilizando técnicas *sensorless* (MIYAUCHI; GOTO; YOSHIZAWA, 2020; WANG *et al.*, 2018). Em Xiao *et al.* (2022) é apresentada uma revisão das principais técnicas de acionamento *sensorless* para altas e baixas velocidades, comparando vantagens e desvantagens das diferentes metodologias.

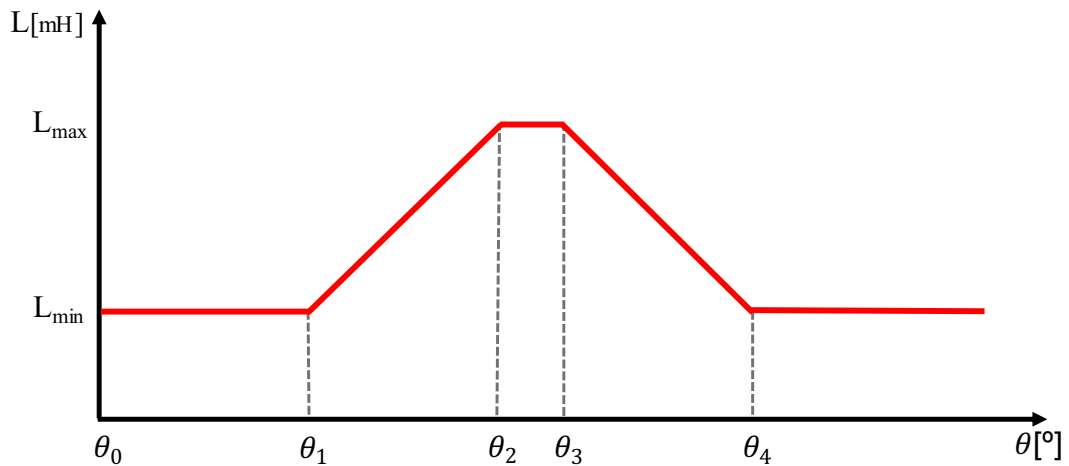
2.2 Princípio de funcionamento do MRV

Um estudo profundo da física do motor a relutância chaveada está além do escopo desta dissertação, informações mais detalhadas sobre as Máquinas a Relutância Variável podem ser encontradas em Bilgin, Jiang e Emadi, (2018) e Krishnan (2001). No entanto, é apresentada a seguir, uma breve descrição do princípio de funcionamento dessa máquina.

A dupla saliência é um aspecto construtivo impactante na caracterização do princípio de funcionamento do MRV, pois por meio dela que são criados diferentes perfis de indutância nos enrolamentos (MACHADO *et al.*, 2022; OLIVEIRA, 2015). Portanto, variando o ângulo de alinhamento entre os polos do rotor e estator, varia-se, em consequência, a indutância instantânea na fase acionada. Assim, o conjugado é produzido pela tendência de deslocamento do rotor para posição em que a indutância na fase energizada é máxima, rotacionando o eixo da máquina (DANKADAI *et al.*, 2018; ZAHARIA, 2016).

Dessa forma, conclui-se que a indutância é uma grandeza basilar em um MRV e a compreensão de seu comportamento é importante para entendimento dos processos de acionamento de máquina, seja como motor ou como gerador (WICHERT, 2008; YASA; SOZER; GARIP, 2018). A Figura 2.2 mostra a forma de onda ideal da indutância de uma fase do MRV excitada por uma corrente constante mediante a mudança da posição do eixo da máquina.

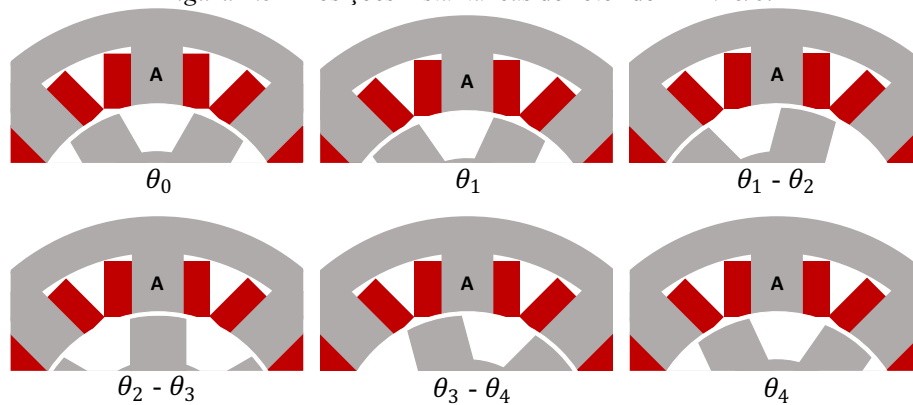
Figura 2.2 – Perfil da indutância ideal do MRV de uma fase.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 2.3 ilustra os pontos de movimentação do rotor em relação ao estator do MRV, os quais se relacionam com os instantes destacados na Figura 2.2.

Figura 2.3 – Posições instantâneas do rotor do MRV 8/6.



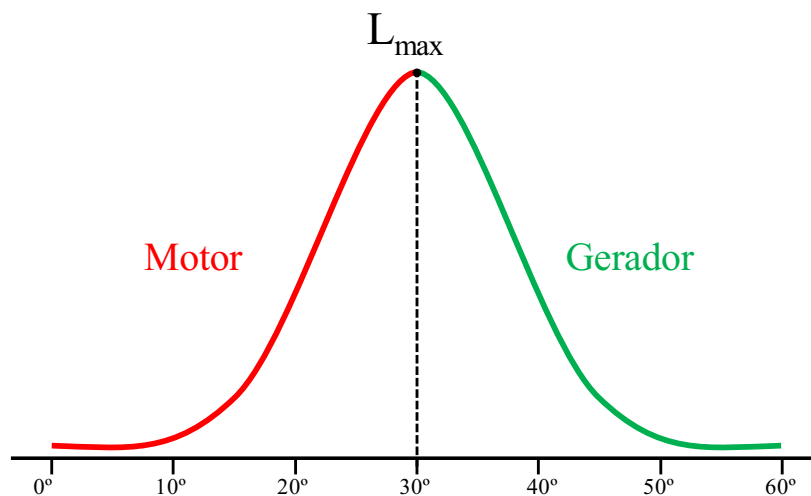
Fonte: Elaborado pelo Autor.

1. $\theta_0 - \theta_1$: Nesse instante os polos do estator e do rotor estão completamente desalinhados. O fluxo magnético majoritariamente está sendo conduzido pelo trajeto do ar. A indutância apresenta o valor mínimo e quase constante, não produzindo torque.
2. $\theta_1 - \theta_2$: Nessa região ocorre a gradativa sobreposição dos polos, começando a se sobrepor no instante θ_1 e estando totalmente sobrepostos em θ_2 . Logo, o caminho percorrido pelo fluxo ocorre primordialmente através das laminações do estator e do rotor, aumentando a indutância e formando uma inclinação positiva na curva. A produção de torque é positiva, compondo a região de motorização.

3. $\theta_2 - \theta_3$: Como o polo do rotor é maior que o polo do estator, durante esse período, apesar do movimento do eixo, a sobreposição é completa. Assim, o trajeto do fluxo é predominante constituído pelo material ferromagnético tendo o efeito de manter a indutância no valor máximo e constante, resultando em uma geração de torque igual a zero.
4. $\theta_3 - \theta_4$: O polo do rotor se afasta, diminuindo gradualmente a sobreposição ao polo do estator, semelhante ao que ocorre na região $\theta_1 - \theta_2$, porém apresenta indutância decrescente, contribuindo para uma inclinação negativa da região de indutância. A operação da máquina nessa região resulta em torque negativo, implicando na possibilidade de acionamento como gerador elétrico.

Com a análise do perfil de indutância do MRV percebe-se que existem momentos em que o torque gerado é positivo, negativo ou quase nulo (MACHADO *et al.*, 2022; MORAES FILHO, 2017). Tal inferência mostra que excitando a fase nos momentos de torque positivo, a máquina será motorizada e entregará conjugado a carga acoplada; excitando a fase em momentos de torque negativo, a máquina atuará como gerador e fornecerá potência elétrica (KIMPARA, 2018; SILVA, 2017; YE; MALYSZ; EMADI, 2016). É importante salientar que, experimentalmente, não é possível atingir o perfil de indutância mostrado na Figura 2.2. A saturação causa um arredondamento na curva próxima ao topo, apresentando perfil mostrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Perfil da indutância real do MRV 8/6 de uma fase.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

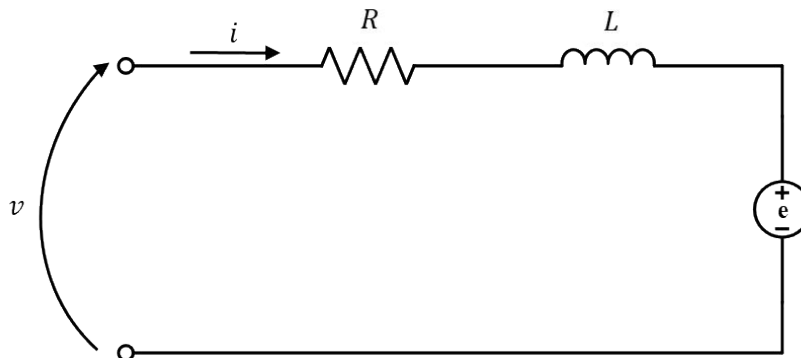
Isto posto, para fazer uso de um motor a relutância variável é necessário um sistema de acionamento que implemente a lógica adequada de energização das fases. As fases devem ser excitadas no instante correto, de acordo com a posição atual do rotor e o modo de operação desejado, motor ou gerador (SONG; MA; ZHANG, 2013; UYSAL *et al.*, 2019).

2.3 Equações elétricas e mecânicas do MRV

O princípio de funcionamento do motor a relutância variável detalhado anteriormente pode ser representado por um modelo matemático que rege seu funcionamento. De modo a representar fidedignamente a máquina, o modelo matemático é baseado em equações fundamentais que descrevem tanto as características elétricas quanto as mecânicas (BILGIN; JIANG; EMADI, 2018; KRISHNAN, 2001). Esta subseção trata objetivamente a respeito do equacionamento dinâmico e em regime permanente do MRV 8/6, desprezando o efeito da indutância mútua entre as fases.

A Figura 2.5 exibe o circuito equivalente monofásico do Motor a Relutância Variável, sendo composto de forma simplificada por uma resistência representando a resistividade do cobre presentes nos enrolamentos, uma indutância variável representando a indutância do enrolamento e uma fonte de tensão que representa a força contra eletromotriz.

Figura 2.5 – Circuito equivalente monofásico do MRV.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Em virtude da dupla saliência do MRV, o entreferro entre os polos do estator e do rotor mudam de acordo com a posição angular do eixo. Portanto, diferente da representação circuitual de uma máquina em CC (Corrente Contínua) com excitação independente, em que a indutância é constante, na MaRV a indutância de fase é dependente da posição angular e da corrente de fase. Equacionando o circuito equivalente monofásico, tomando que a indutância é uma

grandeza dependente tanto da posição do rotor quanto da corrente de fase (ALMEIDA, 2018; OLIVEIRA, 2015; SILVA, 2017), tem-se:

$$v = Ri + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + e \quad (2.1)$$

Onde:

v - Tensão na fase da máquina (V).

R - Resistência do enrolamento da fase (Ω).

i - Corrente que circula no enrolamento da fase (A).

$L(\theta, i)$ - Indutância da fase, dependente da posição do rotor e da corrente da fase (H).

e - Força contra eletromotriz (V).

A relação entre o fluxo concatenado pelo enrolamento da máquina $\lambda(\theta, i)$ (Wb) e a indutância é expressa em (2.2).

$$\lambda(\theta, i) = L(\theta, i) i \quad (2.2)$$

A força contra eletromotriz é obtida pela equação 2.3:

$$e = i\omega_m \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (2.3)$$

Onde:

ω_m - Velocidade angular mecânica do eixo (rad/s).

Substituindo (2.3) em (2.1) tem-se que:

$$v = Ri + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i\omega_m \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (2.4)$$

A Equação 2.4 retrata o comportamento da tensão no circuito equivalente monofásico, os termos à direita da equação representam respectivamente: a queda de tensão na resistência do enrolamento, a queda de tensão no indutor e a força contra-eletromotriz induzida. Com a tensão definida, pode-se encontrar a potência de entrada do circuito aplicando a tensão à Equação 2.5.

$$\rho_e = vi \quad (2.5)$$

Em que:

ρ_e - Potência instantânea na entrada do circuito (VA).

Substituindo a Equação 2.4 na Equação 2.5, obtém-se:

$$\rho_e = Ri^2 + iL(\theta, i) \frac{di}{dt} + i^2 \omega_m \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (2.6)$$

Ao analisar o último termo da Equação 2.6 observa-se que este não pode ser interpretado fisicamente, sendo possível substituí-lo por expressões já conhecidas e reescrever a expressão.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) = iL(\theta, i) \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial t} \quad (2.7)$$

Isolando a expressão $iL(\theta, i) \frac{di}{dt}$ (Equação 2.8) e substituindo na expressão da potência de entrada ρ_e (2.6), teremos (2.9).

$$iL(\theta, i) \frac{di}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) - \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$\rho_e = Ri^2 + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \omega_m \quad (2.9)$$

A Equação 2.9 representa a potência instantânea de entrada, em que é constituída pela soma da potência de perda resistiva (Ri^2), a taxa de variação da energia armazenada no campo magnético do enrolamento ($\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right)$) e a potência no entreferro ($\frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial t} \omega_m$).

$$\rho_{ent} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \omega_m \quad (2.10)$$

A potência entregue ao entreferro relaciona-se com o conjugado eletromagnético e com velocidade mecânica por meio da Equação 2.11.

$$T_{emg} = \rho_{ent} / \omega_m \quad (2.11)$$

Onde:

ρ_{ent} - Potência instantânea entregue no entreferro (W).

T_{emg} - Conjugado eletromagnético produzido pela fase A (N.m).

Portanto, o conjugado eletromagnético para uma representação monofásica é dado pela Equação 2.12.

$$T_{emg} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (2.12)$$

Considerando que o motor abordado neste trabalho é o MRV 8/6, tornando-se necessário considerar o conjugado eletromagnético de cada umas de suas quatro fases, resultando assim, na expressão geral para a produção de conjugado eletromagnético mostrado na Equação 2.13.

$$T_{emg} = T_A + T_B + T_C + T_D \quad (2.13)$$

T_A - Torque eletromagnético produzido pela fase A (N.m).

T_B - Torque eletromagnético produzido pela fase B (N.m).

T_C - Torque eletromagnético produzido pela fase C (N.m).

T_D - Torque eletromagnético produzido pela fase D (N.m).

Substituindo a equação 2.12 na equação 2.13, aplicando as grandezas referentes as respectivas fases do MRV 8/6, tem-se:

$$T_{emg} = \frac{1}{2} i_A^2 \frac{\partial L(\theta, i_A)}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_B^2 \frac{\partial L(\theta, i_B)}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_C^2 \frac{\partial L(\theta, i_C)}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_D^2 \frac{\partial L(\theta, i_D)}{\partial \theta} \quad (2.14)$$

Para definir o comportamento mecânico do motor deve-se realizar o equacionamento das forças de forma que resulte no equilíbrio entre elas (MORAES FILHO, 2017; REIS, 2020). Portanto, o conjugado mecânico produzido no eixo da máquina é encontrado relacionando a parcela do conjugado eletromagnético das quatro fases, a parcela de conjugado de atrito viscoso e a parcela de conjugado de inércia, de forma que o torque mecânico é descrito pela Equação 2.15.

$$T_{mec} = T_{emg} - D\omega_m - J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.15)$$

Em que:

T_{mec} – Torque mecânico (N.m).

D - Coeficiente de atrito viscoso do sistema (kg.m²/s).

J - Momento de inércia do sistema (kg.m²).

Assim, a expressão matemática que representa o conjugado mecânico produzido para o motor abordado neste trabalho pode ser vista na Equação 2.16.

$$T_{mec} = \frac{1}{2}i_A^2 \frac{\partial L(\theta, i_A)}{\partial \theta} + \frac{1}{2}i_B^2 \frac{\partial L(\theta, i_B)}{\partial \theta} + \frac{1}{2}i_C^2 \frac{\partial L(\theta, i_C)}{\partial \theta} + \frac{1}{2}i_D^2 \frac{\partial L(\theta, i_D)}{\partial \theta} - D\omega_m - J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.16)$$

Considerando a contribuição das quatro fases da máquina e a equação mecânica, tem-se as equações que descrevem o comportamento elétrico e mecânico do MRV 8/6. Em vista de simplificar a aplicação de métodos numéricos para solução das expressões encontradas, convencionalmente elas são reorganizadas e postas em forma matricial, podendo ser representadas em espaço de estado (OLIVEIRA, 2015; SCALCON, 2019).

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \\ v_D \\ T_{mec} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_D & 0 & 0 \\ m & n & p & q & -D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_D \\ \omega_m \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_A(\theta, i) & 0 & 0 & 0 & 0 & i_A \frac{\partial L_A(\theta, i)}{\partial \theta} \\ 0 & L_A(\theta, i) & 0 & 0 & 0 & i_B \frac{\partial L_B(\theta, i)}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & L_A(\theta, i) & 0 & 0 & i_C \frac{\partial L_C(\theta, i)}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & 0 & L_A(\theta, i) & 0 & i_D \frac{\partial L_D(\theta, i)}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \\ \dot{i}_D \\ \dot{\omega}_m \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Onde:

$$m = \frac{1}{2}i_A \frac{\partial L_A(\theta, i)}{\partial t};$$

$$n = \frac{1}{2}i_B \frac{\partial L_B(\theta, i)}{\partial t};$$

$$p = \frac{1}{2}i_C \frac{\partial L_C(\theta, i)}{\partial t};$$

$$q = \frac{1}{2}i_D \frac{\partial L_D(\theta, i)}{\partial t}.$$

Definindo que as matrizes (V), (R), (I), (L) e (I) estão representadas na equação 2.18 pela ordem em que são mostradas, da esquerda para a direita, obtém-se:

$$[V] = [R][I] + [L][\dot{I}] \quad (2.18)$$

Isolando-se a matriz (\dot{I}) obtemos a equação de estados do MRV 8/6 tal que:

$$[\dot{I}] = [V][L]^{-1} - [R][I][L]^{-1} \quad (2.19)$$

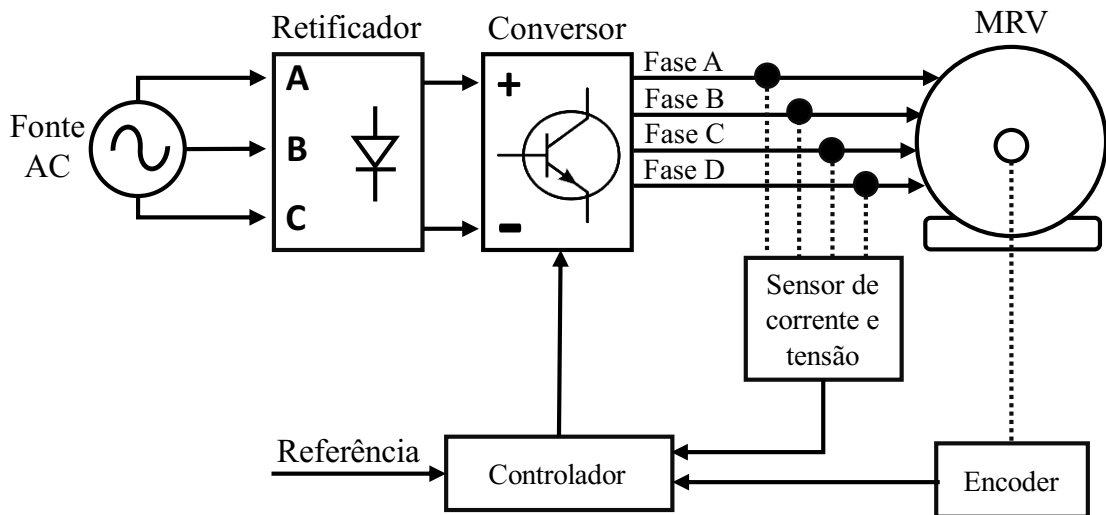
A Equação 2.19 permite a representação do comportamento completo de cada fase do MRV 8/6 em qualquer instante de tempo. Nota-se que, como as matrizes (R) e (L) são formadas pelo valor de resistências e indutâncias (em função do ângulo do rotor e da corrente aplicada) de cada uma das fases, representam os aspectos construtivos da máquina. Portanto, aplicando métodos numéricos computacionais é possível encontrar a solução do sistema.

2.4 Sistema de acionamento do MRV

Como exposto a respeito do princípio de operação do MRV, o conjugado é produzido somente quando há aumento na indutância de determinada fase em função da posição angular do rotor, como detalhado na seção anterior (FANG *et al.*, 2021; MARK, 2020). Sendo assim, há necessidade de conhecer constantemente a posição do rotor para que a energização da fase ocorra na inclinação positiva da curva de indutância, ou seja, nos períodos de derivada positiva da indutância (REIS, 2020).

Contraposto ao acionamento em aplicações que necessitam velocidade variável, o MRV possui em seu sistema de acionamento os mesmos componentes aplicados por outros motores elétricos, como um retificador, um conversor e um controlador, a exemplo o acionamento vetorial de um motor de indução trifásico (KIMPARA, 2018; MARK, 2020; VIAJANTE, 2013). A Figura 2.6 mostra o diagrama típico do sistema de acionamento MRV.

Figura 2.6 – Diagrama convencional do sistema de acionamento do MRV.



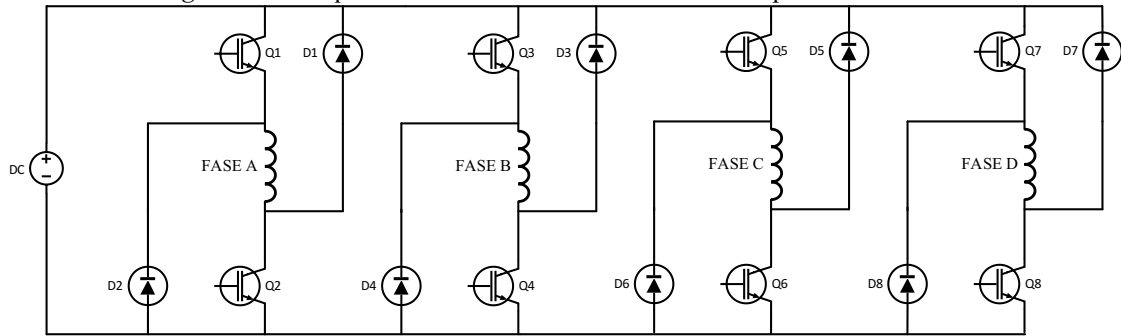
Fonte: Adaptado de Kimpara (2018).

Para o MRV ser acionado é necessário um conversor que comute a energização das fases no instante angular correto, fazendo o interfaceamento entre a fonte de alimentação CC e os enrolamentos do motor (VIJAYAKUMAR *et al.*, 2008). A topologia do conversor e seu controle são de grande importância para a eficiência total da máquina, bem como a lógica de acionamento empregada (ELMUTALAB, 2016).

2.4.1 Conversor em meia ponte assimétrica

Existem diversas topologias de conversores que atendem às exigências do MRV, que operam cada fase de modo independente e permitem trabalhar nas regiões de magnetização e desmagnetização (CABEZUELO *et al.*, 2017). Os conversores C-Dump, R-Dump, Split DC e Buck-Boost são alguns exemplos dentro de inúmeros conversores estudados na literatura. Entretanto, a topologia mais utilizada para o acionamento do MRV é o conversor em meia ponte assimétrica (FANG *et al.*, 2021; OLIVEIRA, 2015; SILVEIRA, 2011). A Figura 2.7 retrata o esquema elétrico de um conversor em meia ponte assimétrica de quatro fases.

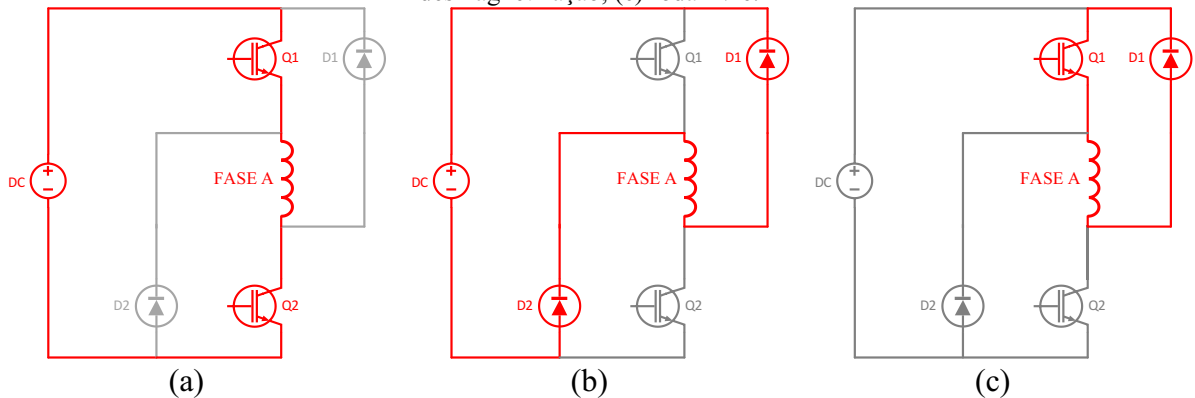
Figura 2.7 – Esquema elétrico de um conversor em meia ponte assimétrica.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O conversor em meia ponte assimétrica contém quatro componentes semicondutores em cada braço, dos quais dois são diodos e dois são chaves controladas. Os diodos são responsáveis por providenciar caminho de corrente para a operação em roda livre e para descarga de corrente. As chaves controladas são responsáveis por chavear a corrente para cada fase. Com isso, esse tipo de conversor pode ter três modos de operação: magnetização, desmagnetização e roda livre (CABEZUELO *et al.*, 2017; KRISHNAN, 2001; MORAES FILHO, 2017). Os três modos de funcionamento do conversor estão ilustrados na Figura 2.8, destacando em vermelho os componentes que estão ativos e os locais em que há passagem de corrente.

Figura 2.8 – Modos de operação do conversor em meia ponte assimétrica: (a) magnetização, (b) desmagnetização, (c) roda livre.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

- Magnetização: neste modo de operação, ilustrado pela Figura 2.8 (a), os diodos estão inversamente polarizados, pois as chaves controladas são acionadas e o enrolamento do motor fica sujeito à tensão do barramento CC. Isso causa o aumento da corrente neste enrolamento e fornece energia ao motor (ELMUTALAB, 2016; MARK, 2020).
- Desmagnetização: neste modo, Figura 2.8 (b), ambas as chaves controladas são abertas, polarizando os diodos diretamente. Assim, a energia armazenada no indutor flui pelos

diodos até o instante que o indutor esteja completamente sem energia. Portanto, a fase fica sujeita à tensão inversa do barramento de corrente contínua, fato que contribui para que a taxa de decrescimento da corrente seja alta, enquanto a energia armazenada na fase na forma de campo magnético é parcialmente devolvida a fonte (LI, 2017; MORAES FILHO, 2017).

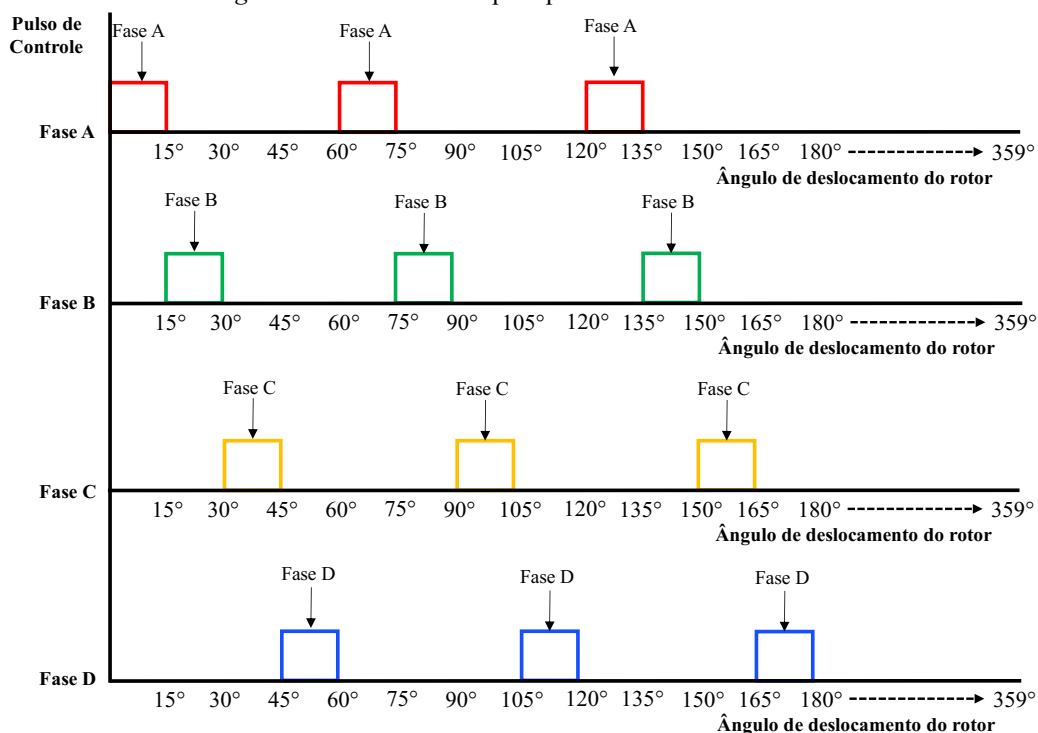
- Roda livre: ocorre quando somente uma das chaves controladas é fechada, como exemplifica a Figura 2.8 (c). Fazendo com que o diodo referente a esta chave fique diretamente polarizado, possibilitando que a corrente do enrolamento circule por este diodo. Nessa etapa tem-se uma tensão nula na fase e a corrente irá apresentar um decaimento exponencial (CABEZUELO *et al.*, 2017; OLIVEIRA, 2015).

Além do conversor de potência, o sistema de acionamento é composto por um detector de posição angular, por um controlador e por sensores de corrente para fins de regulação de corrente (BILGIN; JIANG; EMADI, 2018; FANG *et al.*, 2021). A função do sensor de posição do rotor é indicar a posição do eixo em tempo real ao controlador, permitindo ao controle da lógica de acionamento disparar a chave controlada de cada fase no instante correto. Por sua vez, o controlador é encarregado de definir a sequência de acionamento das fases e a forma de onda da excitação, possibilitando alcançar as características almejadas de velocidade e torque (FANG *et al.*, 2021; YASA; SOZER; GARIP, 2018).

2.4.2 Lógica de acionamento

A lógica de acionamento da MRV leva em consideração a posição mecânica do rotor em relação ao estator, desse modo, um dos parâmetros mais importantes no controle são os ângulos de disparo (CHUMACERO-POLANCO, 2014; EMERY, 2021). Segundo Nashed *et al.* (2014), os ângulos de disparo representam o momento em que o controlador envia sinais de *gate* ao conversor de potência, caracterizado por um ângulo de início de condução (θ_{on}) e um ângulo de encerramento de condução (θ_{off}). Para o protótipo utilizado neste trabalho (descrito na seção seguinte) os pulsos de disparo para cada uma das quatro fases estão representados na Figura 2.9.

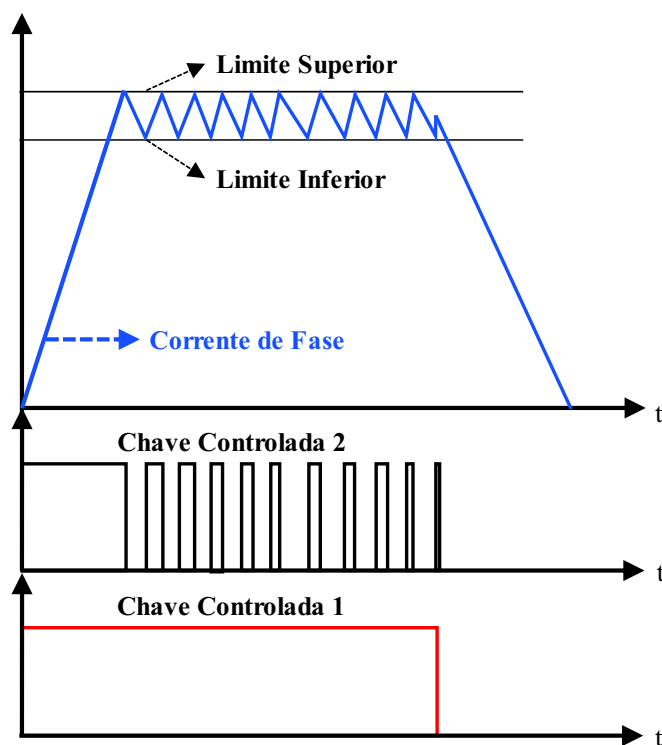
Figura 2.9 – Pulsos de disparo para acionar um MRV 8/6.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nota-se que os ângulos de magnetização e desmagnetização de cada uma das fases estão sincronizados com as outras fases da máquina, de forma que não houvesse tempo ocioso e nem sobreposição de fases. Considerando que o controle é feito com base na posição angular do rotor, o tempo em que cada fase permanece energizada depende da velocidade da máquina. Portanto, em baixas velocidades, considerando que o tempo de energização de cada fase é maior, é importante aplicar um controle da corrente de cada fase. Assim, em conjunto ao controlador, os sensores de corrente viabilizam o controle da corrente pelo regulador via histerese. Tal método implica na operação das chaves controladas em decorrência dos valores de corrente na fase, impondo uma banda de operação a partir de uma referência (YASA; SOZER; GARIP, 2018). A Figura 2.10 mostra o comportamento da corrente diante o controle por histerese.

Figura 2.10 – Controle de corrente por histerese em um MRV.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como mostra a Figura 2.10, a estratégia de controle para regular a corrente via histerese (*soft chopping*) consiste em ligar as chaves do conversor quando a corrente de fase estiver abaixo do limite inferior da banda e desligar uma das chaves quando a corrente estiver acima do limite superior da banda. Desse modo, quando ambas as chaves estão fechadas a corrente na fase aumenta (o conversor opera no modo de magnetização) até o limite superior (EMERY, 2021). Quando isso ocorre, o controle abre uma das chaves, operando em roda livre, e a corrente diminui até o limite inferior (NASHED *et al.*, 2014; YASA; SOZER; GARIP, 2018).

2.5 Aplicações do MRV

Vistas as características construtivas e de acionamento das MRVs, fica evidente que as aplicações tendem a ser atrativas quando é necessário velocidades variáveis com uso da eletrônica de potência, pois nesse quesito a utilização de uma Máquina a Relutância Variável é competitiva com as tradicionais, já que o uso intrínseco do conversor não seria uma objeção (MORAES FILHO, 2017). Junto à característica de ampla faixa de velocidade, o elevado torque mecânico, sua eficiência, robustez e tolerância à falta de fase, tornam essa máquina interesse de muitas aplicações industriais, englobando o uso em indústrias automotivas, aeroespaciais e

também em geração eólica (REIS, 2020; ELMUTALAB, 2016). Em adição, o fato de poder atuar como motor e gerador a torna propícia para aplicação nos setores automobilísticos e aeroespaciais (OLIVEIRA, 2015).

A indústria automobilística está gradualmente elevando o uso de sistemas embarcados e eletrônicos, despertando também o estudo para uso de tração elétrica, podendo tornar os carros elétricos com maior conforto e segurança (FIDELIS, 2018). Além disso, ao empregar o MRV em automóveis, a máquina também poderá operar como motor durante a partida e posteriormente em funcionamento, opera como gerador provendo energia para os componentes eletroeletrônicos do veículo. Essa operação atinge melhorias na eficiência energética do conjunto (REIS, 2020). A MaRV é apresentada como opção ao sistema de tração elétrica na comunidade científica, notando alguns trabalhos relacionados (YE; MALYSZ; EMADI, 2015; FUJISHIRO *et al.*, 2006; SILVEIRA *et al.*, 2010).

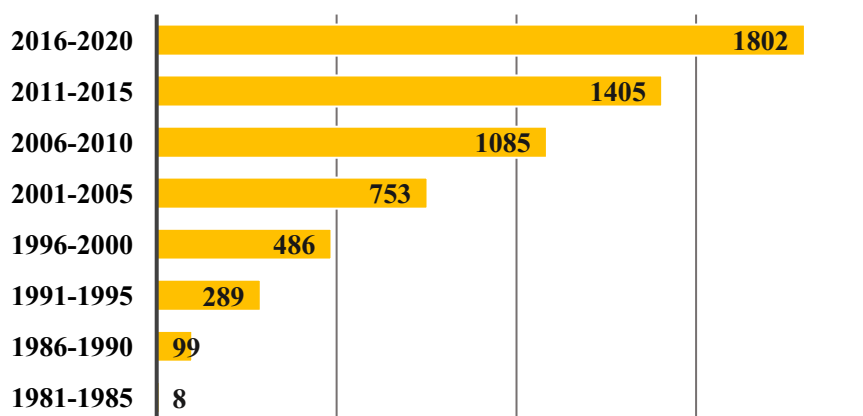
A atuação da MaRV como motor e gerador é ideal também no ramo aeroespacial, sendo usado como motor de partida em motores a jato, e após o funcionamento sua operação é voltada para suprir energia elétrica a aeronave operando como um gerador (MAMEDE, 2016). Há um grande movimento para fabricação de aeronaves mais seguras e elétricas, expressando uma demanda para substituição de métodos hidráulicos e pneumáticos para métodos elétricos como fonte primária de energia, e assim a MaRV viabilizaria tal aplicação (BARTOLO *et al.*, 2016). Ainda pode-se pontuar na aplicação aeroespacial da Máquina a Relutância Variável como bomba de lubrificação/combustível em motor de turbina a gás (MAMEDE, 2016). Estudos relacionados as aplicações aeroespaciais são relatadas em trabalhos como: Dankadai *et al.* (2018) e Ullah *et al.* (2022).

No que diz respeito a energia eólica, demandam-se máquinas capazes de atuar em velocidade variável ou capazes de adequar o seu funcionamento para esse fim (FIDELIS, 2018). Comparado com as tradicionais máquinas síncronas ou de indução, a aplicação do MRV em aerogeradores oferece um bom benefício ao possibilitar a remoção de caixas de câmbio e engrenagens, reduzindo o investimento do sistema (OLIVEIRA, 2015). Aplicações que busquem aproveitar das características já citadas da MaRV, na extração de energia eólica podem ser observadas em diversos trabalhos (BARROS, 2015; CHEN, 2008; MUELLER, 2005; SANTOS NETO, 2017; VIAJANTE *et al.*, 2021).

2.6 Contribuições ao estudo de plataformas de acionamento de MRVs

O número de pesquisas a respeito da MaRV tem crescido nas últimas décadas, especialmente no início do século XXI (CHUMACERO-POLANCO, 2014; SILVEIRA, 2011). Essa tendência pode ser confirmada na Figura 2.11, em que apresenta a quantidade de artigos produzidos sobre Máquinas a Relutância Variável nas últimas décadas. As informações foram levantadas na base IEEE Xplore, a partir do uso das terminologias em inglês: *Switched Reluctance Machine*; *Switched Reluctance Motor*; *Switched Reluctance Generator*. A quantidade de artigos publicados foi organizada de acordo com a data de publicação e estão dispostas na Figura 2.11.

Figura 2.11 – Quantidade de pesquisas na Base do IEEE Xplore sobre MaRVs.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

As recentes pesquisas publicadas com a temática de MaRVs trazem contribuições em diversos segmentos, como melhorias nos projetos das máquinas, nas topologias do conversor, projetos dos controladores, operação *sensorless* e modelagem matemática. Essa constatação é endossada pelo trabalho de Ahn e Lukman (2019), que produziram uma revisão agrupando as principais temáticas de estudos recentes no campo das MaRVs. Ressaltou-se a busca de novos *designs* para o rotor e estator da máquina, citando a adição de *ribs* ao rotor, uso de entreferro não linear, construção de máquinas sem mancal, topologias com percursos curtos para o fluxo e máquinas híbridas. Também citou-se que muitas pesquisas estão ocorrendo em busca de novas metodologias de controle, como: controle direto de conjugado e controle com metodologias *sensorless*. Além disso, foi dissertado a respeito da importância das pesquisas sobre essas máquinas, devido à crescente necessidade de máquinas que operem com altas velocidades e escassez de ímãs permanentes no mercado, destacando que a MaRV é uma alternativa viável

para substituir motores de ímã permanente e é uma boa candidata para motores de baixo custo e/ou acionamento de alta velocidade.

O sistema de acionamento também tem ganhado foco nas pesquisas que tratam das topologias de conversores, técnicas de controle, controladores, sistemas de aquisição de dados, entre outros. Considerando que, apesar de alguns sistemas de acionamento estarem mais difundidos, ainda não há padronizações e normativas quanto ao acionamento do MRV. A exemplo, o artigo de Fang *et al.* (2021) compara diversas técnicas de regulação de corrente, que foram divididas em dois principais grupos, dependentes ou não-dependentes de modelo matemático. Depois de uma análise revendo e avaliando o princípio de implementação de cada um dos reguladores de corrente de acordo com os pontos positivos e negativos, os autores concluíram que existem muitas opções precisas e que regulam as correntes com exímia exatidão. Entretanto, ao tratar de simplicidade de implementação e desempenho, o regulador por histerese é uma ótima opção.

Diferentes topologias de conversores de potência para aplicações em MRVs são comparadas em pesquisas. O trabalho de Cabezuelo *et al.* (2017) apresentou um estudo comparativo sobre diferentes topologias de conversores de potência para acionamento de um MRV em veículos elétricos, considerando as características necessárias para essa aplicação. Ao fim do estudo, foi concluído que cada topologia demonstra pontos fortes e pontos fracos, apesar de que, considerando a implementação em veículos elétricos, a melhor opção seria a topologia em ponte assimétrica. Mesmo que o conversor em ponte assimétrica tenha um custo maior, ele permite operar em roda-livre, acionamento com sobreposição de fases e tem maior tolerância a faltas.

Técnicas de controle também têm sido investigadas, buscando inovações no controle de velocidade, no controle de conjugado e nos controles *sensorless*. Um exemplo de estudo sobre novas técnicas de controle de velocidade é notado em Uysal *et al.* (2019). No estudo foi projetado um controlador proporcional-integral de autoajuste para controlar a velocidade de um motor a relutância variável. O algoritmo de controle foi executado em um controlador lógico programável, em que os ganhos do controlador PI são determinados por lógica *fuzzy*. O controlador desenvolvido foi validado experimentalmente e com o método proposto, o motor atingiu o valor da velocidade de referência em pouco tempo. Os *overshoots* foram eliminados em condições variáveis, como cargas diferentes e condições de velocidade diferentes.

Como demonstrado, muitas pesquisas têm sido realizadas nas mais diversas áreas das MaRVs. Muitas delas utilizam o ambiente de simulações para realizar suas investigações, utilizando modelos matemáticos para representar as MaRVs e seu sistema e acionamento

(PENG; YE; EMADI, 2016; WANG *et al.*, 2018; XU; LEE; AHN, 2015). Por meio de simulações é possível implementar de maneira relativamente rápida a pesquisa em questão, possibilitando analisar facilmente as formas de onda relevantes (tensão, corrente, conjugado, indutância e velocidade) e alterar com simplicidade a lógica de acionamento. A implementação em ambiente experimental pode ser um pouco mais dispendiosa, levando em consideração a maior complexidade de montagem do sistema de acionamento, necessidade de maior recurso financeiro, corpo técnico com conhecimento em diferentes áreas, além do difícil acesso a fornecedores especializados em Máquinas a Relutância Variável.

Considerando a importância dos resultados experimentais, diversos trabalhos que propõem novas metodologias e estudos, desenvolvem bancadas para o acionamento das Máquinas a Relutância Variável (KANDHASAMY, 2020; VIAJANTE, 2013; ZHANG *et al.*, 2017). Para tal, são necessárias à aplicação de tecnologias para o controle do acionamento, a detecção da posição angular do rotor, a excitação dos enrolamentos das máquinas no tempo e ordem correta. Ainda, podem ser usados sensores e transdutores na aplicação de controles no acionamento e aplicados na visualização das grandezas elétricas e mecânicas da máquina.

Um exemplo da construção de uma plataforma para acionamento de um MRV é encontrado no trabalho de Moraes Filho (2017), em que foi proposto o desenvolvimento de uma plataforma de acionamento digital para um MRV 8/6. A plataforma foi construída de forma modular, possibilitando alterações em sua estrutura física de forma simplificada, e por elementos robustos, a fim de suportar os testes impostos. Ocorreu o emprego de conversores AHB, de um sensor de posição do tipo encoder absoluto e utilizou-se como controlador do acionamento o DSP TMS320F28335. A aquisição de dados para o controle de corrente deu-se por meio de sensores de corrente, enquanto, para análise das formas de onda durante a operação do motor foram utilizados instrumentos de medição tradicionais (osciloscópio e tacômetro).

Outra plataforma para ensaios experimentais visando ensaiar o MRV e validar a eficácia do controle foi desenvolvida por Silva *et al.* (2017). Nessa pesquisa foi utilizada uma técnica de controle com o objetivo de diminuir os efeitos da falta de fase na velocidade de operação do MRV, implementando um controlador adaptativo *feedforward*. Os componentes que integraram a plataforma resumidamente foram: um MRV 6/4 trifásico, um controlador DSP TMS320F28335, um conversor em meia ponte assimétrica, um encoder absoluto de 10 bits e sensores de corrente.

No tocante a utilização de plataformas, Scalcon (2019) apresentou contribuições para o acionamento e controle de velocidade de motores a relutância variável. Para tal, foram estudadas duas técnicas de controle de velocidade: técnica de controle *sliding mode* e técnica

adaptativa robusta por modelo de referência. O sistema de acionamento e controle foi implementado primeiramente em simulação e depois validado em bancada experimental. Quanto a bancada, o controlador implementado para aplicar a lógica de acionamento foi o DSP TMS320F28335 da Texas Instruments e o conversor de potência usado o foi conversor AHB. Na bancada, foram mensurados através de transdutores conectados ao controlador as correntes de fase, posição, velocidade, torque e tensão do barramento CC. Para visualização das formas de onda de corrente durante a operação do motor fez-se uso de um osciloscópio.

Com o objetivo de tornar a MaRV mais atraente para geração de energia elétrica em sistemas distribuídos e em instalações sem conexão com a rede, Araujo *et al.* (2021) empregaram uma técnica de rastreamento atuando nos ângulos de chaveamento do conversor de potência. A bancada para validação experimental do estudo foi construída utilizando conversores AHB, sensor de posição do tipo Encoder Absoluto e dois controladores Arduino Mega 2560 (um realiza o controle do acionamento e o outro gerencia as grandezas mensuradas). Durante o acionamento foram medidos os valores de corrente e de tensão, bem como, foi estimado o conjugado de forma indireta.

Em muitos dos trabalhos encontrados, apesar da não normalização, nota-se um padrão no uso de tecnologias para o acionamento, como o emprego de DSPs da Texas Instruments, conversores de potência com topologia AHB, monitoramento por intermédio de instrumentos convencionais e ausência de uma interface que agrupe todos os dados mensurados pelo sistema de aquisição de dados. Embora possibilitem a validação experimental, nos trabalhos abordados, vê-se uma dificuldade na aquisição dos sinais e monitoramento em tempo real das formas de onda avaliadas. A instrumentação virtual pode contribuir significativamente na coleta de dados e na visualização gráfica das informações medidas e coletadas durante o acionamento. Além disso, pode ser utilizada como controlador e fornecer a lógica de disparo aos conversores. Desse modo, é viável o desenvolvimento de interfaces gráficas que permitam manipular os parâmetros de acionamento e monitorar as grandezas medidas.

A instrumentação virtual pode ser definida pela integração de ferramentas de programação e equipamentos de aquisição de sinais, que juntos a um computador, executam as mesmas funções de instrumentos convencionais (CAO; CHEN, 2014). Vários instrumentos podem ser agrupados virtualmente em um único instrumento virtual, permitindo que o espaço em que ocupa um dispositivo convencional e os custos em sua produção sejam diminuídos. Dessa forma, em um único *software*, é possível mesclar várias funcionalidades de dispositivos convencionais, assim como: um gerador de funções, um multímetro, um osciloscópio, um analisador de espectro e qualquer outro instrumento que se desejar (KANG *et al.*, 2014).

Uma excelente aplicação de instrumentação virtual seria na aquisição de grandezas elétricas em laboratórios, assim, os custos com a obtenção de aparelhos de medição e controle necessários para a montagem das bancadas experimentais seriam reduzidos. Surge-se também a possibilidade de inserir outras funções aos medidores virtuais, através do *software*, com pequenas alterações no *hardware* utilizado na montagem experimental, fazendo com que as medições sejam mais dinâmicas e multifuncionais (LOPES, 2007).

Alguns trabalhos utilizam da instrumentação virtual para implementar sistemas de monitoramento, supervisor e/ou coleta de resultados das grandezas do Motor a Relutância Variável durante o acionamento. O trabalho de Song, Ma e Zhang (2013) apresenta o desenvolvimento de um sistema de acionamento para mensurar as características eletromagnéticas de MaRVs, incluindo as características de magnetização e de conjugado. O sistema foi construído a partir do controlador DSP TMS320F2812, nele foi implementado tanto o controle de acionamento, quanto o sistema de aquisição de dados, o DSP conectado a um computador com o LabVIEW instalado, forneceu a interface supervisória, permitindo avaliar as grandezas mensuradas e calculadas, em tempo real. O autor concluiu que o sistema implementado facilitou a medição de características eletromagnéticas, sendo fácil de usar e apresentando alta precisão.

De modo similar, em Barros *et al.* (2018) foi aplicada a instrumentação virtual utilizando um DSP e um computador com o LabVIEW instalado. Esse artigo apresenta um sistema automático que permite realizar testes de caracterização magnética de um MRV. As medições das correntes e tensões foram realizadas por meio de um osciloscópio sendo comandado via Ethernet pelo LabVIEW, enquanto o acionamento foi controlado por um DSP TMS320F28335, comunicando via serial com o computador. Os autores concluíram que esse sistema de caracterização eletromagnética desenvolvido permitiu obter de forma automática e precisa as curvas de magnetização para um MRV 12/8.

Em ambos os trabalhos, o controle do acionamento é implementado via um DSP, utilizando conversores AHB. Para coleta dos resultados, o DSP foi usado como sistema de aquisição de dados, foi apresentada uma interface gráfica desenvolvida em LabVIEW, comunicando via serial com o DSP. Em Hamouda e Számel (2019), também foi utilizada a instrumentação virtual para validar experimentalmente a metodologia proposta em seu trabalho, na supervisão de dados. Embora as medições para monitoramento sejam capturadas por um instrumento virtual composto pela placa de aquisição de dados DAQ-NI 6009, que realiza a leitura dos transdutores para medição das correntes e tensões de fase, da tensão de barramento, a posição, a velocidade e o torque. A lógica de acionamento foi implementada no controlador

TMS320F28379D, acionando um MRV 8/6 de quatro fases empregando um conversor AHB e um encoder incremental de 600 pulsos por rotação. Esse trabalho objetivou aplicar uma metodologia de otimização no controle dos parâmetros do MRV em busca de melhorar a produção de conjugado, por meio de redes neurais artificiais.

Por outro lado, Nagy *et al.* (2016) utilizaram uma plataforma de instrumentação virtual tanto para acionar, quanto para monitorar as grandezas, na qual houve o desenvolvimento do modelo de um MRV sendo executado em tempo real dentro de um controlador FPGA, o qual é baseado nas técnicas *look-up table*, e tem como foco o controle da velocidade de operação do motor. O modelo foi executado em tempo real na NI FPGA 7856R e para validação experimental, esse controlador também foi empregado para o acionamento do motor juntamente com uma bancada. A bancada experimental contou com um MRV 8/6, acionado por um conversor AHB, um encoder absoluto de 12 bits, sensores de corrente e uma placa DAQ NI SCB-68 para aquisição dos dados medidos. O torque foi estimado em tempo real utilizando a corrente e posição medida, sendo esses dados usados para interpolação pelo método LUT.

Uma plataforma de instrumentação virtual, com base no DSP/FPGA NI myRIO-1900 e programado em LabVIEW, também foi desenvolvida por Fidelis *et al.* (2018) para estudo em geradores a relutância variável em aplicações de energia eólica. Os autores verificaram técnicas de controle da tensão gerada para pequenas turbinas eólicas, além de testes em diferentes condições de operação do gerador, variando a velocidade, as variáveis de excitação, as variáveis de magnetização e os ângulos de acionamento. A plataforma possibilitou controlar as características de acionamento através uma interface gráfica no computador e analisar as formas de onda por meio da aquisição dos sinais por sensores e transdutores.

Semelhantemente, Viajante *et al.* (2021) utilizaram o DSP/FPGA NI myRIO-1900 como controlador em sua plataforma de ensaios experimentais na qual a lógica de controle do acionamento e a medição das variáveis do gerador foram feitas por meio de instrumentação virtual. A topologia escolhida para o conversor de potência foi o AHB e utilizado um Encoder Absoluto de 8 bits para estimar a posição. O controle foi implementado através da variação do ângulo de desmagnetização com o objetivo de controlar a tensão gerada de um GRV 6/4 usando lógica fuzzy. Foram medidas, através de transdutores, as tensões e correntes de fase, as tensões e correntes do barramento e estimada a velocidade.

Como é evidenciado pelos trabalhos citados, o uso de instrumentação virtual é uma alternativa interessante para o acionamento de MaRVs no âmbito acadêmico e da pesquisa, posto as facilidades agregadas, destacando o monitoramento e simplicidade da compreensão do código. Desse modo, a implementação de uma plataforma de instrumentação virtual, que reúna

em uma só interface todas as medições realizadas e possibilite alterar os parâmetros durante o acionamento da MRV, traz maior facilidade ao estudo da máquina e de novas metodologias no âmbito experimental.

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma plataforma de instrumentação virtual, usando LabVIEW em conjunto com o controlador embarcado FPGA/DSP, para atuar como *drive* de um Motor a Relutância Variável 8/6. O sistema foi implementado de maneira que viabilizasse o controle de parâmetros do acionamento em tempo real, durante o funcionamento da máquina. Ainda, a plataforma possibilita a exibição dos dados coletados pelo sistema de aquisição, os quais podem ser manipulados para cálculos, controles e mesmo coleta de resultados. Outra característica buscada por este trabalho foi a flexibilidade na adição de novas funcionalidades, e ao mesmo tempo, simplicidade na alteração dos procedimentos que foram implementados.

Uma plataforma desenvolvida com todas as características discutidas permite que pesquisas futuras sobre Motores a Relutância Variável possam ser validas experimentalmente mais facilmente, possibilitando a verificação das formas de onda de diversas grandezas de interesse, além de permitir coletar os sinais de maneira dinâmica. Portanto, este trabalho contribuiu com o desenvolvimento de plataformas voltadas à ensaios experimentais de MRV implementando tecnologias de controle e monitoramento em tempo real, fazendo uso do conceito da instrumentação virtual.

2.7 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados sucintamente os aspectos construtivos da MaRV, pontuando as suas vantagens e desvantagens operacionais. Foi apresentado o princípio de funcionamento da máquina, bem como, as características do seu sistema de acionamento. Foi desenvolvido, objetivamente, a modelagem matemática para um motor a relutância 8/6, permitindo a compreensão do comportamento das principais características elétricas e mecânicas da máquina. Foram mostradas as principais áreas de aplicação, destacando aquelas que requerem velocidade variável. Por fim, foi exposto um breve estado da arte sobre a construção de plataformas para o acionamento do MaRV, apresentando as principais tecnologias empregas no sistema de acionamento.

3. PLATAFORMA DE INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL PARA ACIONAMENTO, CONTROLE E MONITORAMENTO DE MOTORES A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

3.1 Considerações iniciais

No capítulo anterior, foi pontuada a importância das plataformas experimentais para o estudo sobre Máquinas a Relutância Variável e analisadas as tecnologias recentes aplicadas pela comunidade científica para a construção das plataformas. Nesse ínterim, este trabalho propôs o desenvolvimento de uma plataforma experimental para MRV 8/6. As características almejadas no projeto, na concepção e nos testes da plataforma foram:

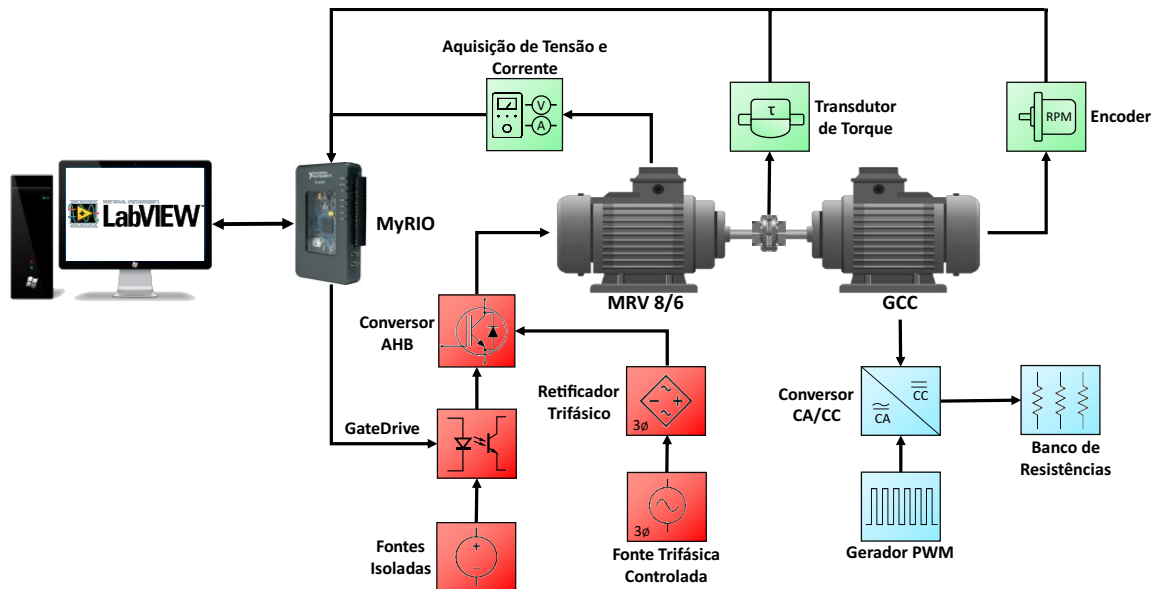
- Apresentar estrutura física robusta, permitindo ensaios com diferentes níveis de tensão, corrente e velocidades;
- Implementar o controle de acionamento no núcleo FPGA, de acordo com a posição do rotor e com o uso de regulação de corrente por histerese;
- Imprimir versatilidade na programação do controle, possibilitando o acréscimo simplificado de novos procedimentos;
- Disponibilizar o núcleo RT do controlador para futuras atualizações e adições de novos códigos.
- Integrar todos os elementos constituintes em um único ambiente, favorecendo a configuração, coleta, cálculos e controle;
- Desenvolver Interface de Usuário que possibilitasse o monitoramento de todas as grandezas mensuradas e que permitisse o controle manual dos parâmetros de acionamento, em tempo real.

Assim, este capítulo tem como objetivo detalhar os equipamentos, procedimentos e métodos empregados para a construção da plataforma de instrumentação virtual para acionamento de um MRV 8/6. Também se objetivou a descrição das características de funcionamento e da usabilidade de cada um dos elementos agregados, descrevendo a programação em LabVIEW responsável pelos principais processos.

Para desenvolvimento da plataforma foram reunidas diferentes áreas de conhecimento, a exemplo: máquinas elétricas, eletrônica de potência, microprocessadores, instrumentação, controle, entre outras. Os diversos elementos que constituem a plataforma de instrumentação virtual cooperaram para o acionamento do motor a relutância variável 8/6 de modo didático e

intuitivo. A Figura 3.1 dispõe os principais elementos que integram a plataforma e ilustra as suas conexões, por meio de um diagrama de blocos.

Figura 3.1 – Diagrama de Blocos da plataforma de instrumentação virtual.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como o diagrama permite entender, todos os sinais adquiridos são condicionados e enviados às entradas do NI myRIO-1900, sendo esse o controlador empregado. Após o processamento de dados, é realizado o acionamento do conversor através dos *gatedrives*, proporcionando a excitação das fases do motor de acordo com a posição angular do rotor. Ainda, o myRIO comunica com o computador enviando os sinais a serem exibidos na interface do usuário. A tensão trifásica da fonte controlada é retificada e conectada ao conversor AHB, permitindo fornecer corrente elétrica CC ao motor de acordo com a lógica de acionamento. O simulador de carga está conectado ao MRV e aumenta o conjugado requerido de acordo com o sinal PWM gerado pela placa, que atua como *gate* para o conversor CA/CC.

As características gerais da plataforma estão resumidas no Quadro 3.1, mostrando as diferentes possibilidades de controle em tempo real das grandezas relevantes ao acionamento e a capacidade de supervisionar a operação. Para que isso fosse possível, todo o código foi programado em LabVIEW, tanto a instância processada no FPGA, quanto a instância processada no computador.

Quadro 3.1 – Funcionalidades da plataforma através da Interface Gráfica.

PROCESSO	FUNCIONALIDADES
<p>ACIONAMENTO</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Acionar/ Desacionar o MRV. ● Selecionar quais fases serão acionadas ● Ativar/Desativar o controle de corrente por histerese, assim como, definir a banda de corrente do controle. ● Definir dos ângulos de disparo de cada uma das fases. ● Escolher o sentido de rotação do MRV, horário ou anti-horário. ● Determinar as configurações e valor de saída de tensão trifásica da fonte programável. ● Definir <i>setpoint</i> para o controlador de velocidade manualmente, em forma de rampa e em forma seinodal.
<p>MONITORAMENTO</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Visualizar a forma de onda das tensões e correntes de fase ● Visualizar os disparos do conversor. ● Visualizar a forma de onda da tensão e corrente do barramento. ● Visualizar a velocidade de rotação da máquina. ● Visualizar o conjugado na carga mecânica. ● Calcular e visualizar a potência de entrada, potência de saída e rendimento. ● Salvar formas de onda em arquivos .csv, .txt ou em imagem. ● Visualizar a indutância estimada, o conjugado eletromagnético estimado e o fluxo magnético estimado.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

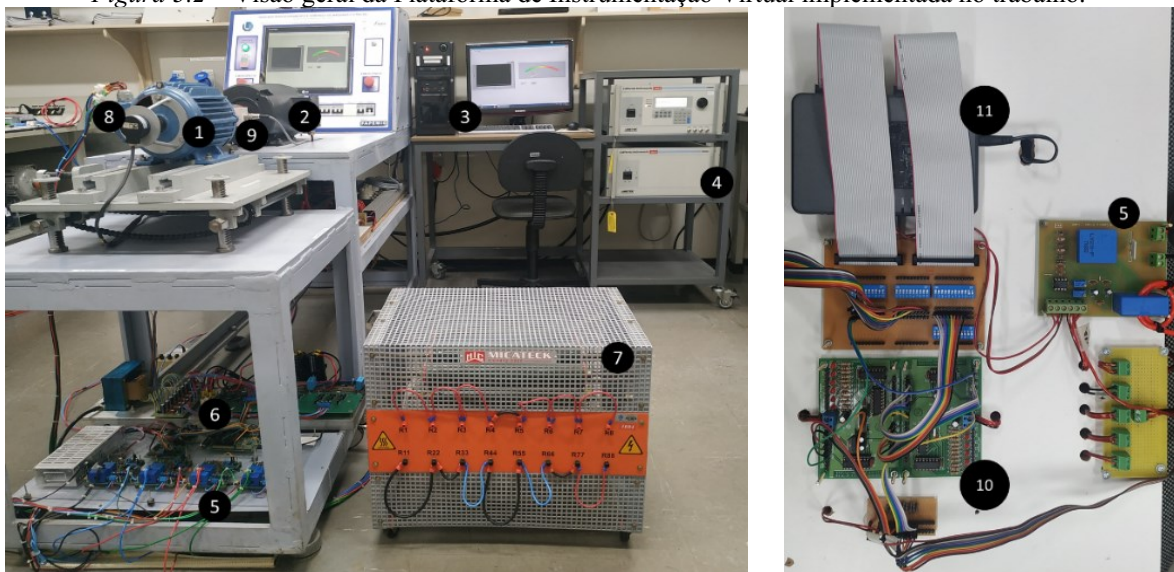
As muitas funcionalidades apontadas permitem ensaiar o MRV 8/6 alterando os parâmetros acionamento por meio da interface implementada em tempo real. Ensaio de falta de fase, ensaios de variação dos ângulos de condução, alteração no *setpoint* de histerese e muitos outros podem ser executados através dessas funcionalidades. Outra grande vantagem da plataforma é a possibilidade de alterar os parâmetros citados de forma programática, abrindo uma gama de possibilidades de controle, como o controle de conjugado por meio da regulação da corrente. Essa tarefa que pode ser cumprida de forma fácil, considerando que o conjugado médio é mensurado e o *setpoint* de histerese é facilmente alterado em tempo real. Durante a execução, as formas de onda são exibidas na interface também em tempo real, possibilitando visualizar as mudanças quase instantaneamente e salvá-las para coleta de resultados.

Para demonstrar a versatilidade da plataforma, foram acrescentadas funcionalidades depois que o acionamento em malha aberta havia sido aplicado. As características adicionadas permitiram controlar a velocidade do motor em malha fechada e aplicar um estimador de conjugado desenvolvido por Fidelis *et al.* (2022), estimando indutância, conjugado eletromagnético e fluxo magnético.

3.2 Descrição dos elementos físicos da Plataforma de Instrumentação Virtual

Como definido no Capítulo 2, o sistema de acionamento tradicional de um MRV é composto por uma fonte de alimentação, conversor de potência e um controlador. Todos esses elementos estão presentes na plataforma de instrumentação virtual e podem ser encontrados na Figura 3.2, que apresenta a visão geral da plataforma, a qual destaca os principais componentes que a integram.

Figura 3.2 – Visão geral da Plataforma de Instrumentação Virtual implementada no trabalho.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os componentes têm diferentes funções dentro sistema de acionamento do MRV e dentro do monitoramento realizado durante sua operação. A Figura 3-2 enumera 11 elementos da plataforma de instrumentação virtual, os quais estão listados e identificados abaixo:

1. Motor a relutância variável 8/6.
2. Máquina de corrente contínua pertencente ao simulador de carga mecânica.
3. Computador com o LabVIEW instalado.
4. Fonte de alimentação programável.

5. Módulos de sensores de corrente e tensão.
6. Conversor de potência e isoladores *gatedrives*.
7. Banco de resistência pertencente ao simulador de carga mecânica.
8. Encoder absoluto.
9. Torquímetro.
10. Conversores de níveis digitais.
11. NI myRIO 1900.

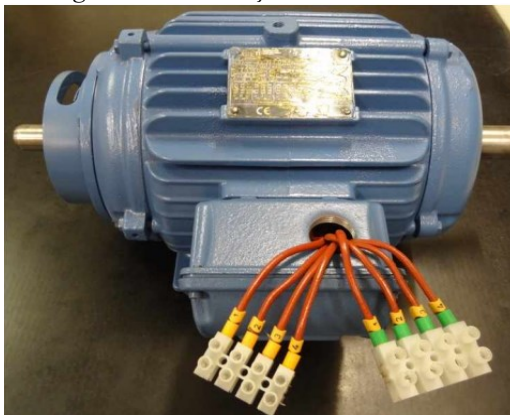
Os principais elementos que foram citados e que compõem a plataforma são detalhados nas subseções abaixo, descrevendo suas características operacionais e a sua importância no acionamento ou na aquisição de sinais.

3.2.1 Máquina a Relutância Variável 8/6

A Máquina a Relutância Variável que compõem a plataforma foi projetada, simulada e confeccionada no Laboratório de Acionamentos Elétricos da UFU. Os parâmetros de projeto usados para criar o MRV real, dispostos em Bianchi e Andrade (2012), mostram que essa é uma máquina 8/6 tetrafásica, que apresenta potência nominal de 3 cv (2,2 kW), corrente nominal de 10 A e velocidade nominal de 3500 rpm.

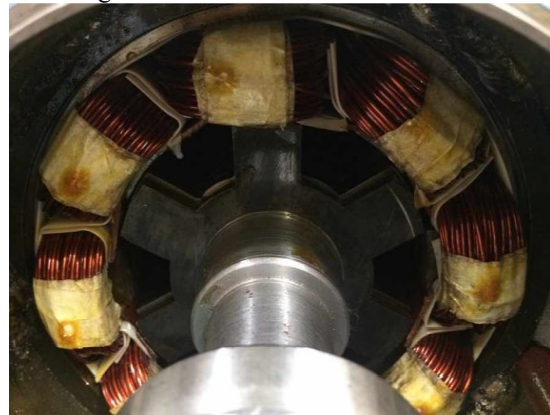
A construção do MRV 8/6 empregado na plataforma foi realizada por Moraes Filho (2017), o qual pode ser visualizado na Figura 3.3, em que se observa o uso da carcaça de uma máquina de indução para abrigar o motor. O rotor e o estator, bem como os enrolamentos do MRV, podem ser vistos na Figura 3.4, nela é possível identificar os oito polos do estator, cada um com seu enrolamento, e os 6 polos do rotor, formando assim, a relação 8/6 da máquina.

Figura 3.3 – Carcaça do motor MRV.



Fonte: Moraes Filho (2017).

Figura 3.4 – Estator e Rotor da MRV.



Fonte: Moraes Filho (2017).

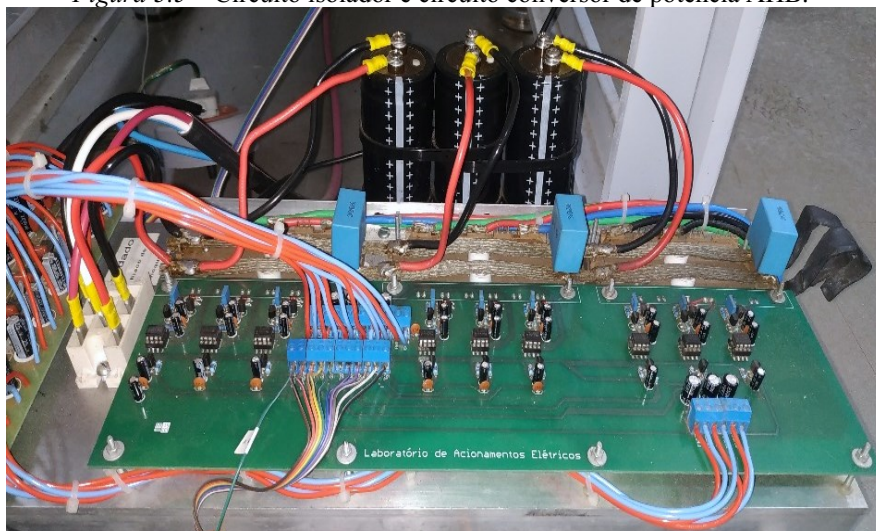
As características construtivas são primordiais para análise e projeto do controle de acionamento, pois a determinação dos ângulos de sobreposição do rotor ao estator definem o momento de excitação de cada uma das fases. Desse modo, o MRV foi construído para que os ângulos de condução de cada fase fossem iguais a 15° mecânicos, fazendo com que o perfil de indutância fosse repetido a cada 60° .

3.2.2 *Conversor de Potência e Isolador*

O conversor de potência possibilita a excitação de cada fase no momento requerido pelo controle de acionamento, como abordado na seção anterior. O modelo de conversor utilizado é do tipo meia ponte assimétrica, o qual permite operação em modo de magnetização, de roda-livre e de desmagnetização. O conversor de potência apresenta alta robustez, suportando tensões coletor-emissor de 600 V, corrente contínua de 100 A e correntes de pico de até 200 A. Por ser destinado ao acionamento de uma máquina tetrafásica, foi construído através do fechamento de três módulos IGBTs, tal arranjo possibilitou a existência de um braço extra, não utilizado no conversor, operando como reserva.

A Figura 3.5 mostra a placa do circuito isolador que possibilita a conexão do sinal de *gate* ao conversor de potência formado pelas pastilhas IGBT.

Figura 3.5 – Circuito isolador e circuito conversor de potência AHB.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para acionar as chaves controladas do conversor é necessário um sinal isolado com referência distinta para cada uma das chaves, referenciando o sinal de *gate* em relação ao emissor de cada IGBT. Além disso, é necessário o interfaceamento entre o sinal de disparo de

3,3 V fornecido pelo microcontrolador com os 15 V necessários para operar o IGBT. Para tal tarefa, foi utilizado um circuito isolador baseado em opto-acopladores. Em busca de garantir uma fonte de tensão isolada de 15 V para o controle de cada uma das chaves do conversor, foi utilizado um transformador 220 V/18 V com nove saídas, as quais são retificadas e reguladas em 15 V/1 A contínuos.

3.2.3 Fonte de tensão programável

Com a finalidade de fornecer tensão CA trifásica para alimentação do MRV, é utilizado a fonte programável CSW550, Figura 3.6, a qual é retificada e conectada ao conversor em meia ponte assimétrica. A fonte utilizada é um equipamento de alta eficiência que fornece saída precisa, com baixa distorção. Permite operar com tensões CC e CA, com intervalo de 0-156 Vrms fase-neutro e tem corrente de saída máxima de 32,16 A por fase.

Figura 3.6 – Fonte de tensão programável CSW550.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

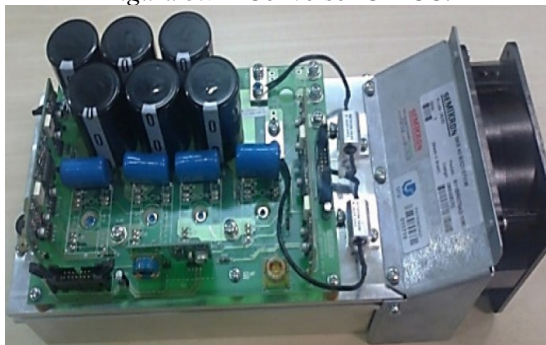
A programação do valor das tensões de saída da fonte pode ser feita através do teclado do painel frontal ou por meio do software disponibilizado pelo fabricante. Também é oferecido *drives* que permitem a conexão e controle da fonte por meio do LabVIEW, possibilitando a sua integração ao instrumento virtual desenvolvido, conectando a fonte ao computador por meio de saídas GPIB, RS232 ou USB.

3.2.4 Simulador de Carga

A estrutura do simulador de carga foi desenvolvida por Silva (2015), e tem a capacidade de impor cargas mecânicas no rotor das máquinas elétricas sob análise. Esse é um elemento importante que foi agregado à plataforma de instrumentação virtual, pois permite acionar o MRV em condições de funcionamento mais próximas das reais. A composição do mesmo se dá por uma máquina de corrente contínua, uma placa geradora de sinal PWM, um conversor CA/CC e um banco de resistência.

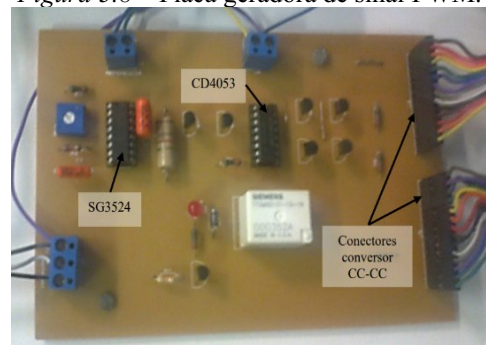
A máquina de corrente contínua pode ser acionada como motor ou gerador com excitação independente, variando a imposição de conjugado no eixo através do controle da corrente de armadura. O controle é feito utilizando o conversor CA/CC (Figura 3.7) e o banco de resistência. A operação do conversor é realizada através de um potenciômetro que controla o *duty-cycle* do PWM gerado pela placa indicada na Figura 3.8.

Figura 3.7 – Conversor CA-CC.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

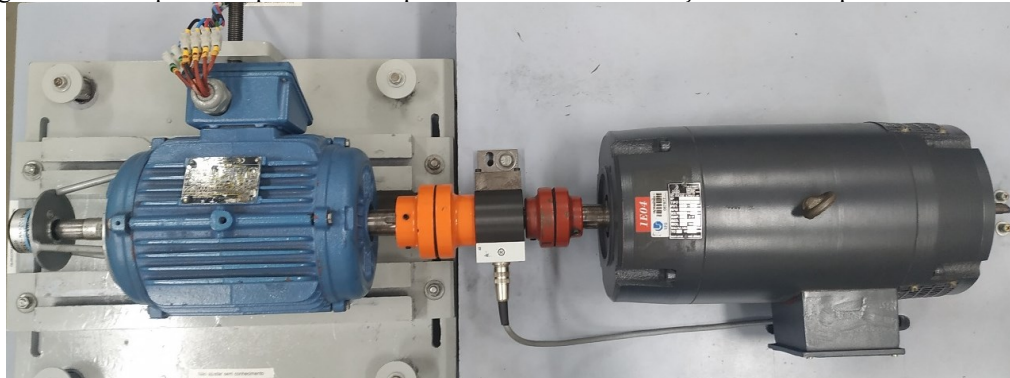
Figura 3.8 – Placa geradora de sinal PWM.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na plataforma de instrumentação virtual, a máquina CC permanece fixamente acoplada ao eixo do MRV 8/6, como mostrado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Máquina CC pertencente a plataforma de instrumentação virtual acoplada ao MRV 8/6.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A máquina CC empregada apresenta os seguintes dados de placa: tensão de armadura de 180 V; tensão de campo de 180 V; corrente nominal de 20,4 A; potência nominal de 4,5 CV/ 3,3 kW; velocidade nominal de 3600 rpm. Características que são condizentes com o MRV 8/6 a ser ensaiado, possibilitando o fornecimento de cargas acima das nominais para eventuais testes. Como carga acoplada ao eixo do MRV, a máquina elétrica de corrente contínua foi utilizada operando no modo gerador. Além disso, uma carga puramente resistiva foi conectada à armadura da máquina CC.

3.2.5 NI-myRIO 1900

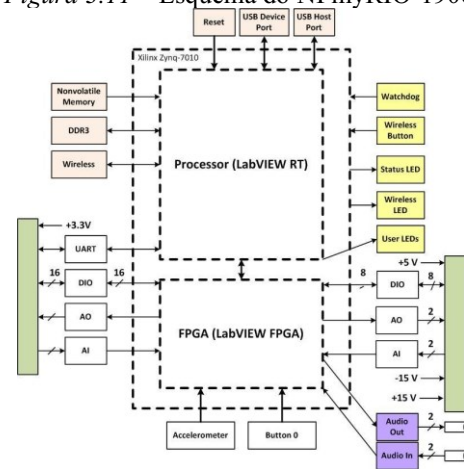
O controlador responsável pela lógica de acionamento e controle do motor é visto na Figura 3-10, sendo esse, um dispositivo embarcado produzido e comercializado pela National Instruments (NI) chamado NI myRIO-1900. Segundo a National Instruments (2013), o myRIO-1900 é um dispositivo portátil de entradas e saídas configuráveis que pode ser usado para projetar sistemas de controle, robótica e mecatrônica.

Figura 3.10 – NI myRIO-1900.



Fonte: Fidelis (2018).

Figura 3.11 – Esquema do NI myRIO-1900.



Fonte: National Instruments (2013).

Como pode ser visto na Figura 3.11, o NI MyRIO-1900 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 com um Clock onboard de 40 a 76 MHz, conhecido como LabVIEW FPGA. Ambos com acesso à mesma unidade de memória e aos conectores de entrada/saída.

O NI myRIO-1900 apresenta três conectores que contém entradas analógicas (AI), saídas analógicas (AO), entradas e saídas digitais (DIO), entradas e saídas de áudio, e algumas

saídas com funções específicas. Em suma, 10 entradas analógicas operando a 500 kS/s, 06 saídas analógicas operando a 345 kS/s e 40 linhas de entrada e saída digital operando a 50 MS/s. Ainda, o NI myRIO-1900 tem barramentos de conexão com o computador via USB e wireless 802.11bgn.

3.2.6 Transdutor de posição angular

O encoder tem função de detectar a posição dos polos do rotor em relação aos polos do estator. Além disso, com a medição da posição instantânea do eixo do motor, pode-se também estimar a velocidade média de rotação, derivando a posição no tempo. O modelo do Encoder absoluto utilizado foi o TRD-NA1024NW, registrado na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Encoder Absoluto TRD-NA1024NW.

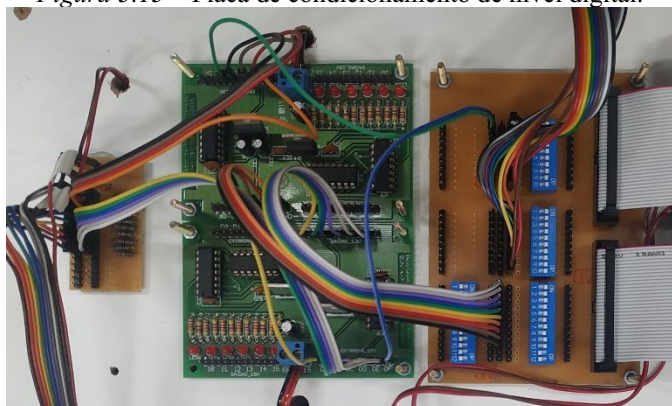


Fonte: Moraes Filho (2017).

As principais características do Encoder Absoluto mostrado na Figura 3.12 são: resolução de 10 Bits, equivalente a $0,351^\circ$ graus mecânicos; saída no formato de código Gray, o que reduz os erros de leitura para velocidades elevadas; contagem incrementada no sentido horário e decrementada no sentido anti-horário; velocidade máxima contínua de 3000 rpm; velocidade máxima instantânea de 5000 rpm.

O Encoder tem saída com coletor aberto a 10 fios, referentes aos 10 bits do sinal de posição. Para possibilitar a conexão do Encoder ao controlador usado foi necessário confeccionar uma placa com resistores pull-up, mostrada na Figura 3.13. Para interfacear a tensão de 15 V de saída do Encoder com os 3,3 V de entrada do myRIO, foi utilizado uma placa de condicionamento de nível digital.

Figura 3.13 – Placa de condicionamento de nível digital.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.2.7 Transdutor de tensão e corrente

As medições dos sinais de tensão e corrente (por fase e do barramento CC) são úteis para análise do comportamento do MRV e monitoramento do seu acionamento. Também podem ser utilizados na aplicação de técnicas de controle da Máquina a Relutância Variável, como exemplo, o controle de corrente por histerese. Para adquirir tais sinais, foi empregado uma placa condicionadora construída a partir de dois sensores de efeito hall, o LV 20-P (tensão) e o LA 55-P (corrente), assim, sendo necessário um total de 5 placas para compor a plataforma.

Figura 3.14 – Placa condicionadora de sinais para medição de tensão e corrente.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A placa condicionadora de sinais está sendo mostrada na Figura 3.14, ela consegue medir tensão e corrente com módulo de 500 V e 25 A, respectivamente. Os sinais mensurados são condicionados para uma de saída de 0 a 3,3V, valores ideais para serem lidos pelo NI myRIO-1900.

3.2.8 Transdutor de conjugado

A medição de conjugado é outro parâmetro importante a ser mensurado para análise de um motor. Com isso, o transdutor de conjugado associado a plataforma está apresentado na Figura 3.15, o qual é do modelo HBM T22/100NM. Esse transdutor é capaz de medir conjugado dinâmico e estático, possui fundo de escala de até 50 N. m (positivo ou negativo) e produz na saída um sinal de tensão CC de -5 V a $+5\text{ V}$, proporcional ao conjugado.

Figura 3.15 – Transdutor de conjugado T22/100NM da HBM.



Fonte: Oliveira (2018).

O transdutor de torque está conectado entre a máquina CC do simulador de carga e o MRV 8/6, medindo o conjugado no lado do MRV 8/6. A conexão mecânica é realizada com o uso de acopladores especiais, permitindo o encaixe correto entre os eixos, de acordo com os limites impostos pelo Torquímetro. Além disso, para leitura do transdutor de torque mostrado é necessário a utilização de uma caixa de junção que condiciona o sinal lido, HBM VK20A.

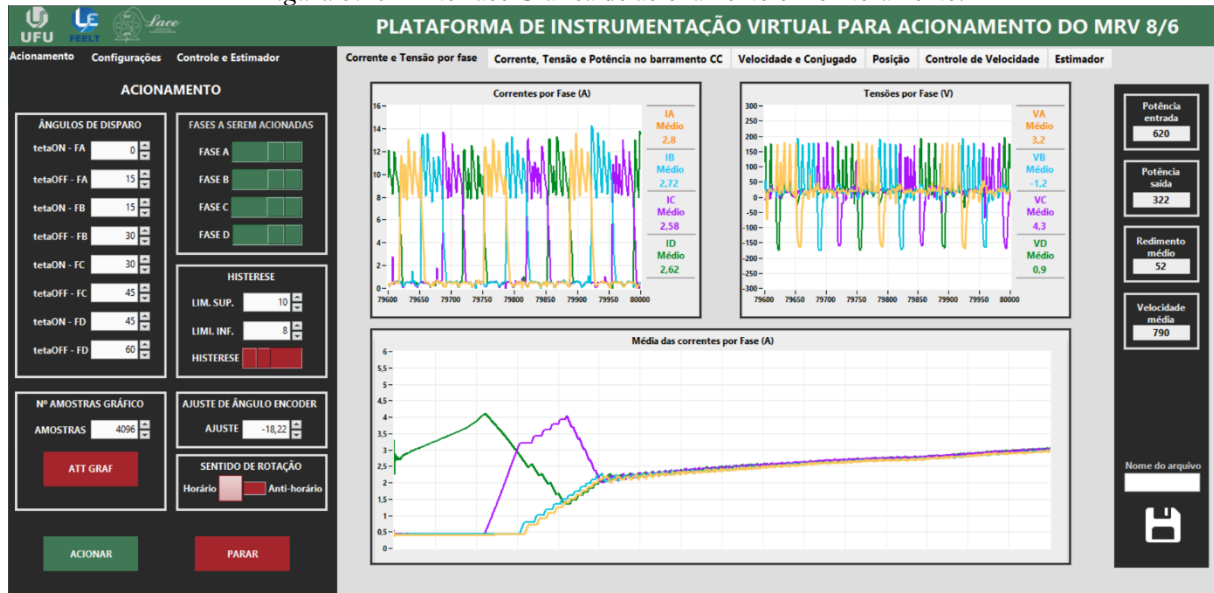
3.3 Descrição do *software* da Plataforma de Instrumentação Virtual

A proposta do trabalho implicou no desenvolvimento de um instrumento virtual que agrupasse todas as funcionalidades (acionamento, controle e monitoração) em um único ambiente amigável ao usuário, intuitivo e de simples manuseio. Além disso, o instrumento virtual foi desenvolvido de forma modular, garantindo a possibilidade de acrescentar novas características à plataforma de forma descomplicada.

Para tal, foi criado um *software* em LabVIEW que possibilitasse a comunicação entre o Computador e o NI myRIO-1900, permitindo manipular os parâmetros de acionamento e visualizar as grandezas importantes em tempo real. A Figura 3.16 apresenta a interface de

usuário implementada. A interface é composta pelo menu lateral esquerdo, por uma janela central que abriga os gráficos com as formas de onda coletadas pelo sistema de aquisição de dados e por uma janela lateral direita com medições relevantes.

Figura 3.16 – Interface Gráfica de acionamento e monitoramento.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O menu lateral abriga os controles que possibilitam alterar os parâmetros do acionamento, destacando-se:

- Acionar/ Desacionar o MRV.
- Seleção na interface de quais fases serão acionadas.
- Ativar/Desativar o controle de corrente por Histerese, assim como, definir a banda de corrente do controle.
- Definição dos ângulos de disparo de cada uma das fases.
- Escolher o sentido de rotação do MRV, horário ou anti-horário.
- Determinar as configurações e valor de saída de tensão trifásica da fonte programável.

Também é possível alterar características da aquisição de dados: número de amostras coletadas, os valores de calibração do estimador de velocidade e os valores de calibração dos transdutores de tensão, corrente e conjugado. Na janela central estão alocados os gráficos que mostram os sinais coletados e calculados. Em vista da quantidade de gráficos e em busca de manter a melhor visualização possível na tela, eles foram divididos em diferentes abas.

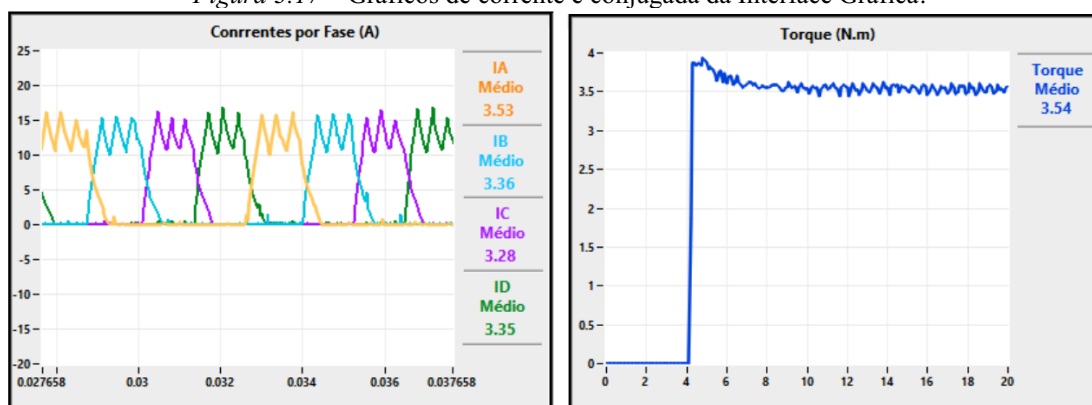
Os sinais expostos na interface são: corrente fase do MRV e do barramento CC, tensão de fase do MRV e do barramento CC, média das correntes de fase, sinais de *gate* enviados ao conversor AHB, potência no barramento CC (potência de entrada), posição do rotor, estimativa

da velocidade, conjugado médio, potência elétrica de saída, rendimento, estimativa da indutância e estimativa do conjugado elétrico do MRV.

Na janela lateral direita foi implementado um ambiente com as medições mais relevantes ao acionamento (velocidade média, conjugado médio, corrente de fase média), a qual permanece sobreposta às abas com os gráficos. Nessa mesma janela, está localizado a ferramenta que possibilita salvar os gráficos em tempo real, em formato .csv ou .txt, podendo ser aberto como planilha e/ou documento de texto, e em formato de imagem .bmp.

Destaca-se, ainda, a preocupação com a experiência do usuário no supervisor criado, de maneira que a estruturação da interface foi baseada em *softwares* já conceituados. Um exemplo a ser citado foi a forma em que os aspectos visuais dos gráficos foram criados, sendo utilizada como referência a interface gráfica dos osciloscópios. Desse modo, em cada gráfico é mostrado, no lado direito, os valores médios dos sinais amostrados, como revela a Figura 3.17.

Figura 3.17 – Gráficos de corrente e conjugada da Interface Gráfica.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.3.1 Estratégia de acionamento do MRV

A estratégia empregada para o acionamento do Motor a Relutância Variável 8/6 é parte fundamental da plataforma de instrumentação virtual. Este trabalho contemplou o acionamento do motor considerando a energização das fases na posição angular adequada e na implementação do regulador de corrente via histerese, sem adição de nenhum controle intrínseco a plataforma (sendo agregado posteriormente). A lógica básica da plataforma foi codificada e executada por meio do núcleo FPGA do controlador, em vista de permitir que novas metodologias ou estratégias de controle possam ser aplicadas e testadas em pesquisas futuras, de forma acessível através do outro núcleo do myRIO-1900, ou mesmo pelo computador. Isto possibilita diminuir o tempo gasto com o projeto, o desenvolvimento e a

programação do acionamento básico, e aplicá-lo nos estudos das novas tecnologias a respeito do MRV.

Portanto, a lógica de acionamento implementada é baseada na motorização do MaRV, o que consiste na excitação das respectivas fases no instante em que a indutância tem incremento positivo. Isso é feito pela plataforma de forma integrada, em que se tem uma função responsável pelo acionamento que recebe como entrada as fases a serem acionadas, os ângulos de condução de cada fase e os *setpoints* do controle de corrente por histerese de cada fase. Como saída, a plataforma, por meio do conversor AHB, energiza as fases do MRV, de acordo com as entradas fornecidas e a posição angular lida pelo transdutor. Além disso, são fornecidas inúmeras medições de sinais que podem ser enviadas para o computador ou para o núcleo RT do myRIO-1900. A Figura 3.18 representa o acionamento, relacionando quais são as variáveis de entrada e de saída.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os dados de entrada podem ser fornecidos manualmente pelo operador, utilizando a interface gráfica no computador. Entretanto, também é possível fornecer como entrada os valores resultantes da aplicação de alguma lógica ou controle, por exemplo: controlar a velocidade do motor pelos *setpoints* de histerese ou pelos ângulos de condução, conforme a medição da velocidade atual da máquina.

Dentro do bloco de acionamento do MRV estão todos os processos que compõem o acionamento citado, em que se utiliza as grandezas adquiridas pelo transdutor de posição, de acordo com a entrada dos ângulos de condução, para controlar as chaves do conversor de potência (magnetização e desmagnetização). Quando o controle por histerese está ativado, as chaves também são controladas de acordo com a comparação entre as correntes de fase lidas e o *setpoint* de histerese (magnetização e roda livre). Toda a programação foi feita utilizando a linguagem gráfica LabVIEW, ressaltando que o acionamento foi implementado no núcleo

FPGA do myRIO e a interface foi implementada diretamente no Computador. Deixando assim, o processador RT do myRIO livre para futuras adições de funções.

3.3.2 Código alocado no FPGA do NI-myRIO-1900

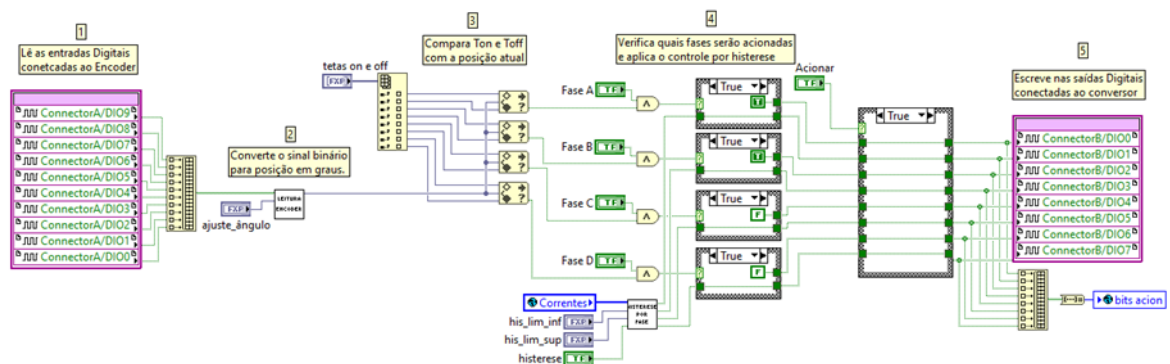
O NI myRIO-1900 é um dispositivo embarcado, portanto, a programação é convertida e salva na memória interna. Em seu núcleo FPGA, foi implementado o código responsável por acionar o motor e adquirir os sinais de corrente, tensão, posição e torque. A conexão ao computador foi realizada via barramento USB, possibilitando enviar as variáveis de controle do computador ao myRIO e enviar os sinais coletados dos transdutores do myRIO ao computador.

O núcleo FPGA foi escolhido para implementação do acionamento devido à alta capacidade de processamento de informações, operando em uma velocidade maior do que o núcleo RT do myRIO. Por esse mesmo motivo, também foi escolhido para a coleta dos sinais, visando obter uma maior taxa de amostragem e manter a integridade dos sinais coletados.

Portanto, dentro do FPGA foram alocados dois processos que são executados de forma paralela e assíncrona. Em uma estrutura de repetição é processado o acionamento a uma taxa de 100 kHz, e em outra, é processada a aquisição dos sinais analógicos a uma taxa de 40 kHz. Apesar de serem processos separados, existe a necessidade de comunicação entre eles para transferência de dados, isso foi implementado com o uso de variáveis globais.

O código em LabVIEW, embarcado no FPGA do NI myRIO-1900, referente ao procedimento de acionamento do MRV está exibido na Figura 3.19.

Figura 3.19 – Código em LabVIEW executado no FPGA para acionamento do MRV.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O código mostrado na Figura 3.19 está dentro de um *while loop* com condição de parada definida através de um botão, que quando pressionado, finaliza a execução. Pode-se apontar os seguintes processos executados, através de funções e subfunções, que permitem realizar o acionamento do motor:

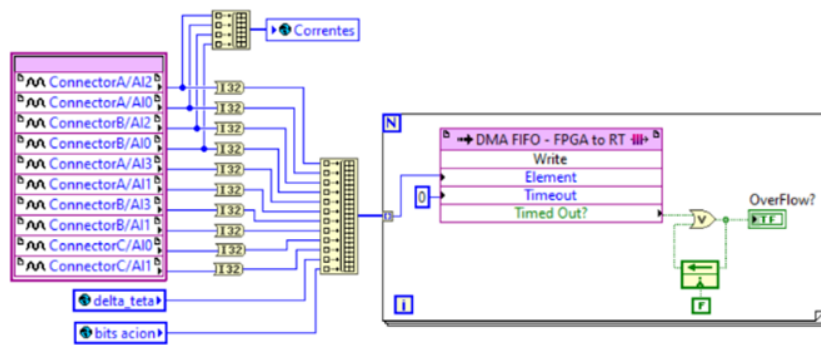
- 1) leitura das 10 portas digitais do NI myRIO-1900 em que o Encoder absoluto está conectado;
- 2) conversão do sinal digital recebido em código gray para posição em graus;
- 3) comparação da posição angular do rotor com os intervalos angulares de excitação de cada fase fornecidos;
- 4) recebimento da corrente medida via variável global, comparação com os limites do controle de histerese e determinação do modo de operação do conversor de potência (magnetização ou roda-livre);
- 5) definição da abertura das chaves do conversor baseado na posição do rotor, no controle por histerese e na definição de quais fases serão acionadas;
- 6) definir o nível lógico das 8 saídas digitais NI myRIO-1900 que estão conectadas ao *gatedrive*.

Fica clara a complexidade do acionamento do MRV ao analisar os procedimentos acima, sendo executadas diferentes tarefas sequencialmente e simultaneamente, para excitar cada fase no momento correto. Fato que justifica o uso de um processamento em tempo real robusto que execute tantas funções em um pequeno espaço de tempo, como foi possível com o núcleo FPGA do myRIO.

Como descrito no procedimento de acionamento, a aquisição da posição angular através da leitura das entradas digitais é realizada dentro do *loop* de acionamento. Essa é uma informação relevante a ser transmitida para fora do FPGA, juntamente com os sinais de *gate* enviados ao conversor. Para que fosse possível transmitir esses dados para o PC ou para o núcleo RT, foi necessário enviar estas informações para o *loop* de aquisição e comunicação.

Além disso, durante o acionamento, existe a necessidade do conhecimento em tempo real do módulo das correntes para implementação do controle por histerese. Como a corrente é adquirida no outro *loop*, faz-se necessário transmiti-la. A aquisição dos sinais e a transmissão dos dados é realizada pelo código mostrado na Figura 3.20.

Figura 3.20 – Código em LabVIEW executado no FPGA para aquisição de dados.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O código apresentado acima pode ser dividido em duas partes: na aquisição dos sinais e na transmissão dos sinais via *Direct Memory Access* (DMA). Todas as 11 entradas analógicas disponíveis no myRIO-1900 foram usadas para a leitura das quatro correntes de fase, das quatro tensões de fase, da corrente do barramento CC, da tensão do barramento CC e conjugado.

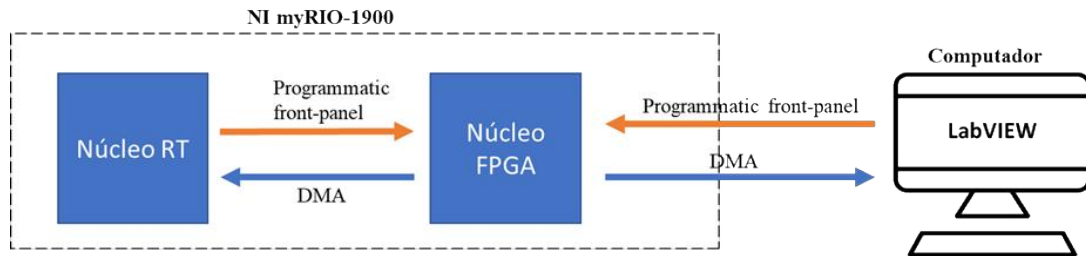
Para o envio de dados do núcleo FPGA para o núcleo RT ou mesmo, para o computador (conectado via USB ou WI-FI) foi utilizado um canal DMA. Esse tipo de comunicação é recomendado para transferência de dados em alto rendimento, em que é transmitido em velocidade alta um grande volume de informações. O DMA comunica de forma unidirecional e consiste em dois buffers *First In First Out* (FIFO), um em cada ponta. Por utilizar buffers nos dois pontos, possibilita-se uma baixa taxa de informações perdidas, considerando que a transferência ocorre com um elemento por vez de modo que o primeiro elemento em um buffer é o primeiro elemento transferido para o outro buffer.

Portanto, visando a transferência de uma grande quantidade de dados (11 entradas analógicas, a posição angular e os *gates* de acionamento) com uma taxa de comunicação alta (40 kHz) em que a perda de informações deveria ser mínima, optou-se por utilizar canais DMA. Os canais foram configurados de modo que o buffer no lado do FPGA fosse de 2047 amostras, o tipo de dado utilizado fosse inteiro de 32 bits e que esses dados não fossem arbitrários.

A comunicação do computador ao FPGA é realizada somente para envio de comandos, a exemplo os ângulos de condução de cada fase. Considerando que o volume de informações é pequeno e realizado de maneira esporádica, utilizou-se a comunicação conhecida como *Programmatic front-panel*, protocolo pertencente ao LabVIEW e dispositivos fabricados pela National Instruments. Nela, o computador opera os controles e lê os indicadores do painel frontal do VI principal do FPGA remotamente (fora do núcleo FPGA), transferindo as alterações através da função “*Read/Write Control*”. Uma característica importante desse protocolo é que somente o último valor enviado é armazenado.

A Figura 3.21 ilustra os protocolos de comunicação discutidos e que foram empregados entre os núcleos de processamento da plataforma de instrumentação virtual.

Figura 3.21 – Diagrama dos protocolos de comunicação entre o computador e o NI myRIO-1900.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Todo o procedimento de acionamento ocorre no FPGA do NI myRIO-1900, durante o desenvolvimento da plataforma foram adotados processos que possibilitaram a comunicação com o núcleo. Portanto, é possível enviar comandos e receber os pontos coletados em tempo real, tendo disponível para o PC ou mesmo, no núcleo RT, os meios necessários para aplicação de controles ou métodos que utilizam dos dados coletados.

3.3.3 Código alocado no Computador

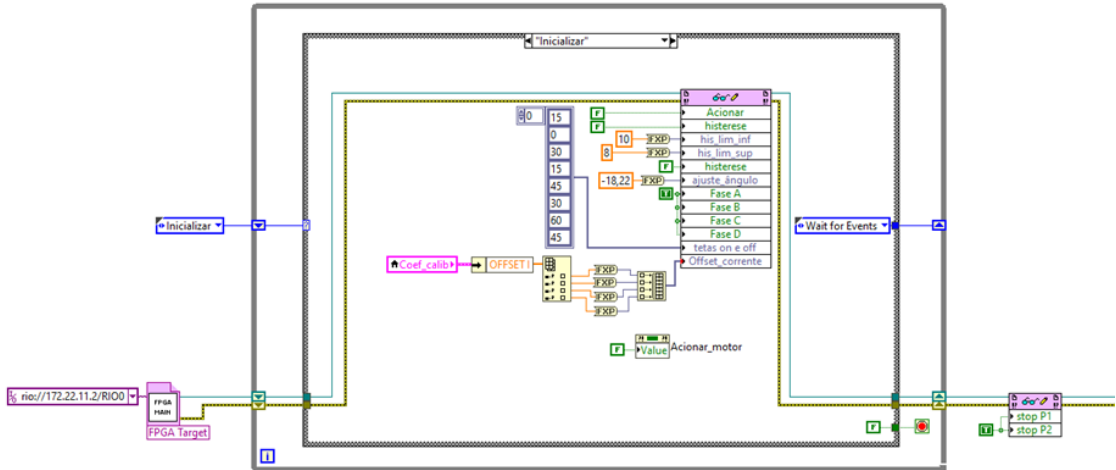
Por ser desenvolvido na linguagem LabVIEW, mesma linguagem utilizada na programação do DSP/FPGA, o supervisor se torna uma ferramenta fundamental para o acionamento e controle. A interface é totalmente configurável e flexível à necessidade de mudanças no algoritmo de acionamento, tornando-se uma vantagem significativa no estudo, interpretação e registro dos eventos ocorridos durante os ensaios realizados.

Assim, o código no computador tem função de prover a interface de usuário, enviando ao FPGA os dados de entrada/saída dos controles dispostos na interface, além de receber os sinais adquiridos pelo myRIO, junto ao sistema de aquisição, para fornecer supervisão ao usuário. Além disso, é feito o processamento das informações não impactantes ao acionamento, como por exemplo, cálculo das potências de entrada.

O *software* executado no lado do computador foi dividido em duas partes, executadas em paralelo e de forma assíncrona. Uma das partes é responsável pelo gerenciamento da interface do usuário e o envio dos controles do PC ao FPGA. A outra parte é responsável pelo recebimento dos dados vindos do FPGA do myRIO através da comunicação DMA, assim como realizar o tratamento dos dados, incluindo todos os cálculos necessários. Também é responsável

por exibir graficamente as informações na interface. O código em LabVIEW com a função do gerenciamento da interface pode ser visto na Figura 3.22.

Figura 3.22 – Código em LabVIEW executado no computador para gerenciamento da Interface Gráfica.



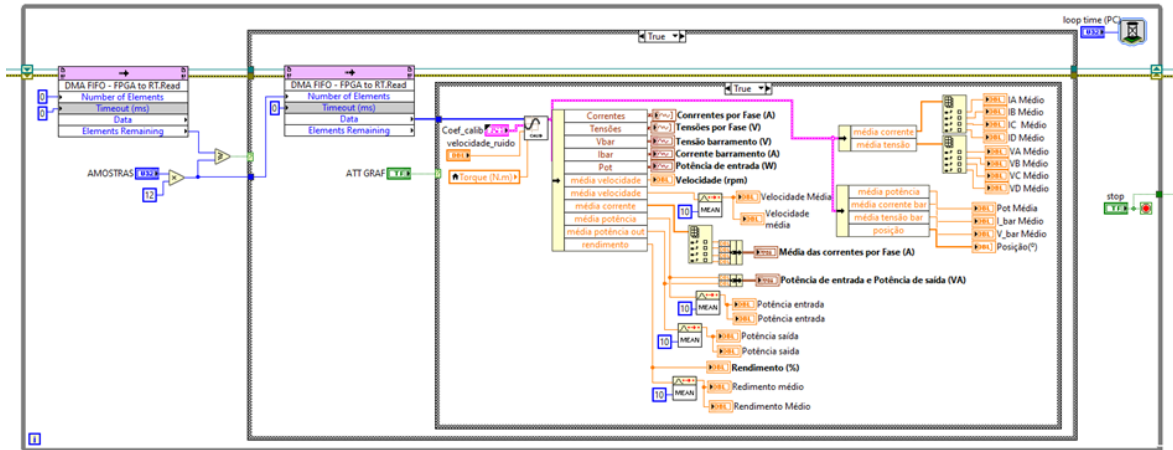
Fonte: Elaborado pelo Autor.

É visto na Figura 3.22 o padrão de projeto conhecido como Máquina de Estados, em que as ações solicitadas na Interface de Usuário são controladas por eventos que respondem às alterações de estados dos botões e controladores. Cada evento executado pela Máquina de Estados é relacionado a diferentes ações de acordo com o botão pressionado ou o controle alterado na interface gráfica. Como o processamento de acionamento ocorre no FPGA, os eventos foram utilizados para enviar os valores das variáveis de acionamento através da comunicação *Programmatic front-panel*, utilizando esse canal de comunicação somente quando for necessário, economizando recursos e processamento do Computador e do FPGA.

Uma função importante a ser destacada é a possibilidade de salvar as formas de ondas exibidas nos elementos gráficos em forma de tabela. A subfunção responsável é acionada por ao clicar no botão “SALVAR”, a qual escreve em um documento de texto separando por vírgula os valores atuais mostrados nos gráficos. O nome do arquivo é escolhido pelo usuário e é criado automaticamente na área de trabalho uma pasta com o arquivo em seu interior.

A Figura 3.23 mostra o código que recebe os dados do DMA no computador, permitindo configurar o buffer do DMA e configurar como as leituras serão efetuadas. Vale ressaltar que o buffer foi configurado para armazenar 200 mil amostras, impedindo que dados fossem perdidos, considerando que a velocidade de escrita no DMA através no FPGA é superior a velocidade de leitura do computador.

Figura 3.23 – Código em LabVIEW executado no Computador para aquisição de dados.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

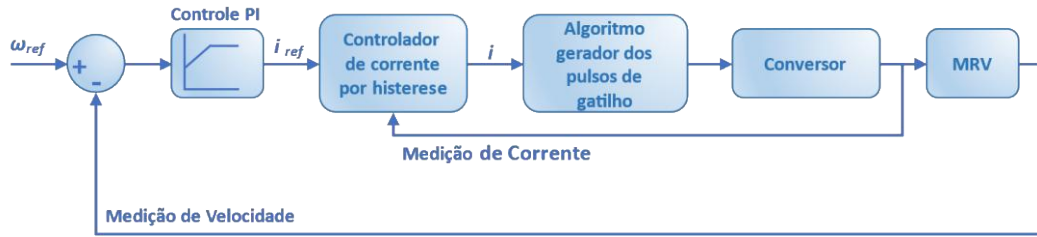
Após a leitura de uma quantidade fixa de amostras, esvaziando o buffer FIFO, as grandezas são tratadas e diversos cálculos são implementados dentro de uma subfunção mostrada na Figura 3.23. Os cálculos consistem nos valores médios das correntes e tensões, na estimativa da velocidade utilizando a posição angular, na potência de entrada no barramento CC, na potência de saída, entre outros. Com todas as grandezas calculadas, elas são enviadas para os indicadores e para os gráficos presentes na interface.

Por fim, com toda a estrutura física montada e com o *software* de acionamento desenvolvido permitindo acesso a todas as grandezas medidas no computador e no outro núcleo do controlador, para demonstrar a capacidade da plataforma em receber de maneira simplificada novas funcionalidades, foi implementado o controle de velocidade utilizando o regulador de corrente por histerese. Também, com as medições de posição e corrente já efetuadas pela plataforma, implementou-se um estimador de conjugado. A seguir é descrito de forma sucinta como as novas funcionalidades foram adicionadas.

3.4 Inserção do controle de velocidade

O motor a relutância variável tem uma série de vantagens para aplicações industriais, principalmente aquelas que requerem velocidade variável e alto conjugado. Dessa forma, o controle de velocidade torna-se interessante à muitas aplicações, sendo uma importante ferramenta a ser agregada à plataforma já desenvolvida. A Figura 3.22 ilustra o sistema de controle de velocidade atuando na corrente via controlador de histerese, para ângulos de condução e tensão de excitação constantes.

Figura 3.24 – Controle de velocidade para motores a relutância variável.

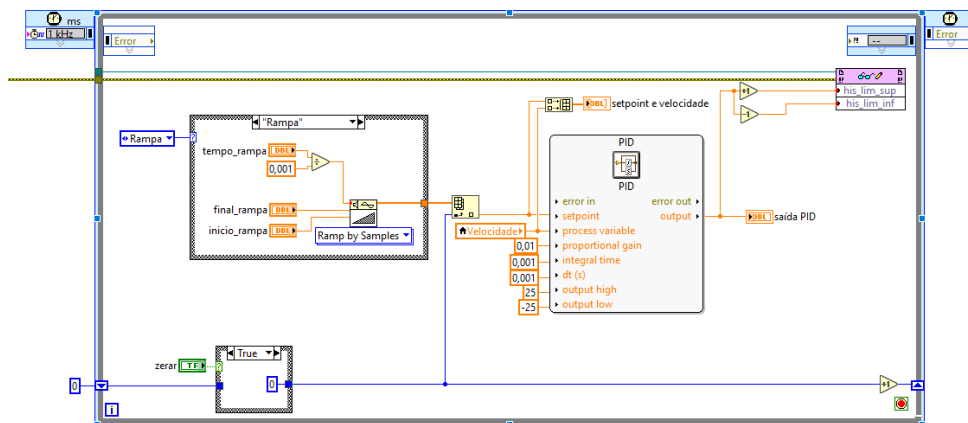


Fonte: Elaborado pelo Autor.

No controle exposto, a velocidade do MRV foi comparada a velocidade de referência e o erro foi obtido através dessa relação. O controlador PI produz corrente de referência que foi comparada com a corrente dos enrolamentos do motor, aplicando o sinal produzido como referência de corrente para um controlador de corrente de fase por histerese. De acordo com o *setpoint* de corrente definido pelo controlador por histerese, os pulsos de gatilho são gerados e enviados ao conversor. Dessa forma, a máquina poderá ser acionada como motor nas condições de velocidade impostas.

O acionamento do motor aplicando o controle de velocidade, regulando as correntes de fase do MRV 8/6, foi possível mediante a aplicação do controle por histerese presente no código base. Tendo, assim, como variável de processo a velocidade média e como variável de controle o *setpoint* do controlador de corrente por histerese. A Figura 4-63 mostra o código em LabVIEW aplicado para implementar o controlador PI do controle de velocidade.

Figura 3.25 – Código em LabVIEW para implementação do controle de velocidade no Computador.



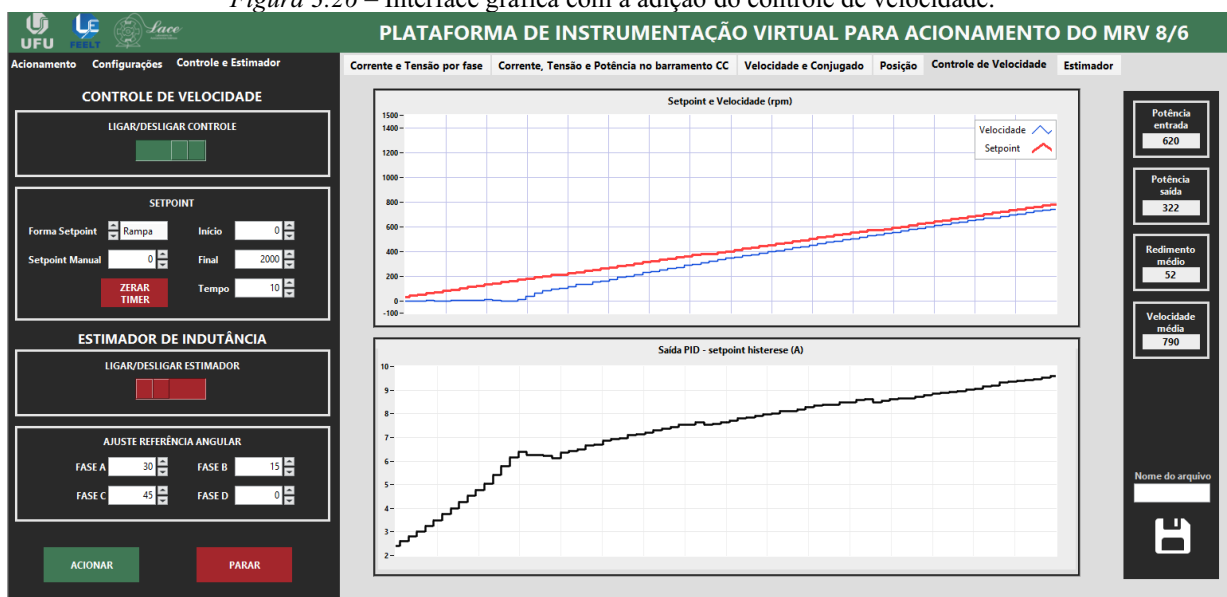
Fonte: Elaborado pelo Autor.

O controle de velocidade foi inserido sem nenhuma alteração no controlador do acionamento alocado no FPGA do NI myRIO 1900, núcleo em que o acionamento básico do MRV foi alocado. Como o controle de corrente por histerese e a leitura de velocidade já eram

parâmetros trabalhados no acionamento, foi possível empregar o controle de velocidade com a adição de poucos blocos de função no LabVIEW. De modo que, foi necessário adicionar ao código que opera no lado do computador somente a função “PID.vi”, responsável por implementar o controlador PI, que recebe como entrada: a variável de processo, os ganhos K_p e K_i , o *setpoint* e os limites da saída. A saída do controlador PI é comunicada ao FPGA com uma taxa de 2 kHz. Destaca-se que os ganhos do controlador PI foram ajustados empiricamente, de modo que, a variável controlada conseguisse seguir o *setpoint* aplicado.

Em vista de simplificar a operação em tempo real do controle de velocidade, foi incorporado à interface de usuário uma janela para manipulação dos parâmetros do controle. Além disso, em busca de possibilitar a análise das variáveis de controle, monitorando em tempo real, criaram-se gráficos para exibir a velocidade atual, o *setpoint* e a saída do controlador PI. A Figura 4.64 apresenta Interface de Usuário com a funcionalidade de controle de parâmetros e monitoramento do controle de velocidade inseridos.

Figura 3.26 – Interface gráfica com a adição do controle de velocidade.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.5 Inserção do estimador de conjugado

Além de demonstrar a simplicidade de adição de novas ferramentas, a inclusão do estimador de conjugado na plataforma de instrumentação virtual também foi um recurso muito proveitoso, possibilitando acesso a dados estimados de indutância, conjugado eletromagnético e fluxo magnético. O estimador utilizado foi apresentado e discutido no trabalho de Fidelis *et al.* (2022), em que foi desenvolvida uma nova metodologia para modelagem de curvas de

indutância de máquinas de relutância variável usando *splines* cúbicos baseados em polinômios da forma de Lagrange, possibilitando estimar a indutância instantânea e derivada da indutância em cada fase da máquina.

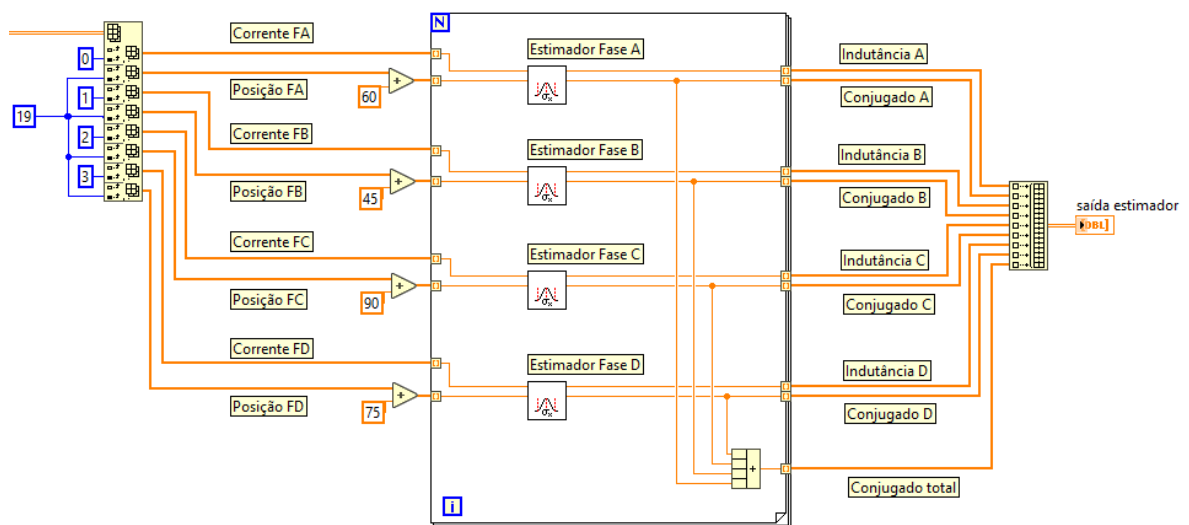
A metodologia desenvolvida no trabalho de Fidelis *et al.* (2022) consistiu em estabelecer uma função para o cálculo da indutância por meio de dois parâmetros de entrada, corrente de fase e a posição angular do rotor. Portanto, para aplicação embarcada, o estimador de conjugado foi sintetizado em uma função em LabVIEW, que requer como entrada os valores instantâneos de corrente e posição angular do rotor. Depois de aplicar o estimador, a função calcula e fornece a indutância estimada, o conjugado eletromagnético estimado e o fluxo estimado, para cada instante de tempo de entrada. A Figura 3.27 apresenta o diagrama do estimador e a Figura 3.28 apresenta o código em LabVIEW em que foi implementado o estimador de conjugado.

Figura 3.27 – Entradas e saídas do estimador de conjugado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

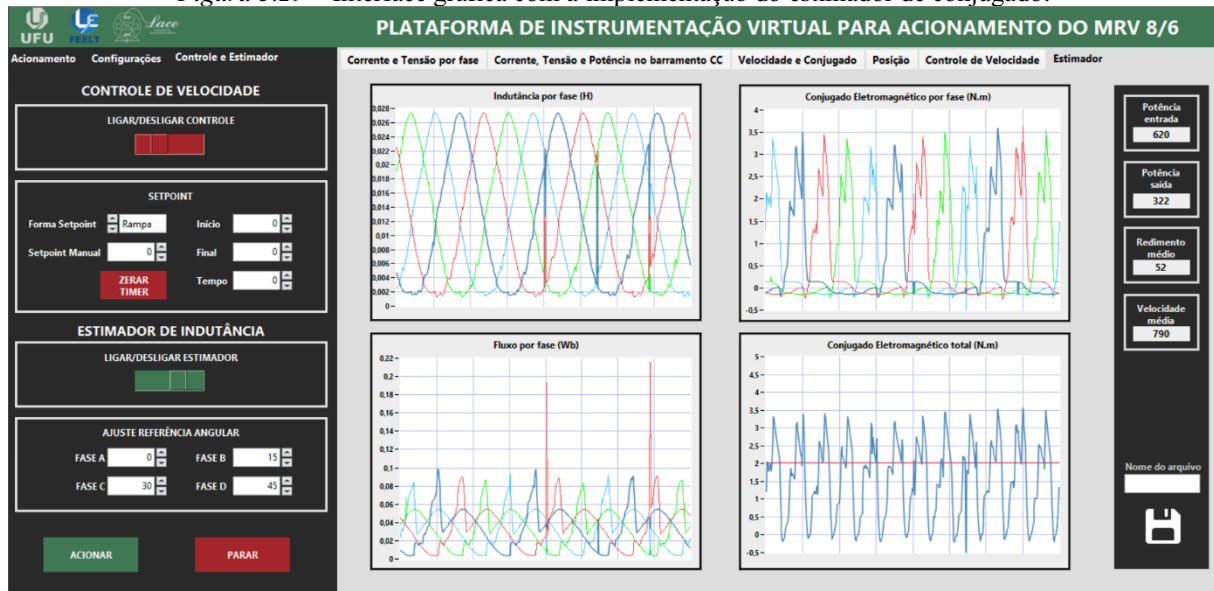
Figura 3.28 – Código em LabVIEW alocado no computador aplicando o estimador de conjugado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para acompanhar os resultados adquiridos por meio do estimador de conjugado, em tempo real, foi acrescentado à interface uma janela que exibe os gráficos da indutância, conjugado e fluxo estimado para cada uma das fases do MRV 8/6. A Figura 3.29 exibe a Interface Gráfica em LabVIEW adaptada para monitorar as grandezas do estimador.

Figura 3.29 – Interface gráfica com a implementação do estimador de conjugado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.6 Considerações Finais

O capítulo detalhou materiais e métodos utilizados para desenvolvimento e aprimoramento da plataforma de instrumentação virtual. Toda a construção física e a criação do *software* foram projetados de forma a executar o acionamento do MRV 8/6 e permitir monitorar as características desse acionamento em tempo real. De modo que, diante da necessidade de acréscimo de funcionalidades, é possível a aplicação acrescentando um novo módulo ao código já existente, possibilitando a análise das principais grandezas coletadas. Portanto, o núcleo RT do controlador está totalmente livre para armazenar códigos referentes a controles e/ou novas metodologias de estudos futuros. Além disso, através dos protocolos de comunicação detalhados, o núcleo RT recebe todas as grandes medidas pelo FPGA, bem como, consegue enviar as informações de controle de acionamento. Portanto, para exemplificar a possibilidade de acréscimo de novos processos, nesse capítulo foi apresentada a adição do controle de velocidade em malha fechada e a aplicação do estimador de conjugado.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Considerações iniciais

Com a montagem da plataforma de instrumentação virtual concluída, realizaram-se ensaios experimentais em vista de demonstrar a capacidade da plataforma e seu modo de operação. Os dados experimentais coletados serão mostrados e discutido nesta seção. Os testes implementados tratam da análise em regime permanente de uma Máquina a Relutância Variável 8/6 atuando como motor. Com isso, a presente seção tem como objetivo realizar ensaios de:

- 1) Validação do sistema de medição em comparação aos instrumentos convencionais.
- 2) Variação da tensão de entrada.
- 3) Variação dos ângulos de disparo.
- 4) Variação do *setpoint* de histerese.
- 5) Variação de fases em falta.
- 6) Controle de velocidade.
- 7) Aplicação do Estimador de conjugado.

Portanto, os principais objetivos da etapa experimental foram validar a plataforma proposta, acionamento e aquisição de dados; comprovar a atuação do controle de corrente por histerese; obter perfis de algumas grandezas do MRV 8/6 para as diferentes situações propostas, tais como: corrente, torque e potência; testar as funcionalidades adicionais: o controle de velocidade e estimador de conjugado.

4.2 Ensaios na plataforma comparados aos instrumentos convencionais

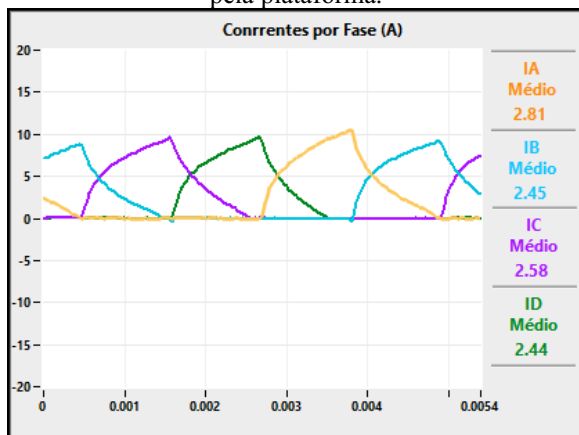
Este ensaio buscou demonstrar a capacidade da plataforma de instrumentação virtual em acionar o MRV 8/6 e validar o sistema de aquisição de dados da plataforma. Para isso, durante os ensaios, foram utilizados instrumentos convencionais para comparação dos dados aquisitados, sendo estes, três osciloscópios para medição de tensão e corrente, e um tacômetro para medição da velocidade. Com o foco em validar os resultados foram executados dois ensaios, os quais foram constituídos pelo acionamento do motor a relutância variável 8/6 em duas diferentes condições. Em ambos os ensaios todas as 4 fases foram acionadas e os ângulos de condução mantiveram-se em 15°, de forma que não houvesse sobreposição de fases. Com

isso, os dados coletados (tensão, corrente, velocidade, torque e potência) em cada um dos ensaios estão descritos e discutidos abaixo.

4.2.1 Ensaio 1

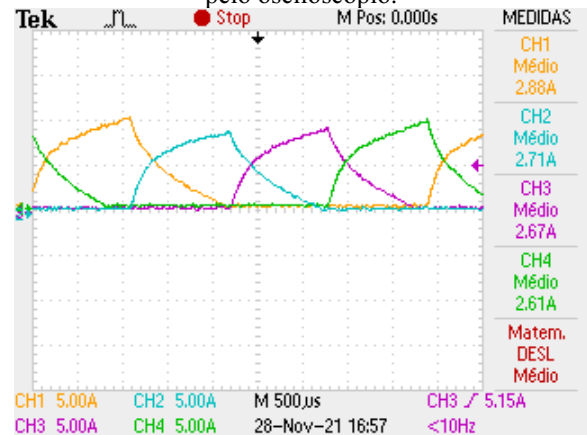
O primeiro ensaio consistiu no acionamento do MRV sem o controle de corrente por histerese. Neste, foi imposto no barramento CC aproximadamente 150 V, resultando nas correntes de fase em regime permanente exibidas na Figura 4.1 (plataforma de instrumentação virtual) e na Figura 4.2 (osciloscópio).

Figura 4.1 – Correntes de fase do MRV 8/6 medidas pela plataforma.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 4.2 – Correntes de fase do MRV 8/6 medidas pelo osciloscópio.

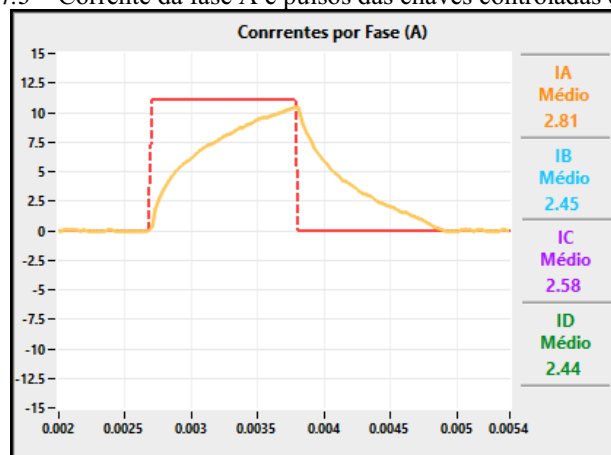


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Ao confrontar os sinais de corrente, fica evidente que o sistema de aquisição de dados da plataforma foi bem dimensionado e calibrado, apresentando forma de onda semelhante às correntes de fase vistas no osciloscópio. Analisando a Figura 4.1, nota-se que a amplitude de corrente da Fase A só começa a aumentar a partir do instante em que a corrente da fase excitada anteriormente, Fase D, começa a decair. Esse efeito também foi visto em todas as correntes de fase, respeitando a seguinte sequência de acionamento: Fase A, Fase B, Fase C e Fase D. Assim, a excitação das fases apenas está ocorrendo no momento referente aos ângulos de condução, não havendo sobreposição de fases.

Na Figura 4.3 pode-se ver a relação entre a corrente na Fase A e o pulso de acionamento das chaves controladas.

Figura 4.3 – Corrente da fase A e pulsos das chaves controladas da fase A.

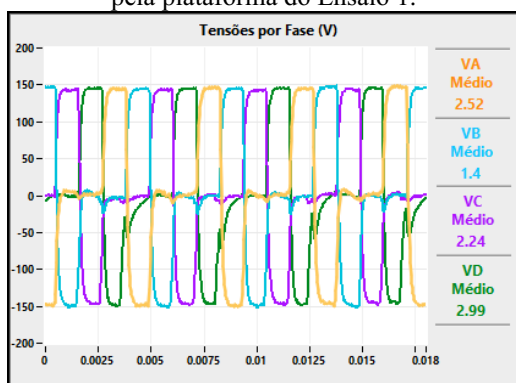


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como o controle de corrente por histerese esteve desabilitado neste ensaio, as duas chaves controladas são mantidas fechadas durante a magnetização da fase e mantidas abertas na desmagnetização. Logo, como indica a Figura 4.3, ao fechar as chaves da Fase A no respectivo braço do conversor (sinal lógico alto), a corrente apresenta perfil crescente até o fim do intervalo de condução. Quando isso ocorre, a chave é aberta (sinal lógico baixo), dando início ao processo de decrescimento da corrente.

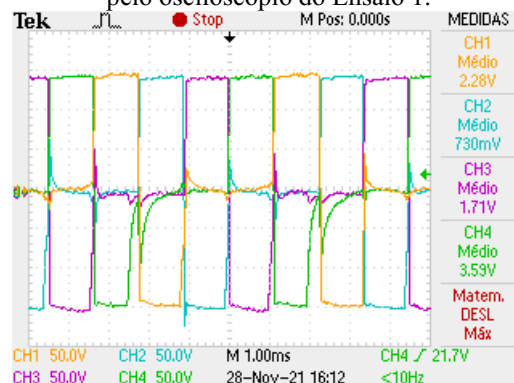
As tensões de fase também respondem ao chaveamento do conversor, como pode ser notado na Figura 4.4 e na Figura 4.5. Como foram aplicados 150 V no barramento CC, essa foi a tensão aplicada na fase durante a etapa de magnetização. Quanto ao processo de desmagnetização, a fase apresenta o comportamento de uma fonte, polarizando os diodos do conversor diretamente. Devido a isso, uma nova passagem de corrente é criada, fazendo com que o barramento imponha tensão negativa sobre a fase até o instante em que a corrente tenha decrescido totalmente e que a tensão sobre a fase seja igual a 0 V.

Figura 4.4 – Tensões de fase do MRV 8/6 medidas pela plataforma do Ensaio 1.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

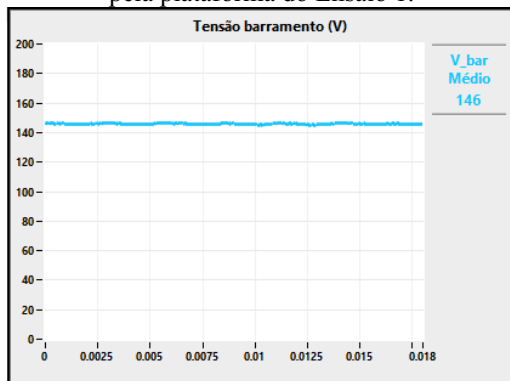
Figura 4.5 – Tensões de fase do MRV 8/6 medidas pelo osciloscópio do Ensaio 1.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

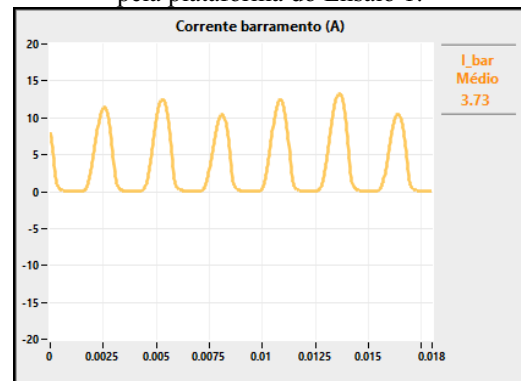
As medições de tensão de fase realizadas na plataforma são condizentes com medições captadas pelo osciloscópio, permitindo entender que o sistema de aquisições de tensões também foi bem projetado. Tal afirmação é mais uma vez comprovada por meio das medições de corrente, de tensão e de potência no barramento CC, as quais estão respectivamente exibidas na Figura 4.6, na Figura 4.7 e na Figura 4.8. A Figura 4.9 reúne essas mesmas grandezas, adquiridas pelo osciloscópio.

Figura 4.6 – Tensão no barramento CC medida pela plataforma do Ensaio 1.



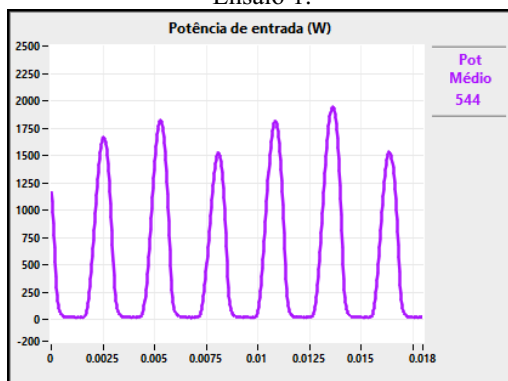
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 4.7 – Correntes no barramento CC medida pela plataforma do Ensaio 1.



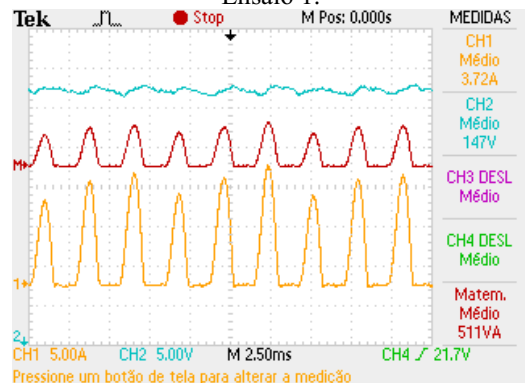
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 4.8 – Potência no barramento CC medida pela plataforma de instrumentação virtual do Ensaio 1.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 4.9 – Tensão, corrente e potência no barramento CC medidas pelo osciloscópio do Ensaio 1.



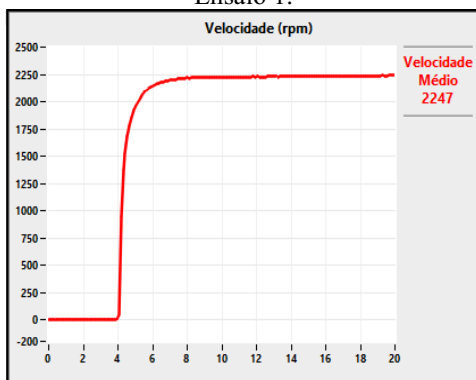
Fonte: Elaborado pelo Autor.

A tensão no barramento CC foi retificada, podendo ser considerada fundamentalmente contínua, a qual apresentou valor médio de 146 V. Na forma de onda da corrente foi visto altos picos intercalados com instantes de corrente zero, com média de 3,73 A. Sendo que, o comportamento da corrente é resultado da interação entre o banco de capacitores e os enrolamentos do estator do MRV 8/6. A potência elétrica no barramento CC foi calculada pelo produto direto entre tensão e corrente, desse modo, apresentando aparência semelhante ao observado na corrente, com média de 544 W. Comparando as medições com o osciloscópio, foi

percebido que as formas de ondas das grandezas são semelhantes, entretanto nota-se uma diferença de 33 W na potência média calculada.

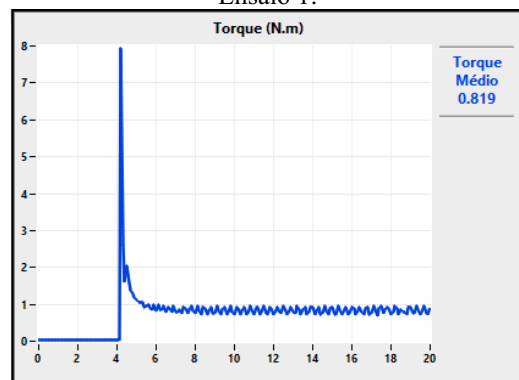
A velocidade média mensurada pela plataforma foi de 2247 rpm, enquanto que, utilizando o tacômetro, encontrou-se 2253 rpm. Como pode ser inferido a partir da Figura 4.10, que mostra a evolução da velocidade média no tempo, foram necessários aproximadamente 4 segundos para que a velocidade fosse estabilizada. Vale ressaltar que, como não foi aplicado controle de velocidade em malha fechada, assim, a velocidade foi afetada diretamente pelo valor da corrente e pela carga imposta ao motor.

Figura 4.10 – Velocidade média do MRV 8/6 no Ensaio 1.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 4.11 – Torque médio do MRV 8/6 no Ensaio 1.



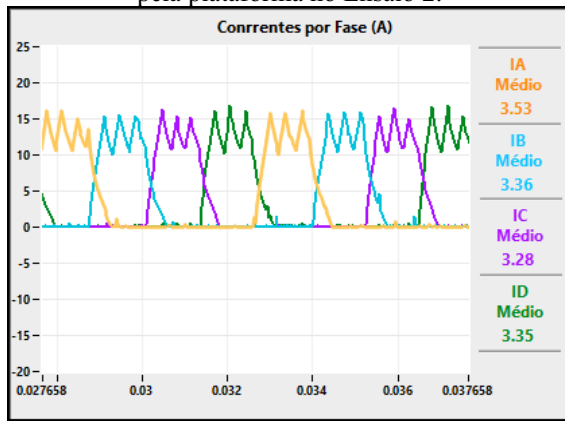
Fonte: Elaborado pelo Autor.

O conjugado médio do motor a relutância variável no tempo é visto na Figura 4.11, o qual tem aproximadamente 0,82 N.m ao fim do ensaio. Quando o motor é acionado, ocorre um período transitório antes de entrar no regime permanente. No MRV, mesmo em regime permanente, ocorre oscilação do conjugado, sendo esta uma característica inerente à máquina, em virtude do seu aspecto construtivo (polos duplamente salientes) e ao chaveamento da corrente em seu acionamento.

4.2.2 Ensaio 2

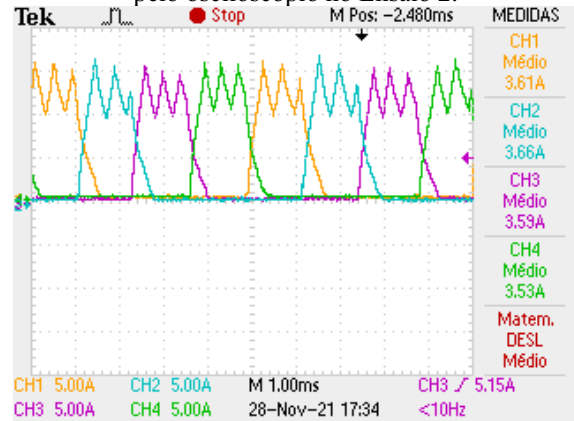
Neste ensaio foi realizado o acionamento do motor a relutância variável com tensão de 300 V no barramento CC. Além disso, foi implementado controle de corrente por histerese, com limites de 11 A e 15 A, valores determinados de modo a manter a velocidade média próxima a 2000 rpm. O comportamento das correntes durante o acionamento pode ser visualizado na Figura 4.12 e na Figura 4.13.

Figura 4.12 – Correntes de fase do MRV 8/6 medidas pela plataforma no Ensaio 2.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 4.13 - Correntes de fase do MRV 8/6 medidas pelo osciloscópio no Ensaio 2.

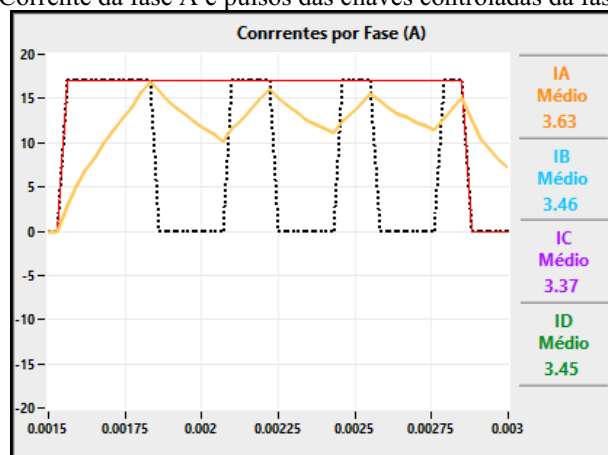


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 4.12 nota-se como o controle por histerese atua para que as correntes sejam mantidas dentro dos limites citados. Quando determinada fase entra na região de condução, ambas as chaves controladas são fechadas, realizando o processo de magnetização, quando for ultrapassado o limite superior da histerese, a chave controlada inferior é aberta, atuando como roda livre, o que faz com que a corrente comece a decair. Ao chegar ao limite inferior, novamente ocorre a magnetização, resultando no aumento da corrente.

O comportamento dos pulsos de *gate* em função da variação da corrente podem ser compreendidos por meio da Figura 4.14. A curva em vermelho representa um dos *gates*, este, acionado durante todo o período de condução da fase A. A curva pontilhada em preto mostra o *setpoint* da outra chave, a qual alterna seu estado de acordo com o controle por histerese, sendo responsável por impor o modo de operação do conversor como magnetização ou roda livre.

Figura 4.14 – Corrente da fase A e pulsos das chaves controladas da fase A do Ensaio 2.

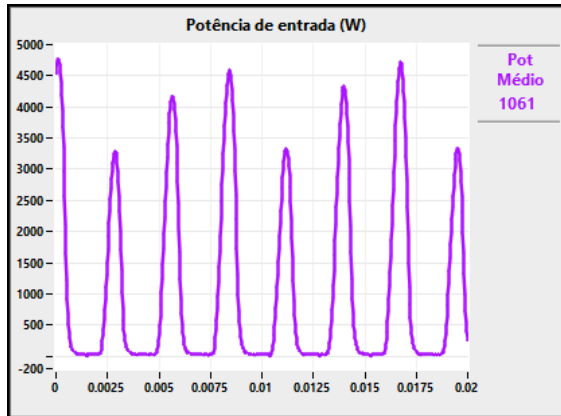


Fonte: Elaborado pelo Autor.

A potência no barramento CC calculada pela plataforma foi de 1061 W, que se diferiu por 9 W do valor encontrado pelo osciloscópio, como é mostrado ao comparar a Figura 4.15 e

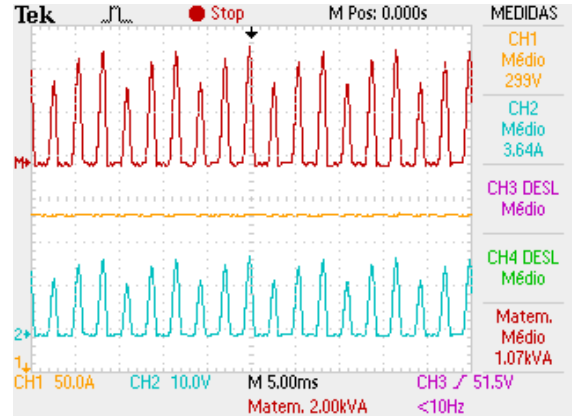
a Figura 4.16. Em ambas as figuras, a potência apresenta aspecto pulsante com instantes de amplitude igual zero, comportamento proveniente da forma de onda da corrente, sendo este, semelhante ao comportamento observado no Ensaio 1.

Figura 4.15 – Potência no barramento CC medida pela plataforma de instrumentação virtual no Ensaio 2.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

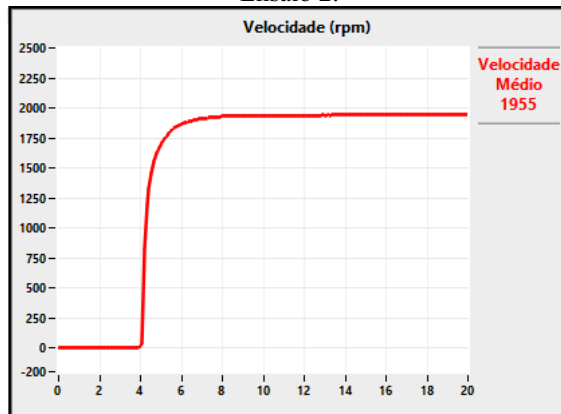
Figura 4.16 – Tensão, corrente e potência no barramento CC medidas pelo osciloscópio no Ensaio 2.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

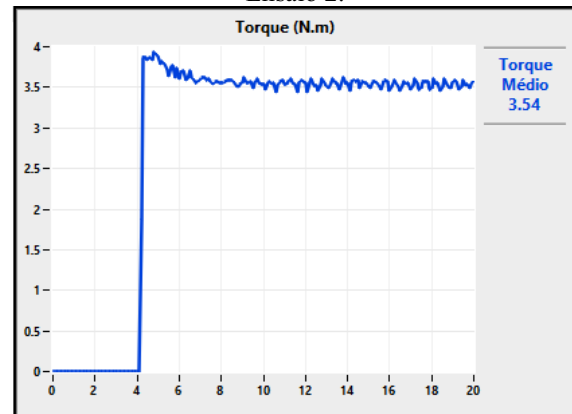
A Figura 4.17 mostra a velocidade em função do tempo, operando em regime permanente, com média de 1955 rpm, levou-se 4 segundos para a velocidade chegar à estabilidade. A Figura 4.18 exibe o torque médio, que após um período transitório, apresenta característica oscilatória entorno do valor médio de 3,54 N.m.

Figura 4.17 – Velocidade média do MRV 8/6 no Ensaio 2.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 4.18 – Torque médio do MRV 8/6 no Ensaio 2.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.2.3 Potência de saída e Rendimento dos Ensaio

A plataforma de instrumentação virtual permitiu adquirir diversos dados importantes para análise da operação do motor, os quais possibilitaram calcular a potência de saída e o

rendimento em cada ensaio. A potência de saída do motor foi calculada por meio da Equação 3.1, a qual relaciona a velocidade média (rad/s) com o conjugado (N.m) no eixo da máquina, ambas informações mensuradas pela plataforma.

O cálculo do rendimento é importante, pois possibilita a compreensão da quantidade de energia que é perdida pelo motor ao transformar energia elétrica em energia mecânica. Essa grandeza é dada pela relação direta entre a potência de entrada e a potência fornecida no eixo do motor elétrico. Assim, a Equação 4.1 descreve o procedimento para o cálculo do rendimento.

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} \times 100 \quad (4.1)$$

Em que,

η = rendimento;

P_e = Potência de entrada.

P_m = Potência de saída.

A Tabela 4.1 resume as grandezas adquiridas e calculadas pela plataforma durante os dois ensaios, sendo que, é adquirido: o valor médio de velocidade e conjugado, que possibilita o cálculo da potência de saída; o valor médio da tensão e corrente no barramento de entrada, fornecendo, através do produto, a potência de entrada. Por fim, com esses dados, a plataforma também possibilita estimar os valores dos rendimentos obtidos nos dois ensaios.

Tabela 4.1 – Grandezas obtidas nos ensaios de comparação da plataforma com instrumentos convencionais.

Ensaio	Velocidade	Conjugado	Potência de entrada	Potência de saída	Rendimento
Ensaio 1	2247 rpm	0,82 N.m	544 W	192,95 W	35,46%
Ensaio 2	1955 rpm	3,54 N.m	1061 W	722,87 W	68,13%

Fonte: Elaborado pelo Autor.

De acordo com a Tabela 4.1, o primeiro ensaio apresentou a menor carga imposta no eixo no motor e também o menor rendimento, com 35,46%. Já no segundo ensaio, o rendimento quase foi duplicado, alcançando a marca de 68,13%. Com isso, infere-se que quanto mais próximo das condições nominais de operação, maior será o rendimento do motor, como no segundo ensaio. Além disso, os dois ensaios executados permitiram analisar o acionamento do MRV 8/6 por meio das curvas de corrente, tensão, potência, velocidade e conjugado, possibilitando avaliar se o acionamento do motor foi executado corretamente pela plataforma e

se o regulador de corrente por histerese estava operando como esperado. Portanto, observou-se que a plataforma como um todo operou corretamente e apresentou bom desempenho, facilitando a execução de ensaios e coletas de informações oriundas do sistema de aquisição de dados. O sistema de aquisição de dados mostrou-se robusto, nas quais as medições efetuadas comparadas aos instrumentos convencionais apresentaram ótimo desempenho, representando os sinais fidedignamente.

4.3 Ensaios com variação de parâmetros

Os ensaios nessa subseção são caracterizados pela variação de um parâmetro de acionamento do MRV 8/6, enquanto os outros parâmetros são mantidos constantes, a fim de analisar o impactado na operação em regime permanente. Portanto, foram averiguados o efeito da tensão de entrada, do ângulo de condução de fase, do regulador de corrente por histerese e da perda de fases, na velocidade e conjugado do motor. Também objetivou-se demonstrar a capacidade da plataforma de instrumentação virtual desenvolvida na implementação de diferentes ensaios, possibilitando acessar as inúmeras informações mensuradas.

4.3.1 Ensaio 1 – Variação da tensão de entrada

O objetivo deste experimento foi entender o comportamento do MRV 8/6 em função da variação da tensão do barramento CC, controlando a fonte programada por meio a Interface Gráfica desenvolvida em LabVIEW. Neste caso, os parâmetros de acionamento para os ensaios foram aplicados de acordo com a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros ensaio de variação de tensão.

Parâmetros	Valores ajustados
Tensão Barramento CC	Variável (25 V, 50 V, 75 V, 100 V, 125 V, 150 V)
Largura de pulso de excitação	15°
Controle de corrente por histerese	Desativado
Fases acionadas	Quatro fases
Controle de Velocidade	Desativado

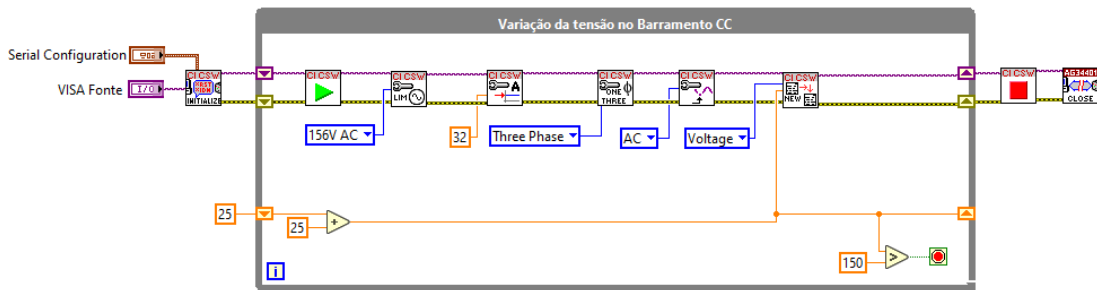
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como indica a Tabela 4.2, os valores de tensão foram definidos entre 25 V e 150 V, com degraus de 25 V. Os valores de tensão foram escolhidos com o foco em permitir ao motor

partir com a carga requerida pelo simulador de carga e de manter a velocidade abaixo de 2000 rpm como medida de segurança. O ângulo de condução foi mantido em 15° para todas as fases e o simulador de carga foi deixado constante durante o ensaio. Destaca-se que neste ensaio o motor foi acionado em malha aberta e nenhuma forma de controle foi aplicada a fim de compreender as respostas naturais da máquina às variações de tensão impostas.

Para simplificar a realização dos ensaios, foi acrescentada à programação descrita no Capítulo 3 uma rotina que permite o controle programático da fonte controlada, alterando os níveis de tensão para os montantes pré-definidos na programação. A Figura 4.19 exhibe o código em LabVIEW implementado para tal procedimento.

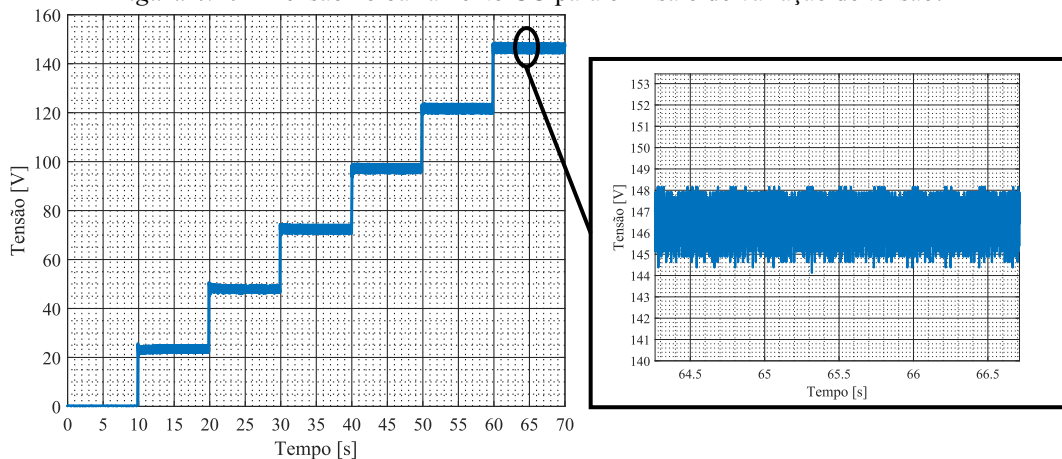
Figura 4.19 – Código para controle da fonte programada e variação da tensão.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O código em LabVIEW comunicou com a fonte via serial, utilizando as funções fornecidas pelo fabricante, enviando os valores de tensões desejados, iniciando em 0 V e finalizando no último valor de tensão definido, 150 V. Ao iniciar o ensaio, todas as medições efetuadas foram salvas em formato de texto, possibilitando a análise dos dados posteriormente. A Figura 4.20 apresenta a tensão no barramento CC em função do tempo.

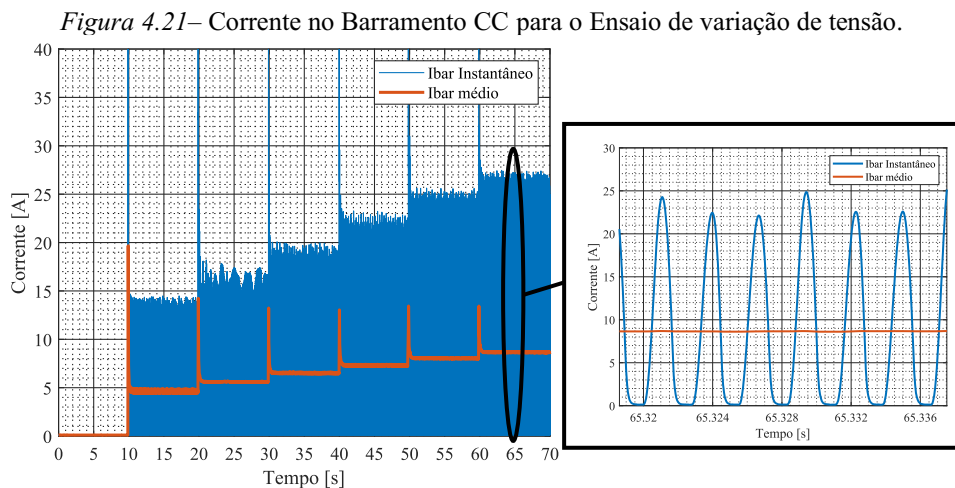
Figura 4.20 – Tensão no barramento CC para o Ensaio de variação de tensão.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

De acordo com a Figura 4.20, a tensão no início do ensaio foi de 0 V, permanecendo nesse estado por 10 segundos. Durante o acionamento, a cada 10 segundos, foi feito um incremento de 25 V, resultando em um ensaio com tempo total de 70 segundos. Nota-se que a tensão no barramento CC, para condições de 150 V solicitados da fonte de alimentação, apresentou valores de tensão em torno de 146 V, oscilando dentro de uma faixa de 3 V, comportamento este, originado pela queda de tensão nos momentos de chaveamento das fases e pela etapa de retificação da tensão de entrada.

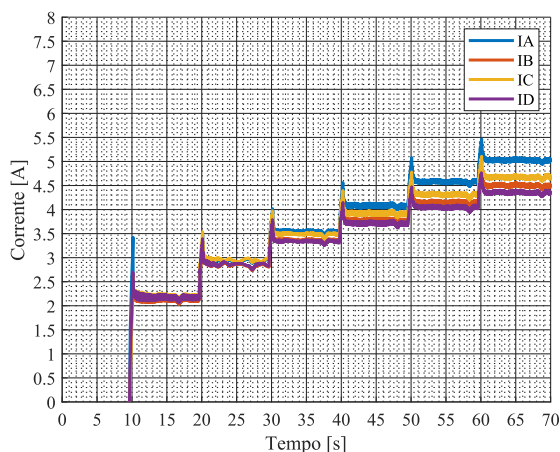
O impacto da variação da tensão de entrada no acionamento do motor pode ser notado nas correntes de fase e nas correntes do barramento CC. A Figura 4.21 apresenta a corrente instantânea do barramento CC, bem como, a média móvel para todo o tempo de acionamento.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Por meio da Figura 4.21 observa-se que, à medida que a tensão foi aumentada, há uma elevação da corrente do barramento CC, de modo que, para 25 V, o valor de pico de corrente foi de aproximadamente 14 A e para o valor final do ensaio, tensão de 150 V, o valor de pico foi de aproximadamente 27,5 A. O aumento da corrente, mediante o aumento da tensão de entrada, também é percebido nas correntes de fase, como enuncia a Figura 4.22.

Figura 4.22 – Correntes de Fase médias para o Ensaio de variação de tensão.

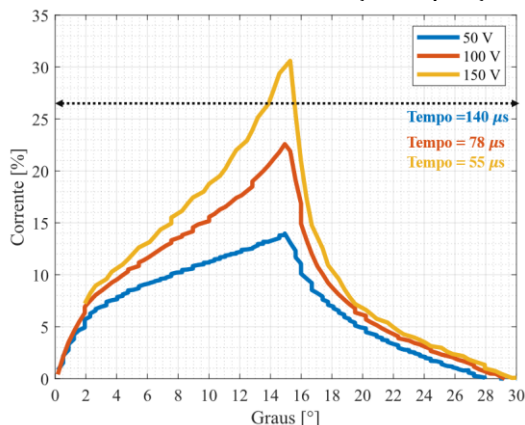


Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 4.22 apresenta a média das quatro correntes de fase para o ensaio de variação de tensão. Verifica-se que há um incremento na média de corrente para as quatro fases, entretanto, à medida que a tensão foi aumentada, existiu maior disparidade entre as correntes de cada fase. Esse comportamento é justificado pela característica da máquina ensaiada, a qual foi construída com propósitos didáticos.

As correntes da Fase A em função dos graus mecânicos, para três valores de tensão de entrada (50 V, 100 V, 150 V) foram apresentadas na Figura 4.23.

Figura 4.23 – Correntes da Fase A em função da posição em graus.

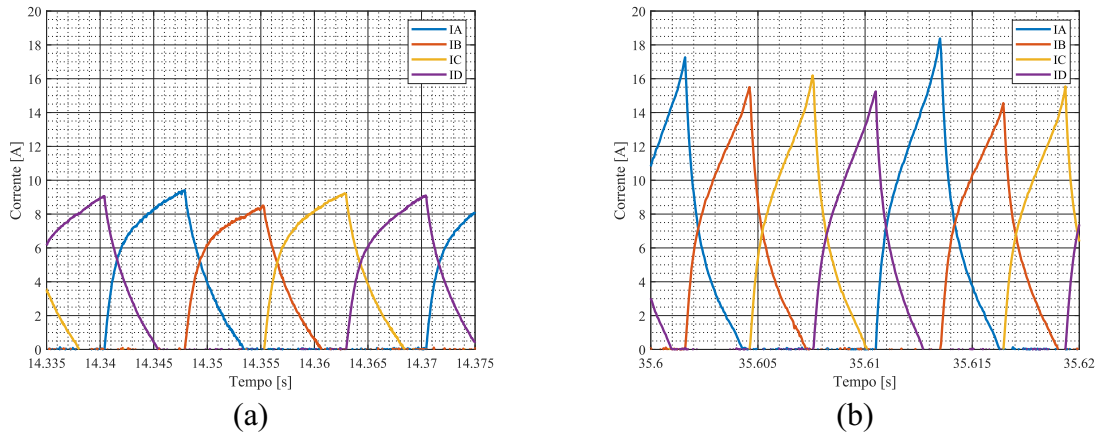


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Além do aumento do valor máximo das ondas de corrente, a Figura 4.23 confirma que o ângulo de condução de fase foi definido em 15°. Visto que após 15° de condução, a amplitude das correntes apresenta diminuição gradativa. As correntes instantâneas das quatro fases do motor para as tensões de entrada de 25 V e 75 V estão dispostas na Figura 4.24. Por meio delas,

pode-se inferir que o acionamento ocorreu como previsto, de forma que, as fases foram energizadas subsequentemente, sem sobreposição e sem momentos de não condução.

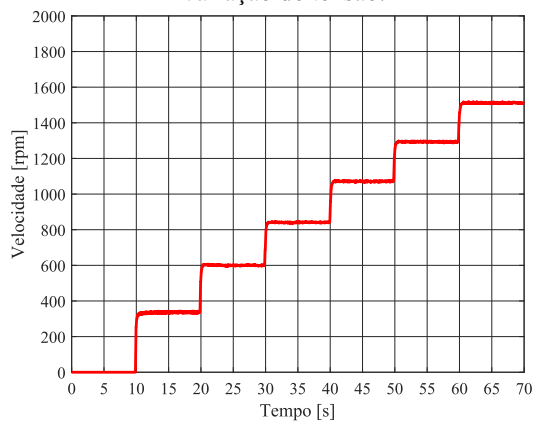
Figura 4.24 – Correntes de Fase instantâneas para o Ensaio de variação de tensão: (a) tensão de entrada de 25 V; (b) tensão de entrada de 75 V.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

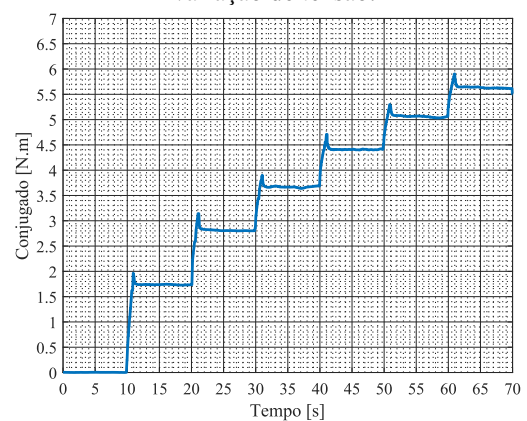
A velocidade média durante o ensaio foi medida e está registrada na Figura 4.25, em função do tempo. É perceptível que com o incremento de tensão, e conseqüentemente o incremento de corrente, ocorreu a elevação da velocidade média do motor. Desse modo, para 25 V de entrada a velocidade média foi igual a 336 rpm e para 150 V, a velocidade média apresentou valores próximos a 1509 rpm.

Figura 4.25 – Velocidade média para o Ensaio de variação de tensão.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 4.26 – Conjugado médio para o Ensaio de variação de tensão.



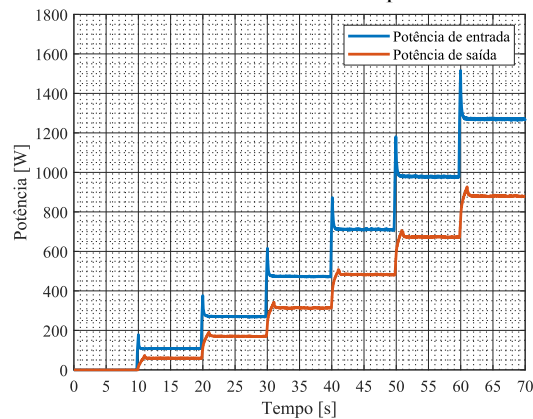
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Quanto ao conjugado, a Figura 4.26 dispõe os valores médios em função do tempo, para os 70 segundos de ensaio. O conjugado fornecido pelo motor apresenta ganho de intensidade juntamente com aumento da tensão, iniciando em 1,7 N.m e finalizando o ensaio com 5,6 N.m.

Logo após cada degrau de tensão, o conjugado medido passou por momentos transitórios, estabilizando nos próximos segundos de medição.

Através das grandezas de tensão e corrente de entrada mensuradas, por meio da Equação 2.5, foi possível estimar a potência de entrada do motor, entregue pelo barramento CC. Aplicando a Equação 2.11, utilizando as medições de velocidade média e de conjugado médio, estimou-se a potência de saída do motor. A Figura 4.27 revela a potência de entrada e a potência de saída encontrada para todo o ensaio.

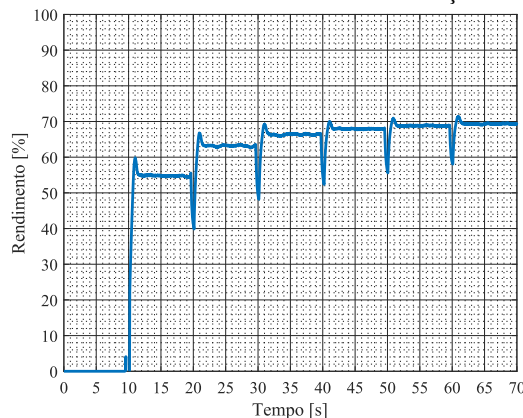
Figura 4.27 – Potência de entrada e Potência de saída para o Ensaio de variação de tensão.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como a potência de entrada foi calculada a partir da corrente do Barramento CC, ela também cresce à medida que a tensão de entrada é aumentada, resultando em aproximadamente 1270 W com tensão de 150 V. Do mesmo modo, a potência de saída do MRV 8/6 também aumentou com o incremento da tensão de entrada, tendo em vista que foi calculada a partir da velocidade e conjugado, resultando em 889 W. Por meio das potências estimadas, calculou-se o rendimento com a Equação 4.1, em que o resultado foi apresentado na Figura 4.28.

Figura 4.28 – Rendimento do ensaio de variação de tensão.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O rendimento estimado evidenciou o aumento da eficiência do motor à proporção que a tensão de entrada era incrementada. O degrau de rendimento foi cerca de 7,5 % na variação de tensão de 25 V para 50 V, enquanto, na variação de tensão de 125 V para 150 V, o degrau de rendimento foi aproximadamente de 0,24 %. Assim, com a menor tensão de ensaio o rendimento apresentou 56,31 % e com a maior tensão de ensaio, o rendimento foi de 69,83 %.

Os valores médios de cada um dos parâmetros discutidos, em função dos níveis de tensão de entrada, estão resumidos e agrupados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resumo dos resultados para o ensaio de variação de tensão.

Tensão Vbar	Corrente Ibar	Corrente Fase A	Conjugado	Velocidade	Potência de Entrada	Potência de Saída	Rendimento
25 V	4,65 A	2,39 A	1,7 N.m	336 rpm	108,7 W	61,2 W	56,31%
50 V	5,69 A	3,25 A	2,8 N.m	595 rpm	273,2 W	174,8 W	63,98%
75 V	6,58 A	3,94 A	3,6 N.m	836 rpm	447,9 W	320,1 W	66,97%
100 V	7,38 A	4,55 A	4,4 N.m	1066 rpm	717,6 W	492,0 W	68,56%
125 V	8,06 A	5,07 A	5,0 N.m	1290 rpm	982,6 W	683,8 W	69,59%
150 V	8,68 A	5,56 A	5,6 N.m	1509 rpm	1273,1 W	889,0 W	69,83%

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Através dos resultados coletados durante o ensaio de variação de tensão, foi possível entender o comportamento do MRV 8/6 e a influência que a tensão de excitação tem sobre a corrente, a velocidade, o conjugado e as potências. Durante o ensaio, todas as grandezas analisadas tiveram ganhos de intensidade, de forma que, quanto mais próximo a 150 V, menor foi o degrau de elevação das grandezas analisadas ao incrementar a tensão.

4.3.2 Ensaio 2 – Variação do ângulo de disparo

Este ensaio teve como foco a análise da atuação do motor a relutância variável em situações de diferentes valores de largura dos ângulos de condução. Para tal, o valor de θ_{on} foi fixado e o valor de θ_{off} foi sendo alterado durante o ensaio. Neste caso, os parâmetros de acionamento para o ensaio foram definidos de acordo com a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Parâmetros Ensaio de variação de θ_{off} .

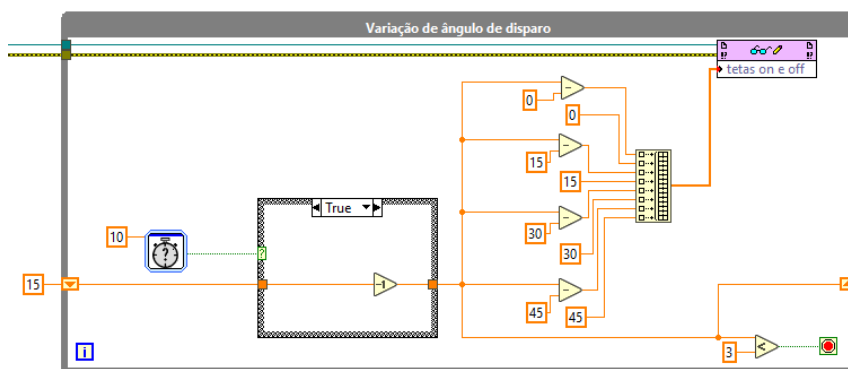
Parâmetros	Valores ajustados
Tensão barramento CC	50 V
Largura de pulso de excitação	Variável (15°, 14°, 13°, 12°, 11°, 10°, 9°, 8°, 7°, 6°, 5°, 4°, 3°)
Controle de corrente por histerese	Desativado
Fases acionadas	Quatro fases
Controle de velocidade	Desativado

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como informa a Tabela 4.4, a tensão de alimentação do MRV 8/6 foi de 50 V, montante escolhido visando garantir que as correntes não ultrapassassem 30 A. O ângulo de disparo do acionamento foi modificado durante o ensaio igualmente para as quatro fases, iniciando em 15° de condução e decrementando gradativamente 1° até atingir $\theta_{off} = 3^\circ$, processo realizado com período de 10 segundos. Além disso, ao longo deste ensaio, o controle de corrente por histerese permaneceu inoperante e nenhuma forma de controle em malha fechada foi aplicada, possibilitando o estudo das reações naturais da máquina às variações do ângulo de condução.

O procedimento para variação do ângulo de disparo foi realizado com a aplicação do código disposto na Figura 4.29. Nele, foi enviado de forma programática um novo valor de θ_{off} para o controle de acionamento a cada 10 segundos, resultando em um ensaio com duração de 130 segundos. A manipulação do código para adição da automatização da variação do ângulo de disparo permite acrescentar outros valores angulares para testar a máquina em questão.

Figura 4.29 – Código em LabVIEW para alteração do valor de θ_{off} .

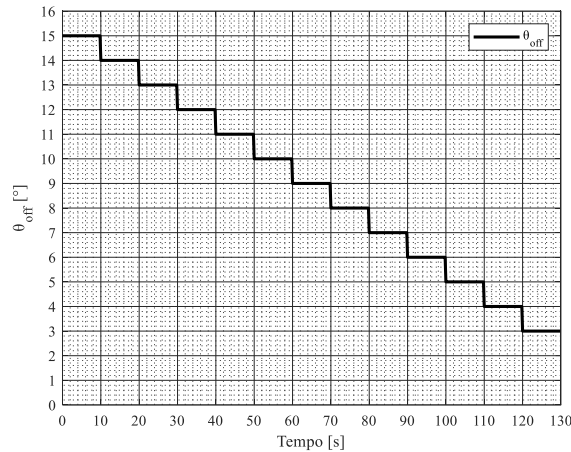


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Durante a execução do ensaio, as grandezas instantâneas foram coletas e salvas em documento de texto, com tempo de amostragem padronizada em 25 μs . A Figura 4.30 mostra os valores de θ_{off} no tempo, ao longo de todo ensaio. Como registrado na figura, no tempo

inicial do ensaio, θ_{off} foi igual a 15° , e no tempo final, θ_{off} foi igual a 3° . Para valores menores do que 3° não foi possível fornecer potência de entrada suficiente para romper o momento de inercia e acionar o motor.

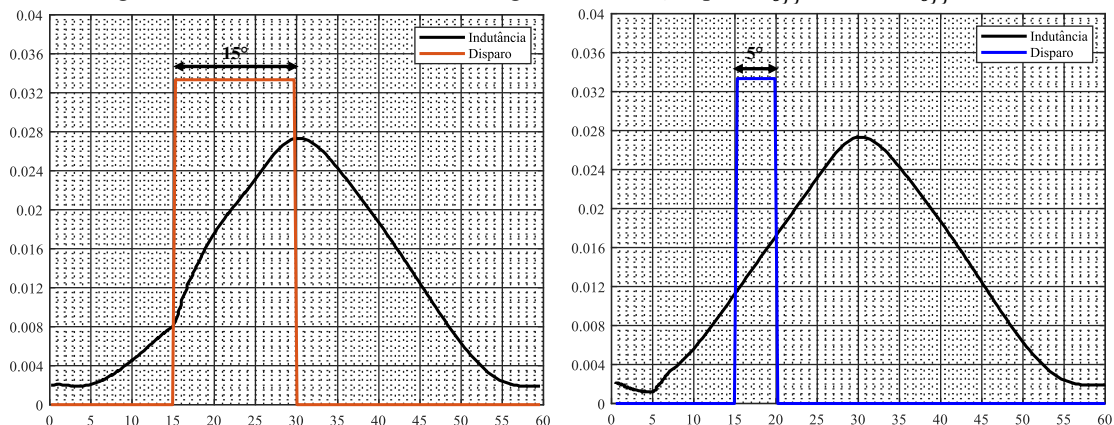
Figura 4.30 – Valores de θ_{off} implementados para o Ensaio de variação de θ_{off} .



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 4.31 ilustra a indutância da fase B e os sinais de *gate* para dois diferentes ângulos de disparo, 15° e 5° . De acordo com a figura, o valor de θ_{on} para ambas as situações permanece inalterado, sendo igual 15° . Ao passo que, o instante angular em que as chaves do conversor foram abertas para fase B (θ_{off}) determinaram a largura do ângulo de condução.

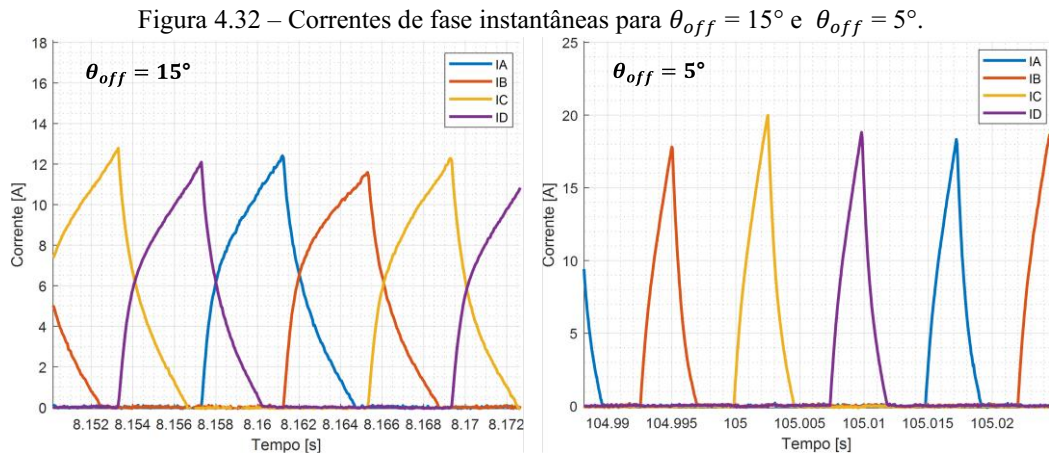
Figura 4.31 – Curva de indutância e ângulo de condução para $\theta_{off} = 15^\circ$ e $\theta_{off} = 5^\circ$.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Assim como na fase B, ao longo do ensaio o mesmo ângulo de condução foi imposto para as quatro fases do MRV 8/6, como é possível compreender por meio da Figura 4.32, onde as formas de onda das correntes de cada uma das fases podem ser analisadas, para ângulo de

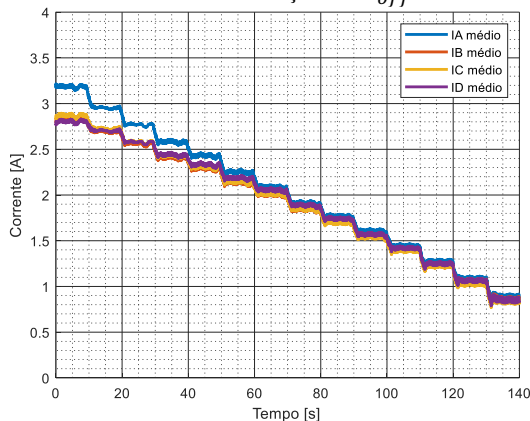
condução de 15° e para ângulo de condução de 5° . O maior valor de θ_{off} sem que ocorra sobreposição de fases foi dado por 15° , em que se constata que não existe nenhum instante de tempo sem condução de corrente no motor e que nenhuma fase conduz ao mesmo tempo. Ao diminuir o ângulo de chaveamento das quatro fases, como mostrado na Figura 4.32 no cenário de $\theta_{off} = 5^\circ$, surgem momentos entre a energização das fases em que não há fornecimento de potência ao motor, diminuindo a corrente média.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

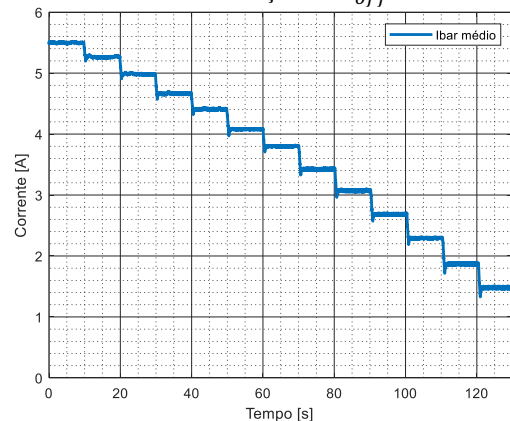
Conseqüentemente, um dos aspectos em que o resultado da diminuição do ângulo de condução no acionamento do MRV 8/6 foi visível está registrado na Figura 4.33, em que é mostrado a média das correntes das quatro fases no tempo. Como evidenciado, quanto menor o ângulo de condução no acionamento do motor, menor foi a corrente média de fase. O mesmo comportamento das correntes de fase foi visto na Figura 4.34, em que a corrente do barramento CC tem valor médio decrescido ao decrementar θ_{off} .

Figura 4.33 – Média das Corrente de Fase para o Ensaio de variação de θ_{off} .



Fonte: Elaborado pelo Autor.

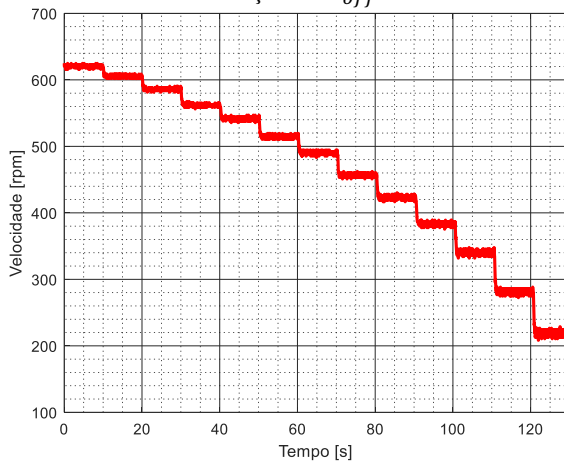
Figura 4.34 – Corrente média de entrada para o Ensaio variação de θ_{off} .



Fonte: Elaborado pelo Autor.

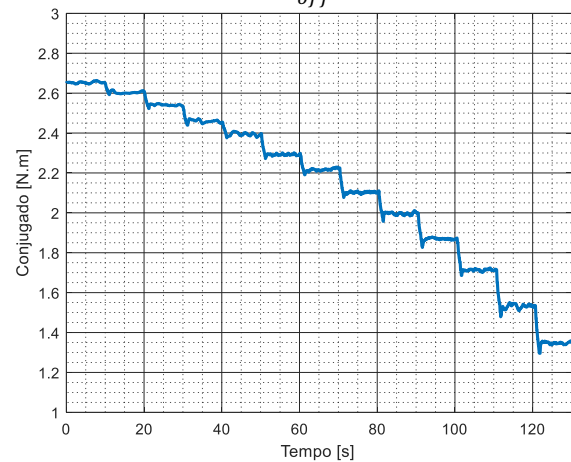
A corrente de entrada nos primeiros 10 segundos de ensaio foi de 5,50 A e no tempo final, 120 a 130 segundos, alcançou montante de 1,49 A. Em consequência do decaimento da corrente, a velocidade média foi diminuindo ao decorrer de teste, como registrado na Figura 4.35. Desse modo, para 15° de condução, a velocidade média de 620 rpm e para 3° de condução, a velocidade atingiu valores próximos a 219 rpm.

Figura 4.35 – Velocidade média para Ensaio variação de θ_{off} .



Fonte: Elaborado pelo Autor.

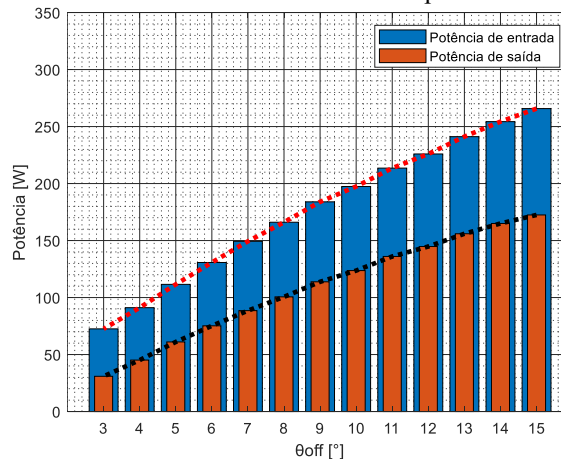
Figura 4.36 – Conjugado médio para Ensaio variação de θ_{off} .



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 4.36 exibe os valores médios do conjugado em função do tempo, onde vê-se que o conjugado produzido pelo motor apresenta perdas de intensidade diretamente proporcional a redução do ângulo de disparo, iniciando em 2,65 N.m ($\theta_{off} = 15^\circ$) e finalizando o ensaio com 1,53 N.m ($\theta_{off} = 5^\circ$). A diminuição da corrente, velocidade e conjugado refletem diretamente na potência de entrada e na potência de saída estimada, as quais estão registradas na Figura 4.37, sendo apresentadas como gráfico de barras em função do θ_{off} .

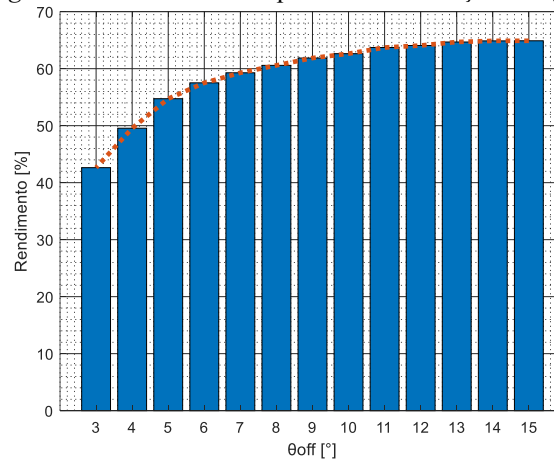
Figura 4.37 – Potência de entrada e Potência de saída para Ensaio variação de θ_{off} .



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A potência de entrada fornecida ao motor diminuiu conforme o decréscimo do ângulo de condução, consequência da redução da intensidade das correntes do barramento CC. Com o menor fornecimento de potência de entrada, a potência de saída também diminuiu, efeito observado na velocidade e no conjugado produzido pelo motor. Por intermédio das potências estimadas, calculou-se o rendimento, exposto na Figura 4.38.

Figura 4.38 – Rendimento para Ensaio variação de θ_{off} .



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O rendimento calculado aumentou à medida que o valor de θ_{off} aproximava-se de 15° , sendo este, o maior ângulo de disparo possível sem que houvesse sobreposição de fases. O menor rendimento percentual foi de 42,63%, para $\theta_{off} = 3^\circ$, enquanto o maior rendimento foi de 64,89 %, quando $\theta_{off} = 15^\circ$. Isso ocorreu de forma que quanto mais próximo do ângulo máximo de condução, menor era o montante de incremento do rendimento percentual. O que pode ser melhor notado na Tabela 4.5, que apresenta os valores médios de cada um dos parâmetros discutidos a respeito acionamento do MRV 8/6.

Tabela 4.5 – Resumo dos resultados para Ensaio variação de θ_{off} .

Ângulo	Corrente Ibar	Corrente Fase A	Conjugado	Velocidade	Potência de Entrada	Potência de Saída	Rendimento
15°	5,50 A	3,17 A	2,65 N.m	620,84 rpm	265,76 W	172,46 W	64,89 %
14°	5,26 A	2,95 A	2,60 N.m	606,01 rpm	254,31 W	164,98 W	64,87 %
13°	4,99 A	2,77 A	2,54 N.m	585,96 rpm	241,14 W	155,96 W	64,68 %
12°	4,67 A	2,57 A	2,46 N.m	562,10 rpm	225,95 W	144,75 W	64,06 %
11°	4,41 A	2,44 A	2,40 N.m	541,91 rpm	213,53 W	136,05 W	63,71 %
10°	4,08 A	2,25 A	2,29 N.m	515,10 rpm	197,43 W	123,65 W	62,63 %
9°	3,80 A	2,10 A	2,22 N.m	490,45 rpm	183,95 W	113,80 W	61,87 %
8°	3,42 A	1,91 A	2,10 N.m	456,93 rpm	166,05 W	100,59 W	60,58 %
Continua...							

...continuação.

Ângulo	Corrente Ibar	Corrente Fase A	Conjugado	Velocidade	Potência de Entrada	Potência de Saída	Rendimento
7°	3,07 A	1,77 A	2,00 N.m	423,53 rpm	149,34 W	88,52 W	59,28 %
6°	2,69 A	1,61 A	1,87 N.m	383,57 rpm	130,76 W	75,20 W	57,51 %
5°	2,29 A	1,43 A	1,71 N.m	340,53 rpm	111,56 W	61,05 W	54,73 %
4°	1,87 A	1,27 A	1,53 N.m	281,59 rpm	91,11 W	45,14 W	49,55 %
3°	1,49 A	1,09 A	1,35 N.m	218,93 rpm	72,51 W	30,91 W	42,63 %

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Através dos resultados coletados durante o ensaio de variação do ângulo de condução, mantendo constante θ_{on} e alterando gradativamente θ_{off} , foi possível analisar a resposta natural do MRV e a influência dos ângulos de condução sobre a corrente, velocidade, conjugado, potências e rendimento. Durante o ensaio, todas as grandezas analisadas tiveram perdas de intensidade à medida que θ_{off} foi decrementado, de forma que, quanto mais distante de 15°, menores eram as grandezas analisadas.

4.3.3 Ensaio 3 – Variação do setpoint de histerese

O presente ensaio busca compreender o comportamento do MRV 8/6 frente à aplicação do controle de corrente via histerese. Assim, os outros parâmetros do controle do acionamento permaneceram inalterados, enquanto o valor de *setpoint* do controlador de histerese foi alterado com o tempo. A Tabela 4.6 reúne as grandezas estabelecidas para os parâmetros de acionamento do ensaio.

Tabela 4.6 – Parâmetros de Ensaio de variação do *setpoint* de histerese.

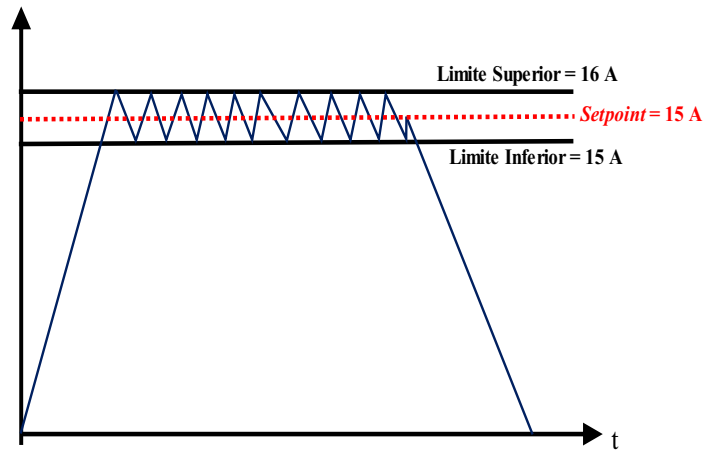
Parâmetros	Valores ajustados
Tensão Barramento CC	300 V
Largura de pulso de excitação	15°
Controle de corrente por Histerese	Variável (5 A, 6 A, 7 A, 8 A, 10 A, 11 A, 12 A, 13 A, 14 A, 15 A, 16 A, 17 A)
Fases acionadas	Quatro fases
Controle de Velocidade	Desativado

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A tensão de alimentação do MRV 8/6 durante o ensaio foi de 300 V e o ângulo de disparo também permaneceu constante, com 15° de condução. Além disso, ao longo deste ensaio, o regulador de corrente por histerese permaneceu acionado e nenhuma forma de controle

de velocidade em malha fechada foi aplicada, possibilitando o estudo das reações naturais da máquina em frente ao controle de corrente. A variação do *setpoint* de controle por histerese ocorreu alterando o *setpoint* do controlador, de modo que o limite superior fosse igual a 1 A acima do *setpoint* e o limite inferior fosse igual a 1 A abaixo, como ilustra a Figura 4.39.

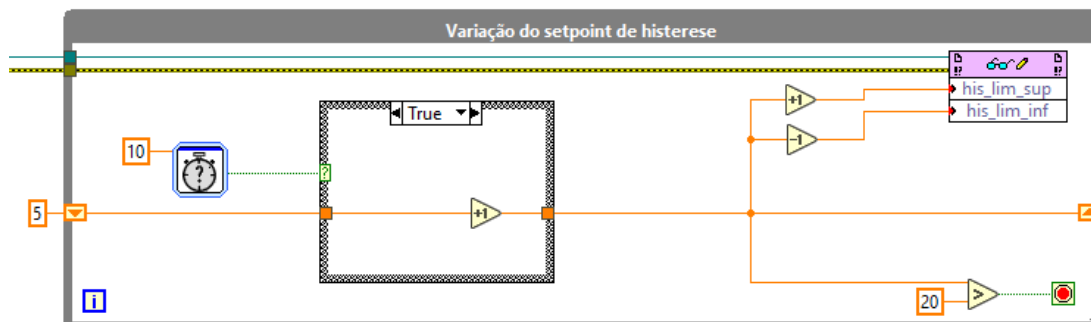
Figura 4.39 – Limites e *setpoint* no Regulador de Corrente por Histerese.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 4.40 exibe o processo para variação da janela de histerese realizado programaticamente por meio do código em LabVIEW. O código implementa a comunicação entre a instância executada no computador e a instância executada no FPGA do NI myRIO-1900, contando com um temporizador de 10 segundos. A cada iteração do temporizador, um novo valor de histerese foi enviado ao controle de acionamento, partindo do *setpoint* programado. Ao finalizar o envio dos *setpoints* definidos, o ensaio automaticamente foi encerrado, abrindo todas as chaves do conversor.

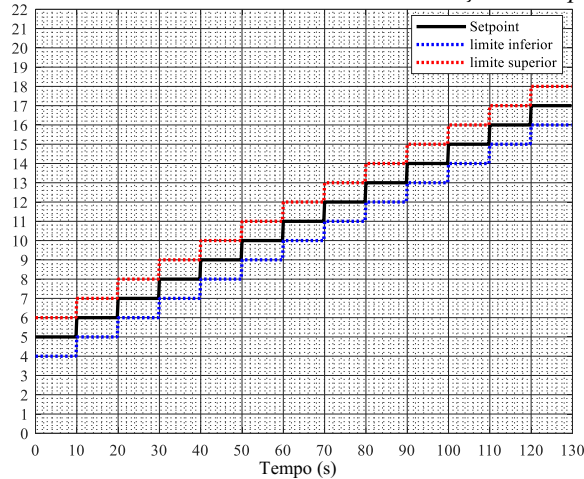
Figura 4.40 – Código em LabVIEW para alteração *setpoint* para o Ensaio de variação do *setpoint* de histerese.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Ao desenvolver do ensaio, os valores mensurados foram coletados e salvos em formato de documento de texto, com frequência de amostragem de 40 kHz. A gravação dos dados iniciou-se juntamente com o ensaio e encerrou-se automaticamente ao fim da execução. A Figura 4.41 dispõe as janelas de histerese ao longo do tempo aplicadas no ensaio. O menor *setpoint* aplicado foi de 5 A e o maior *setpoint* foi de 17 A, permanecendo aproximadamente 10 segundos em cada janela.

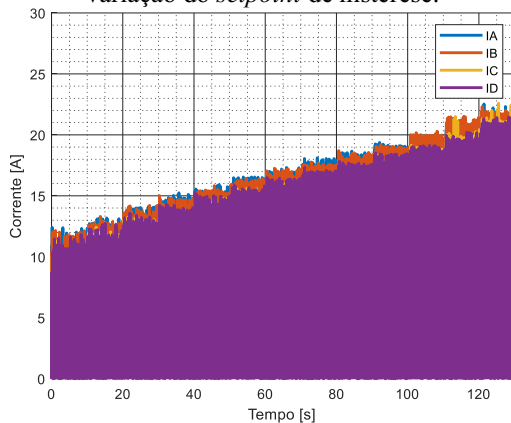
Figura 4.41 – Janela de histerese durante o Ensaio de variação do *setpoint* de histerese.



Elaborado pelo Autor.

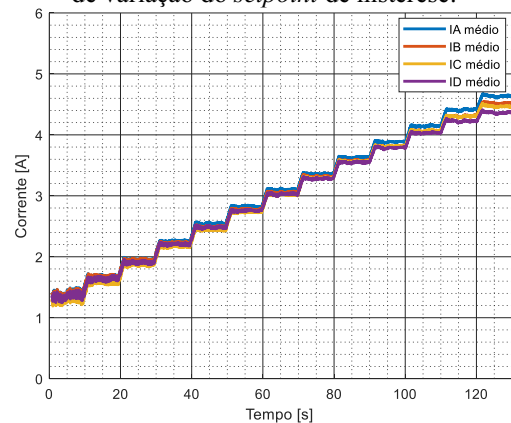
O controle de corrente por histerese ocorre limitando a amplitude das correntes de fase do motor em uma determinada faixa de valores, a partir do *setpoint* fornecido ao controlador. Conforme pode ser analisado na Figura 4.42, elevando a janela do regulador de controle por histerese, notadamente as amplitudes das correntes no tempo são elevadas. Com isso, as correntes médias também foram ampliadas e consequentemente, fornecendo maior potência elétrica ao motor.

Figura 4.42 – Corrente de fase para o Ensaio de variação do *setpoint* de histerese.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

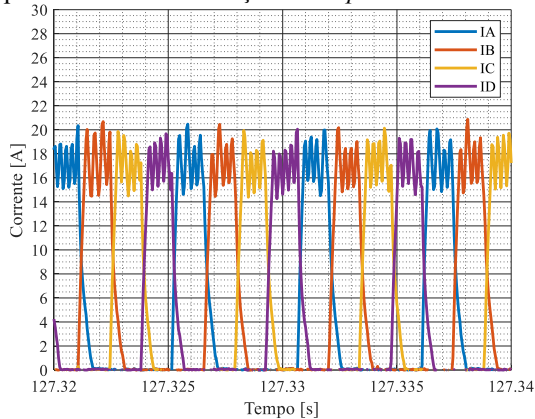
Figura 4.43 – Corrente de fase média para o Ensaio de variação do *setpoint* de histerese.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

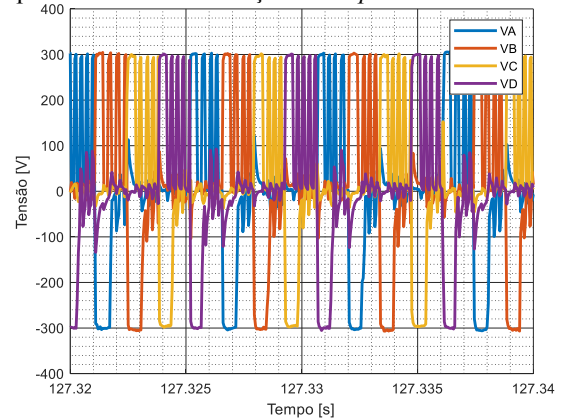
As correntes instantâneas das quatro fases podem ser vistas na Figura 4.44, neste caso, para um *setpoint* de 17 A, em que o ângulo de condução foi igual a 15° , de forma que no mesmo instante em que a Fase A encerrou a condução de corrente, a Fase B iniciou sua energização. Dentro dos 15° mecânicos de condução, a corrente mostra forma serrilhada dentro da janela do controle por histerese.

Figura 4.44 – Corrente de fase para *setpoint* de 17 A para o Ensaio de variação do *setpoint* de histerese.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

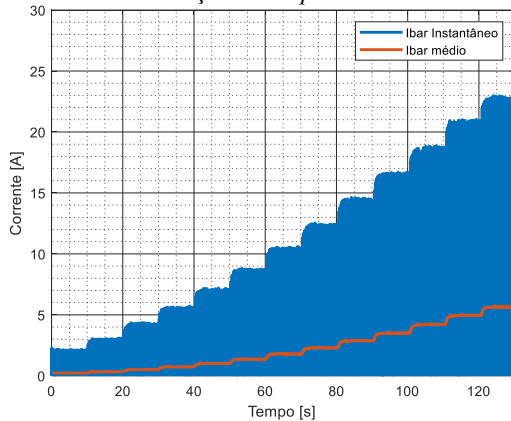
Figura 4.45 – Tensão de fase para *setpoint* de 17 A para o Ensaio de variação do *setpoint* de histerese.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

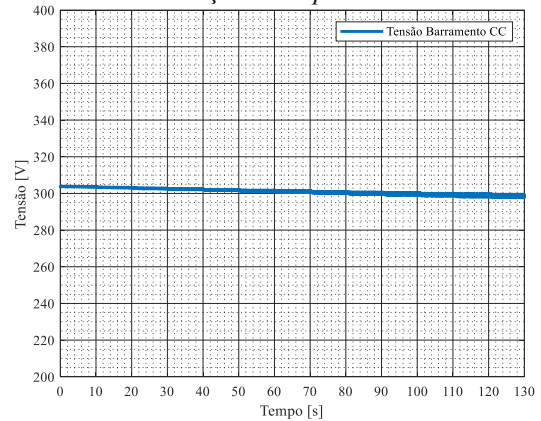
Através da forma de onda da tensão de fase, Figura 4.45, vê-se que o acionamento requer do conversor AHB a operação em roda livre, onde para o tempo de condução de cada fase há o chaveamento da alimentação, de acordo com a corrente medida e o controle por histerese aplicado. A corrente do barramento CC, Figura 4.46, tem valor médio acrescido ao elevar o *setpoint* do controle por histerese, assim, a corrente nos primeiros 10 segundos de ensaio foi de 0,22 A e no tempo final, 120 a 130 segundos, a corrente alcançou 5,63 A.

Figura 4.46 – Corrente do barramento CC para o Ensaio de variação do *setpoint* de histerese.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

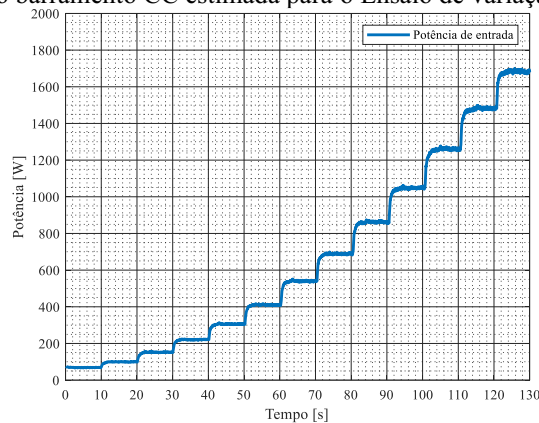
Figura 4.47 – Tensão do barramento CC para o Ensaio de variação do *setpoint* de histerese.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A tensão fornecida ao motor permaneceu constante em aproximadamente em 300 V. Entretanto, devido à elevação da corrente, ao longo do ensaio, nota-se uma pequena queda de tensão, observado na Figura 4.47. A potência de entrada estimada, por ser calculada através do produto da corrente e tensão do barramento CC, também apresentou montante gradualmente acrescido ao longo do ensaio, devido a elevação da corrente, como visto na Figura 4.48.

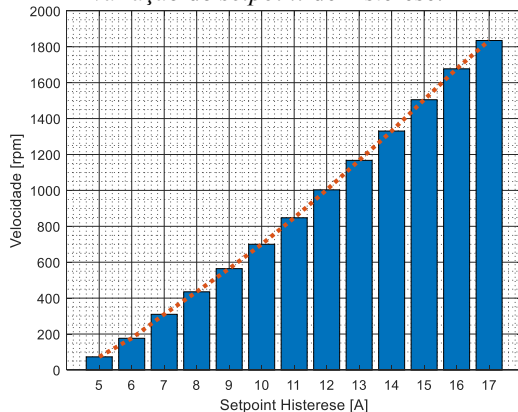
Figura 4.48 – Potência do barramento CC estimada para o Ensaio de variação do *setpoint* de histerese.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

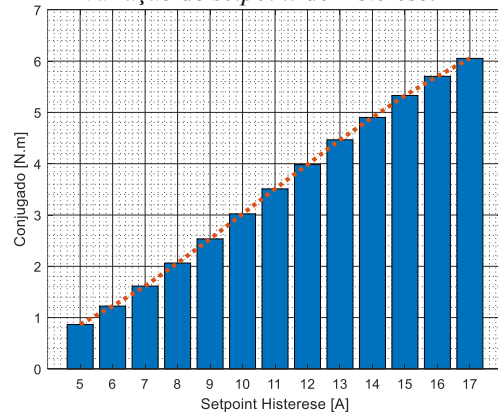
A princípio, a potência de entrada apresentou valores de 68,37 W, enquanto que, para *setpoint* de 17 A, a potência elétrica foi de 1681,81 W. Comparando a corrente e a potência no barramento CC, foi possível reconhecer que quanto maior a amplitude da corrente do *setpoint*, maior foi o ganho de potência ao incrementar a faixa do controle de corrente, já que aproximasse do valor máximo da corrente. Portanto, com o aumento da potência de entrada, há mais energia elétrica para ser convertida em energia mecânica, aumentando a potência de saída. Este efeito pode ser notado simultaneamente na velocidade média e no conjugado médio do motor, como mostram a Figura 4.49 e Figura 4.50, respectivamente.

Figura 4.49 – Velocidade média para o Ensaio de variação do *setpoint* de histerese.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 4.50 – Conjugado médio para o Ensaio de variação do *setpoint* de histerese.

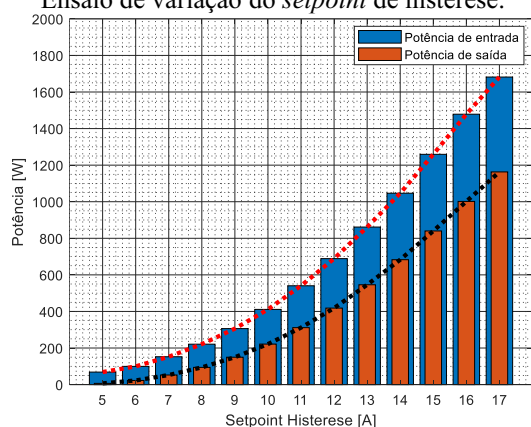


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para o menor *setpoint* de histerese do teste, a velocidade média foi de aproximadamente 72,90 rpm, e para o maior *setpoint* de histerese, a velocidade média foi cerca de 1834 rpm. Desse modo, percebe-se que ao controlar o *setpoint* do controlador de corrente foi passível a modificação da velocidade do motor, a relação entre velocidade média e *setpoint* de histerese foi proporcional. A relação de proporcionalidade entre a histerese e o conjugado também ocorre, onde inicialmente o conjugado produzido pelo motor foi de 0,87 N.m e nos últimos instantes de ensaio, o conjugado foi de 6,05 N.m.

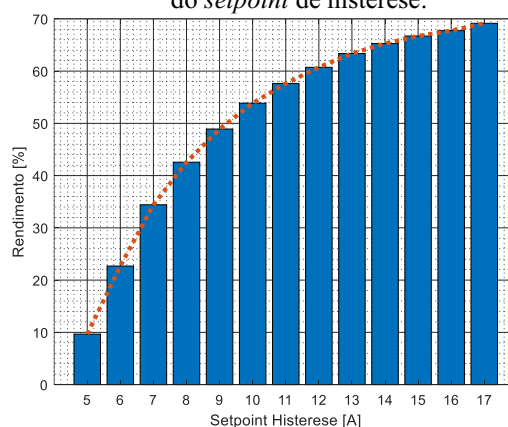
A potência de entrada e a potência de saída foram estimadas e mostradas simultaneamente na Figura 4.51. Como resultado do aumento da velocidade média e do conjugado média, a potência mecânica calculada aumentou em virtude da elevação do *setpoint* do controle de histerese, com correspondência exponencial. Por intermédio das potências estimadas, determinou-se o Rendimento médio para cada um dos níveis de histerese testados, exposto na Figura 4.52.

Figura 4.51 – Potência de entrada e de saída para o Ensaio de variação do *setpoint* de histerese.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 4.52 – Rendimento para o Ensaio de variação do *setpoint* de histerese.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O rendimento calculado mostrou o aumento da eficiência do motor à medida que o valor da janela de histerese aproximava-se de 16 A à 18 A. O menor rendimento percentual foi de 9,66 %, para *setpoint* igual a 5, evidenciando que apesar de permitir trabalhar com velocidades baixas, isso diminui a eficiência do motor. O maior rendimento foi de 69,15 % quando *setpoint* foi de 17 A. Permitindo entender que quanto mais próximo das condições nominais de corrente do motor, maior foi o montante de incremento do rendimento percentual.

Os valores médios de cada um dos parâmetros discutidos a respeito acionamento do MRV 8/6 alterando os valores de *setpoint* do controlador de corrente por histerese estão resumidos na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resumo dos resultados para Ensaio de variação do *setpoint* de histerese.

Setpoint Histerese	Corrente Ibar	Corrente Fase A	Conjugado	Velocidade	Potência de Entrada	Potência de Saída	Rendimento
5,00 A	0,23 A	1,36 A	0,87 N.m	72,90 rpm	68,37 W	6,61 W	9,66 %
6,00 A	0,33 A	1,67 A	1,22 N.m	176,35 rpm	99,58 W	22,59 W	22,69 %
7,00 A	0,50 A	1,95 A	1,61 N.m	309,85 rpm	152,26 W	52,39 W	34,41 %
8,00 A	0,73 A	2,25 A	2,06 N.m	435,19 rpm	220,97 W	94,05 W	42,56 %
9,00 A	1,01 A	2,54 A	2,53 N.m	564,19 rpm	306,08 W	149,71 W	48,91 %
10,00 A	1,36 A	2,82 A	3,02 N.m	699,92 rpm	411,17 W	221,43 W	53,86 %
11,00 A	1,79 A	3,09 A	3,51 N.m	847,42 rpm	540,31 W	311,41 W	57,64 %
12,00 A	2,29 A	3,36 A	3,98 N.m	1002,90 rpm	688,80 W	418,27 W	60,72 %
13,00 A	2,87 A	3,62 A	4,47 N.m	1167,26 rpm	861,49 W	545,89 W	63,37 %
14,00 A	3,49 A	3,88 A	4,90 N.m	1330,44 rpm	1046,34 W	682,91 W	65,27 %
15,00 A	4,21 A	4,14 A	5,33 N.m	1504,92 rpm	1259,16 W	840,04 W	66,72 %
16,00 A	4,95 A	4,40 A	5,70 N.m	1677,13 rpm	1478,54 W	1001,59 W	67,74 %
17,00 A	5,63 A	4,63 A	6,05 N.m	1834,78 rpm	1681,81 W	1162,97 W	69,15 %

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Através dos resultados coletados durante o ensaio foi possível entender o comportamento do MRV e a influência que a limitação da corrente em uma determinada faixa tem sobre a corrente, velocidade, conjugado, potências e rendimento. Durante o ensaio, todas as grandezas analisadas tiveram ganhos de intensidade à medida que o *setpoint* de histerese aumentou, de forma que, quanto mais distante do *setpoint* de 5 A, maior foi o degrau de elevação das grandezas analisadas ao incrementar a tensão.

Além disso, percebeu-se uma proporcionalidade entre o nível do *setpoint* adotado e a velocidade do motor. De modo que, é viável a aplicação de um controle em malha fechada para a velocidade controlando a corrente fornecida ao motor e consequentemente a potência de entrada.

4.3.4 Ensaio 4 – Variação de fases em falta

O objetivo deste teste foi compreender o comportamento do motor a relutância variável 8/6 em situações de perda de fases, analisando o efeito na operação do motor a partir das grandezas mensuradas pela plataforma, permitindo avaliar a tolerância da máquina às faltas. Assim, os parâmetros do controle do acionamento permaneceram constantes e ao longo do

ensaio o estado das fases foi alterado, simulando as perdas de uma fase e de duas fases. A Tabela 4.8 reúne as grandezas estabelecidas para os parâmetros de acionamento do ensaio em questão.

Tabela 4.8 – Parâmetros para o Ensaio de variação da falta de fase.

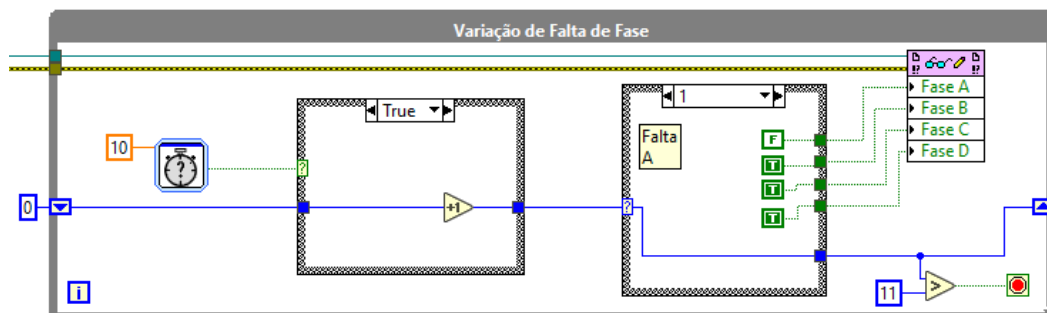
Parâmetros	Valores ajustados
Tensão Barramento CC	150 V
Largura de pulso de excitação	15°
Controle de corrente por Histerese	Desativado
Fases acionadas	Situação de perda de 1 fase e de perda de 2 fases
Controle de Velocidade	Desativado

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como indica a Tabela 4.8, a tensão de alimentação para este ensaio foi de 150 V, o ângulo de condução foi mantido em 15 ° para todas as fases e o simulador de carga foi deixado constante durante o ensaio. Os parâmetros foram definidos de modo a permitir ao motor partir com a carga requerida e que, como medida de segurança, valor máximo das correntes de fase não ultrapassasse 30 A. Destaca-se que neste ensaio o motor foi acionado em malha aberta, nenhuma forma de controle foi aplicada a fim de analisar as respostas naturais da máquina a perdas de fase.

Em vista de facilitar o acionamento do motor com a perda das fases desejadas, foi adicionada uma rotina que permitiu controlar o acionamento via código, programando em LabVIEW, de maneira que fosse alternado quais fases entrariam em falta para cada instante do teste. Além disso, ao decorrer do ensaio, os valores mensurados foram coletados e salvos em formato de documento de texto, com frequência de amostragem de 40 kHz. A Figura 4.53 exibe o processo para alternar as fases em falta.

Figura 4.53 – Código em LabVIEW para variação da perda de uma fase e a perda de duas fases.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O código criado possibilitou alterar as fases que permaneceriam desenergizadas a cada 10 segundos de ensaio, ou seja, mesmo que o rotor estivesse na posição designada para condução, o conversor AHB manteria as chaves abertas, simulando a falta de determinada fase. A Tabela 4.9 descreve em quais fases foram consideradas em falta para cada instante de tempo do ensaio, limitando-se a duas fases.

Tabela 4.9 – Fases em falta para o Ensaio de variação da falta de fase.

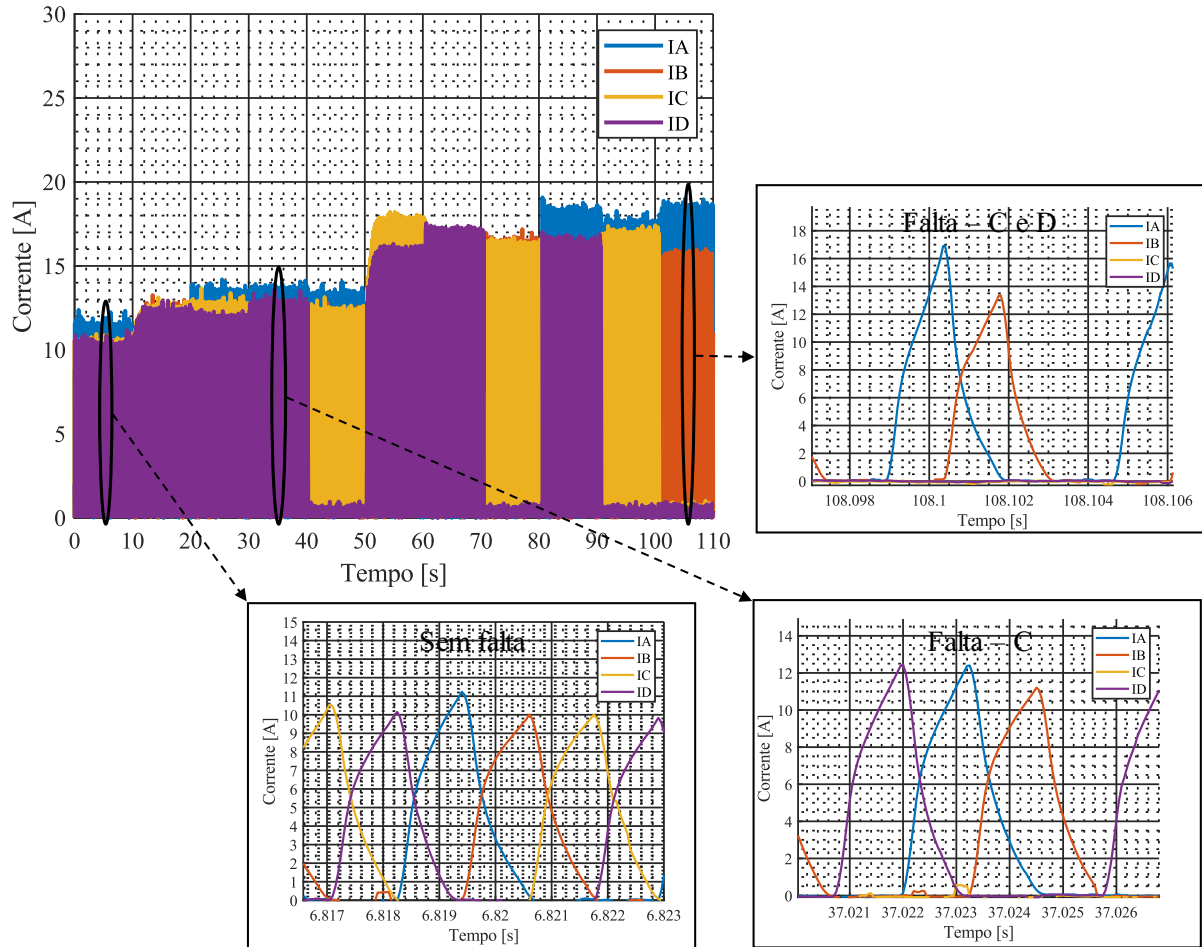
Tempo de ensaio	Condição das fases
0 a 10 segundos	Sem perda de Fase
10 a 20 segundos	Perda da Fase A
20 a 30 segundos	Perda da Fase B
30 a 40 segundos	Perda da Fase C
40 a 50 segundos	Perda da Fase D
50 a 60 segundos	Perda da Fase A e Fase B
60 a 70 segundos	Perda da Fase A e Fase C
70 a 80 segundos	Perda da Fase A e Fase D
80 a 90 segundos	Perda da Fase B e Fase C
90 a 100 segundos	Perda da Fase B e Fase D
100 a 110 segundos	Perda da Fase C e Fase D

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como indicado, durante o ensaio foi averiguado o efeito da perda de fase para cada combinação possível, restringindo-se a faltas em 1 fase e faltas em 2 fases. Ressalta-se que nos primeiros 10 segundos de experimento, foi averiguado o funcionamento do motor sem a ocorrência de perdas, estipulando a base para entendimento dos resultados. Nos próximos 40 segundos, aplicou-se perdas de somente uma fase e nos últimos 60 segundos de ensaio, foi efetuado as perdas para duas fases.

As correntes instantâneas das quatro fases para os 110 segundos de teste estão sendo mostradas na Figura 4.54. Foram destacados três momentos específicos, uma situação sem aplicação de falta, uma situação com a aplicação da falta na Fase C e outra situação com a perda de duas fases (Fase C e Fase D).

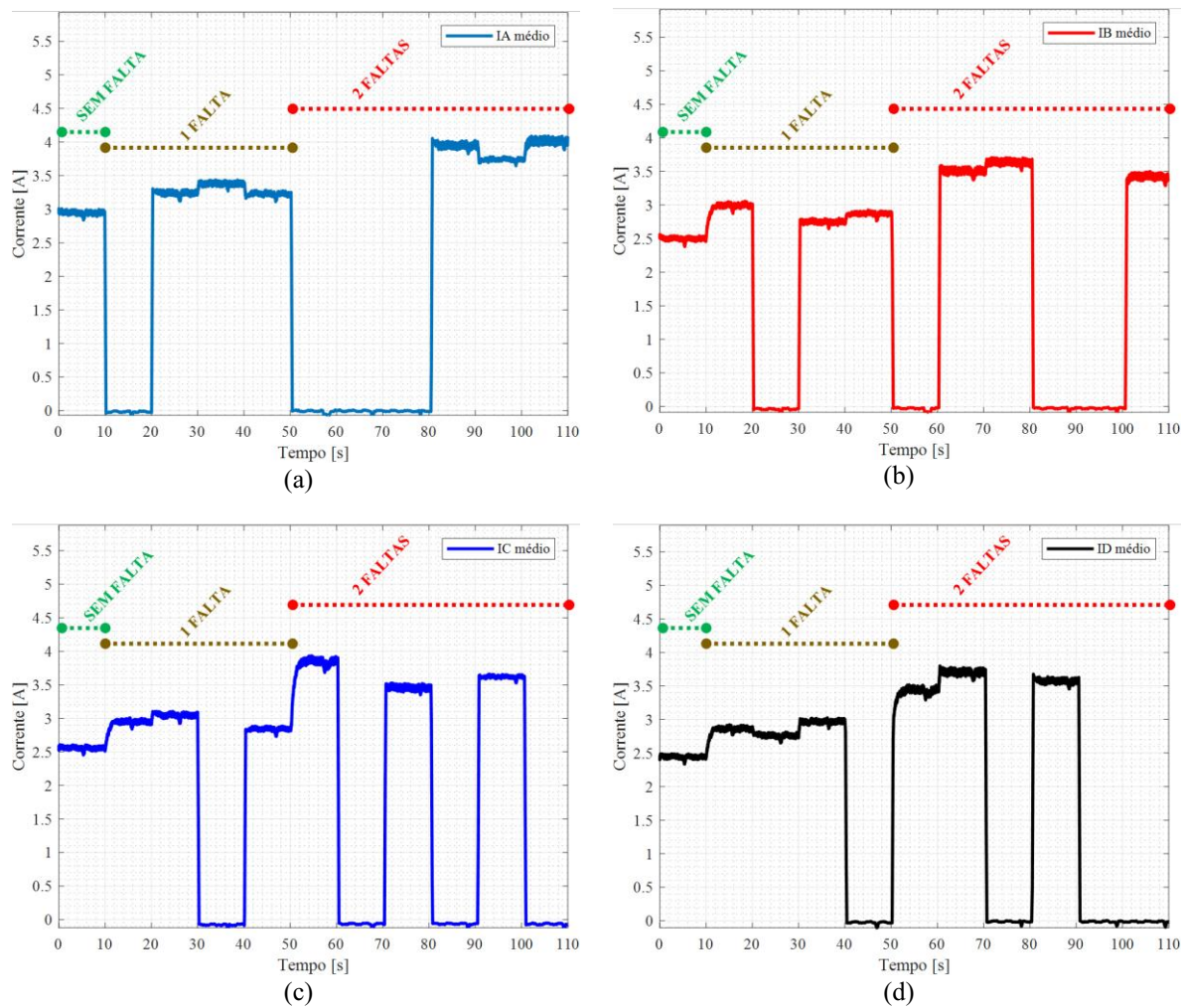
Figura 4.54 – Corrente instantânea das quatro fases para o Ensaio de variação da falta de fase.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como pode ser inferido através da Figura 4.56, no princípio do ensaio todas as fases estavam ativas. No tempo entre 30 e 40 segundos, a Fase C do motor foi perdida e nos últimos 10 segundos de ensaio, além da perda da Fase C, a Fase D também entra em falta, de modo que somente as Fases A e B estão sendo energizadas. Notadamente, no momento de falta, as correntes restantes elevaram suas amplitudes em vista de compensar a saída das fases perdidas e em função da diminuição da velocidade, que aumentou o tempo em que cada fase permanece excitada. O aumento da amplitude refletiu diretamente na média móvel das correntes de fase, como permite analisar a Figura 4.55.

Figura 4.55 – Média móvel das correntes de fase para o Ensaio de variação da falta de fase:



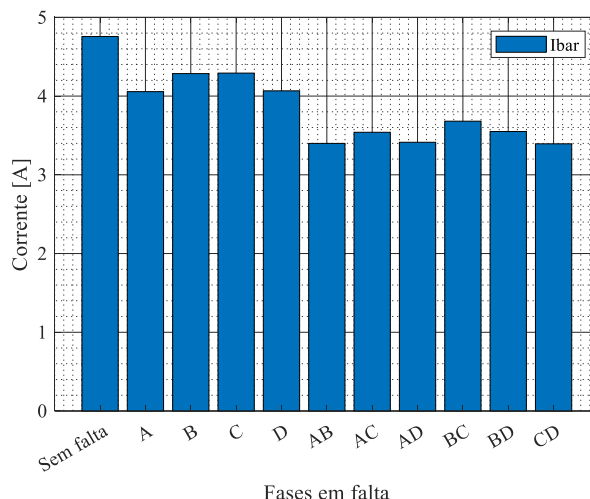
(a) Fase A; (b) Fase B; (c) Fase C; (d) Fase D.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

De acordo com a Figura 4.55 nota-se que a ocorrência de falta elevou a média das correntes das fase restantes, sendo que a elevação das correntes foi maior para duas fases perdidas. Além disso, percebe-se que a perda de diferentes fases impacta a média das fases remanescentes com intensidade distinta, como pode ser notado Figura 4.55 (d), no tempo de ensaio entre 10 e 40 segundos, em que as perdas das outras fases alteraram sua média para três valores desiguais. Isto acontece devido ao aspecto construtivo do protótipo utilizado, podendo haver algum desalinhamento entre o rotor e o estator, ressaltando que a máquina foi produzida para fins acadêmicos.

Apesar da elevação da média das correntes de fase, a corrente de entrada tem seu valor decrescido com a falta de fases, já que durante parte do tempo de acionamento (1/4 e 2/4 do tempo) nenhuma fase foi excitada. A Figura 4.56 apresenta as correntes do barramento CC para cada uma das configurações de falta ensaiadas, em formato de gráfico de barras.

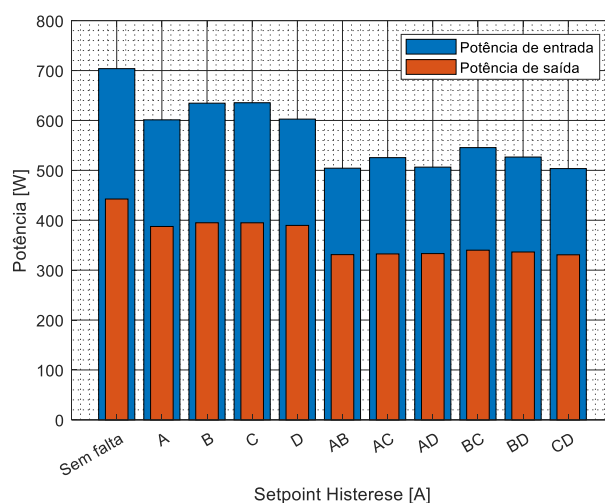
Figura 4.56 – Gráfico de barra das correntes de entrada para o Ensaio de variação da falta de fase.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para a ocasião de perda de somente uma das quatro fases, as correntes do barramento CC diminuíram cerca de 12,5 %. Mesmo com a perda de duas fases, a corrente fornecida ao motor decaiu aproximadamente 26 %. A mesma porcentagem foi registrada para a potência de entrada, considerando que a tensão no barramento CC foi constante durante todo ensaio, 150 V, a potência de entrada estimada é reflexo direto da corrente. A Figura 4.57 exibe a potência de entrada e a potência de saída, ambas estimadas através das medições realizadas.

Figura 4.57 – Gráfico de barra das potências de entrada e de saída para o Ensaio de variação da falta de fase.

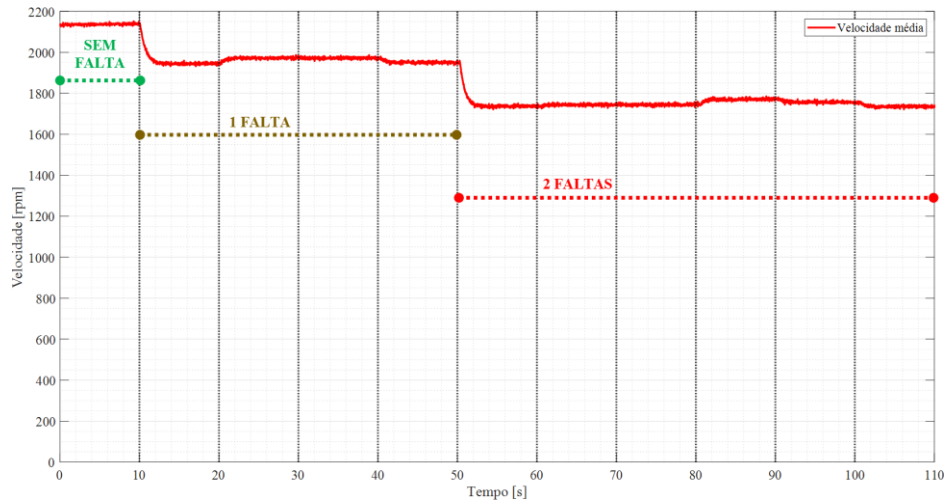


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para perda de uma fase, a queda da potência de entrada foi em média 12 % e a potência de saída foi de 11 %. Para perda de duas fases, a diminuição média da potência de entrada foi de 26 % e a potência de saída foi de 25 %. Assim, com a diminuição da potência de entrada

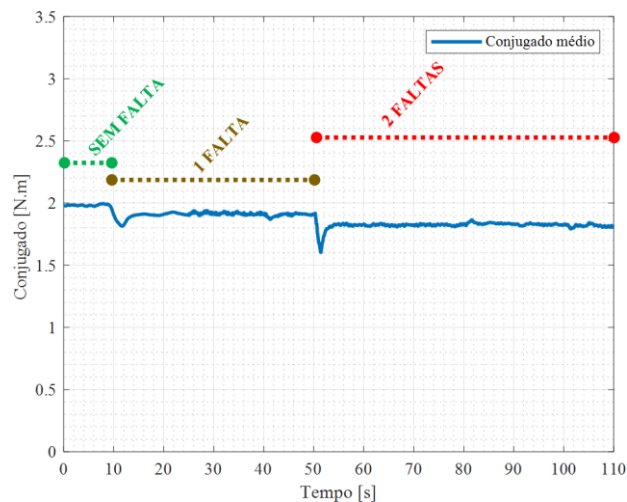
durante a falta, conseqüentemente, ocorreu a diminuição da potência mecânica produzida, refletindo nos valores de velocidade e conjugado entregues pelo motor. A velocidade e o conjugado estão sendo mostrados, respectivamente, na Figura 4.58 e na Figura 4.59.

Figura 4.58 – Velocidade média para o Ensaio de variação da falta de fase.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 4.59 – Conjugado médio para o Ensaio de variação da falta de fase.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Inicialmente, para o ensaio sem a aplicação da falta, a velocidade média foi de 2135 rpm. Quando aplicado a perda de uma fase, a velocidade decaiu, alcançando valores entre 1949 e 1971 rpm (cerca de 8,5 % menor do que a operação sem perda de fase). Enquanto que, para duas fases em falta, a velocidade diminuiu para 1734,03 rpm à 1768,94 rpm, equivalente a 18 % menor comparado a operação sem falta. O conjugado médio mensurado ao longo do experimento também mostrou redução à medida que as fases foram perdidas. De modo que,

iniciou-se o ensaio com conjugado médio igual 1,98 N.m e para duas fases perdidas, o conjugado reduziu cerca de 8 %, chegando ao montante de 1,82 N.m.

Os valores médios de cada um dos parâmetros discutidos a respeito acionamento do MRV 8/6, quando inserido situações de falta de fase, estão agrupados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Resumo dos resultados para o Ensaio de variação da falta de fase.

Perda de fase	Corrente Ibar	Corrente Fase A	Conjugado	Velocidade	Potência de Entrada	Potência de Saída
Sem falta	4,76 A	2,94 A	1,98 N.m	2135,59 rpm	703,87 W	442,56 W
A	4,06 A	-0,02 A	1,90 N.m	1943,90 rpm	601,22 W	387,52 W
B	4,29 A	3,23 A	1,91 N.m	1971,50 rpm	634,66 W	394,98 W
C	4,29 A	3,37 A	1,91 N.m	1970,99 rpm	635,54 W	394,91 W
D	4,07 A	3,23 A	1,91 N.m	1949,94 rpm	602,72 W	389,67 W
AB	3,40 A	-0,01 A	1,82 N.m	1736,70 rpm	504,36 W	331,11 W
AC	3,54 A	0,00 A	1,82 N.m	1742,88 rpm	525,50 W	332,53 W
AD	3,41 A	-0,01 A	1,82 N.m	1743,92 rpm	506,49 W	333,20 W
BC	3,68 A	3,94 A	1,84 N.m	1768,94 rpm	545,59 W	340,03 W
BD	3,55 A	3,75 A	1,83 N.m	1756,74 rpm	526,70 W	336,41 W
CD	3,39 A	4,01 A	1,82 N.m	1734,03 rpm	503,55 W	330,77 W

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Através dos resultados coletados durante o ensaio foi possível entender o comportamento do MRV e a influência que a falta de fases exerce nas correntes, velocidade, conjugado e potências MRV. Observou-se que a falta de fases impactou a velocidade e o conjugado entregues pelo motor, entretanto, o impacto foi relativamente pequeno. Já que, mesmo com a perda de duas fases, a maior redução do conjugado foi de 8 % e a maior redução da velocidade foi 18 %.

4.4 Ensaio com aplicação de controle de velocidade

Com a plataforma de instrumentação virtual pronta para aplicar o controle de velocidade, foram realizados dois ensaios em que o *setpoint* foi sendo alterado durante o tempo, buscando analisar o comportamento do MRV 8/6 sob aplicação do controle de velocidade. Ao longo de ambos os ensaios, os parâmetros de acionamento permaneceram constantes e grandezas mensuradas foram salvas em um documento de texto.

4.4.1 Resposta a referência em degrau

Para execução deste ensaio foi aplicado dois degraus de velocidade no *setpoint* do controlador de velocidade, 2000 rpm e 1000 rpm, a fim de verificar a resposta do controle. A tensão de excitação aplicada no motor foi de 200 V, o ângulo de condução foi mantido em 15° para todas as fases e o simulador de carga foi deixado constante. Destaca-se que neste ensaio o motor foi acionado em malha fechada de velocidade, com regulador de corrente por histerese ativado, como mostra a Tabela 4.11.

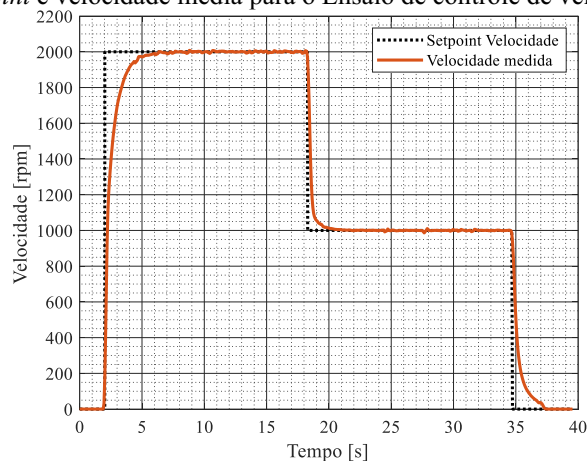
Tabela 4.11 – Parâmetros para o Ensaio de controle de velocidade com degrau.

Parâmetros	Valores ajustados
Tensão Barramento CC	200 V
Largura de pulso de excitação	15°
Controle de corrente por Histerese	Ativado
Fases acionadas	Todas as fases
Controle de Velocidade	Ativado (degrau)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A resposta da velocidade do motor mediante a alteração do *setpoint* pode ser observada na Figura 4.60. O primeiro degrau de velocidade foi de 2000 rpm, de modo que, o motor começou o ensaio parado e após o ajuste do controle para a referência requerida, a velocidade foi alcançada com erro médio de 1,12 %. Na transição do *setpoint* de 2000 rpm para 1000 rpm, após um período transitório, a velocidade atingiu 1000 rpm com erro médio de 0,92 %. Por fim, a referência de velocidade foi a zero e como indica a figura, o motor volta a ficar imóvel.

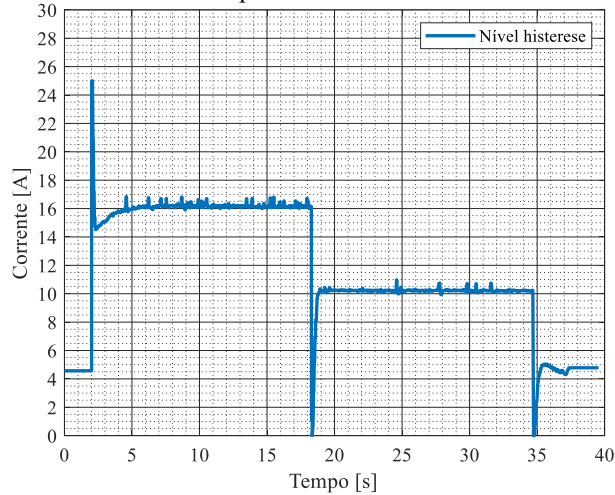
Figura 4.60 – *Setpoint* e velocidade média para o Ensaio de controle de velocidade com degrau.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

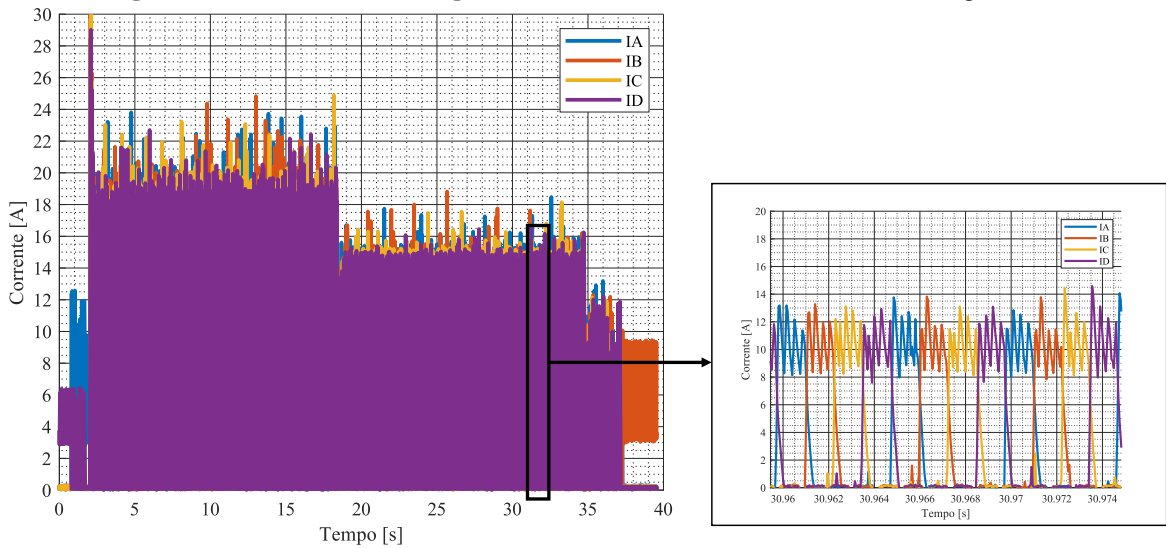
A saída do controlador PI representa o *setpoint* de histerese que foi aplicado no regulador das correntes das fases, ressaltando que o mesmo *setpoint* de histerese foi fornecido para todas as fases. O *setpoint* de histerese ao longo do ensaio está apresentado na Figura 4.61 e a corrente instantânea para as quatro fases do MRV 8/6 estão mostradas na Figura 4.62.

Figura 4.61 – Saída do controlador PI para o Ensaio de controle de velocidade com degrau.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

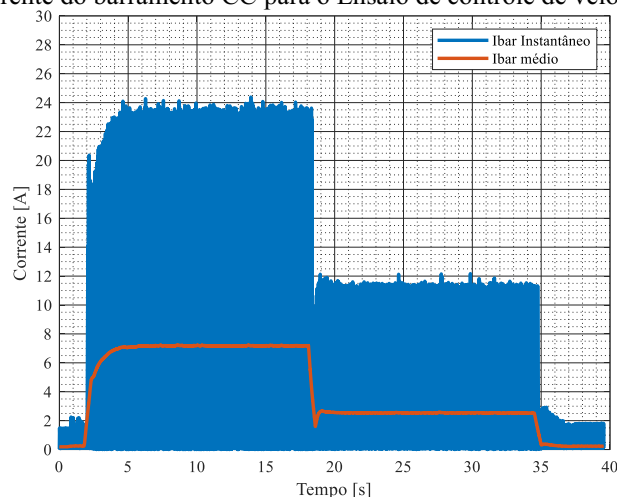
Figura 4.62 – Correntes de fase para o Ensaio de controle de velocidade com degrau.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O *setpoint* de histerese encontrou um valor constante para cada um dos degraus aplicados (16 A para 2000 rpm e 10 A para 1000 rpm), entretanto, foi possível observar pequenas perturbações durante o regime permanente. O momento transitório percebido na curva de velocidade foi originado devido ao ajuste do controlador PI nas ocasiões em que ocorre a alteração do *setpoint* de histerese.

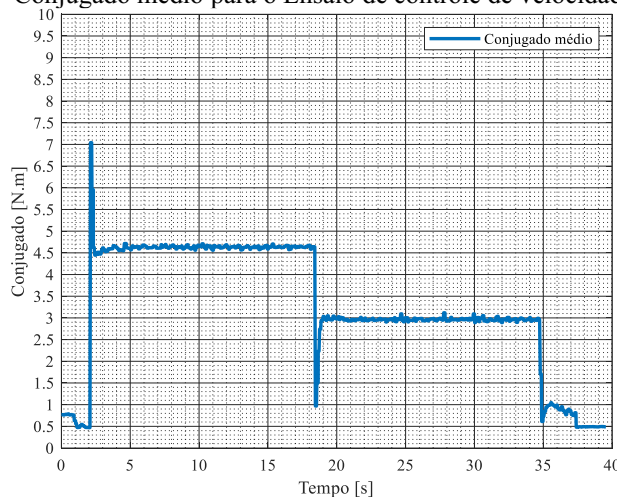
Figura 4.63 – Corrente do barramento CC para o Ensaio de controle de velocidade com degrau.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Controlando a corrente de fase, como notado nos ensaios de variação do *setpoint* de histerese, a corrente do barramento CC do motor tem o valor máximo e valor médio impactados, explicitado na Figura 4.63. Em resposta a oscilação da corrente de entrada, em função de manter a velocidade no *setpoint* solicitado, vê-se uma variação proporcional no conjugado médio produzido pelo motor, de acordo com a Figura 4.64.

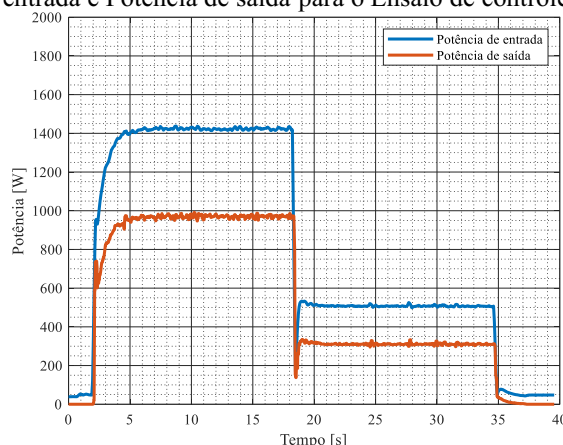
Figura 4.64 – Conjugado médio para o Ensaio de controle de velocidade com degrau.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Devido ao degrau na corrente de entrada, com a tensão de alimentação constante, a potência de entrada apresenta o mesmo perfil. Além disso, a potência de saída apresenta o mesmo perfil do conjugado e da velocidade, onde nota-se dois degraus. A Figura 4.65 apresenta a potência de entrada e a potência de saída estimadas.

Figura 4.65 – Potência de entrada e Potência de saída para o Ensaio de controle de velocidade com degrau.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

De modo geral, o controle de velocidade apresentou bons resultados, conseguindo encontrar o *setpoint* do controle de corrente por histerese adequado para manter a velocidade nos montantes solicitados. Alguns segundos de transitório foram necessários para que o *setpoint* de histerese fosse encontrado e para que a velocidade estabilizasse para a referência em forma de degraus. Depois que o MRV atingiu em regime permanente, o controle foi suficientemente bem projetado para conseguir fixar a velocidade, ocorrendo somente pequenas variações, havendo baixo erro médio entre o *setpoint* e a velocidade medida.

4.4.2 Resposta a referência em Rampa

Para execução deste ensaio foi aplicado como referência ao controle de velocidade uma rampa crescente e, em seguida, uma rampa decrescente de velocidade, a fim de verificar a resposta do controle. A tensão de excitação aplicada no motor foi de 200 V, o ângulo de condução foi mantido em 15° para todas as fases e o simulador de carga foi deixado constante. Destaca-se que neste ensaio o motor foi acionado em malha fechada de velocidade, com regulador de corrente por histerese ativado, como mostra a Tabela 4.12.

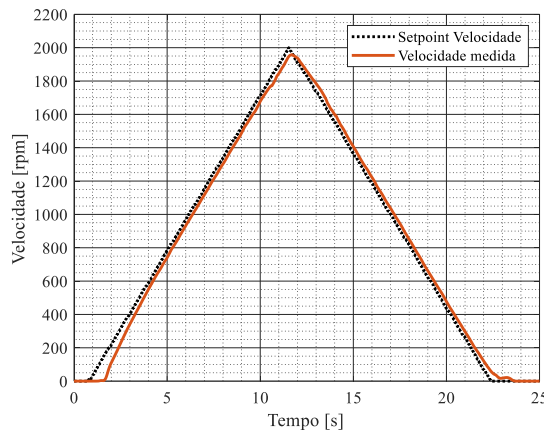
Tabela 4.12 – Parâmetros para o Ensaio de controle de velocidade com rampa.

Parâmetros	Valores ajustados
Tensão Barramento CC	200 V
Largura de pulso de excitação	15°
Controle de corrente por Histerese	Ativado
Fases acionadas	Todas as fases
Controle de Velocidade	Ativado (rampa)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A forma de onda do *setpoint* de velocidade adotado pode ser vista na Figura 4.66, apresentando formato semelhante ao ciclo positivo de uma onda triangular, com 10 segundos de subida e outros 10 segundos de descida, onde o valor de pico foi de 2000 rpm. A resposta da velocidade do motor mediante a alteração do *setpoint* apresentou erro médio de 2,5 %, sendo possível inferir que, apesar do controlador PI aplicado não conseguir atracar a velocidade à referência, a resposta ao controle permitiu alcançar perfil de velocidade próximo ao desejado.

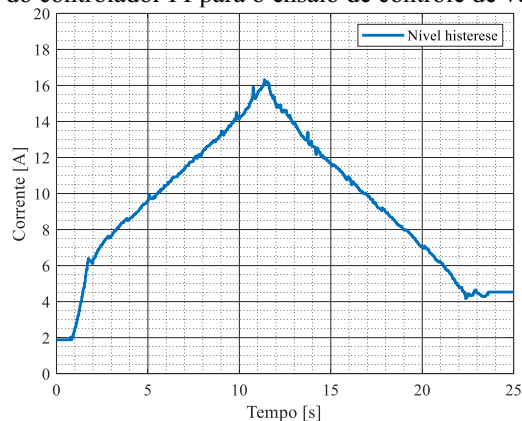
Figura 4.66 – *Setpoint* e velocidade para o Ensaio de controle de velocidade com rampa.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

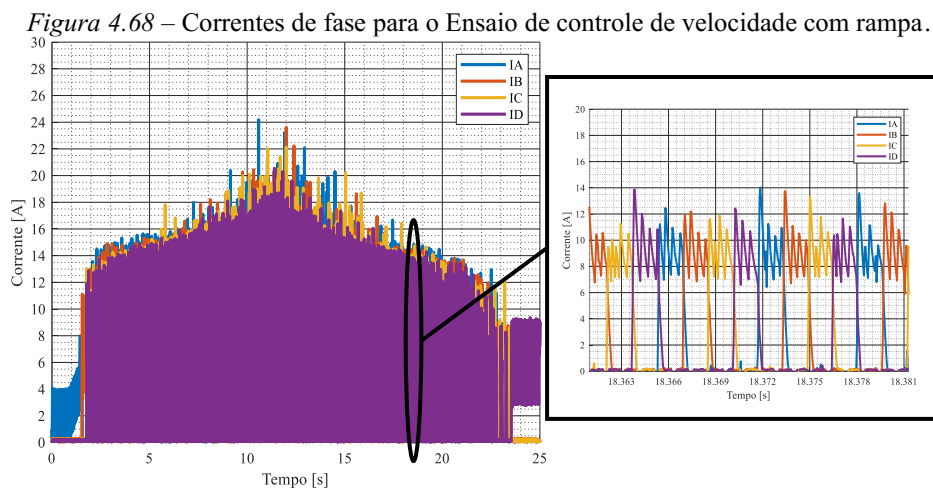
O *setpoint* de histerese enviado ao regulador de corrente, ao longo do ensaio, está apresentado no Figura 4.67. O valor da janela de histerese foi calculado de acordo com erro de velocidade do controlador, em que, por meio do sinal de saída do controlador PI, nota-se que o regulador apresenta forma aproximada ao *setpoint* de velocidade requerido.

Figura 4.67 – Saída do controlador PI para o ensaio de controle de velocidade com rampa.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

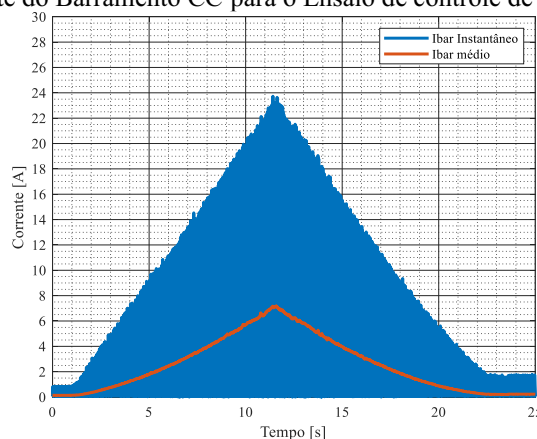
As correntes instantâneas das quatro fases do MRV 8/6 estão mostradas na Figura 4.68, as quais estão sendo regulados de acordo com o *setpoint* do regulador por histerese. É percebido que o controlador não zera as correntes nos momentos de *setpoint* de velocidade igual a 0 rpm (momentos iniciais e finais do ensaio), considerando que baixas correntes não conseguem operar o motor. As correntes de cada uma das fases apresentam formato típico de correntes reguladas por histerese, possibilitando analisar que o regulador estava de fato operando como necessário.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 4.69 exibe as correntes do barramento CC instantâneas e os valores médios no tempo. A corrente de entrada, no barramento CC, apresenta crescimento de suas amplitudes seguindo o perfil da velocidade, mostrando que o controle empregado realmente atuou controlando as correntes de entrada. Isto também é percebido por meio da corrente média, que mostra forma próxima a triangular.

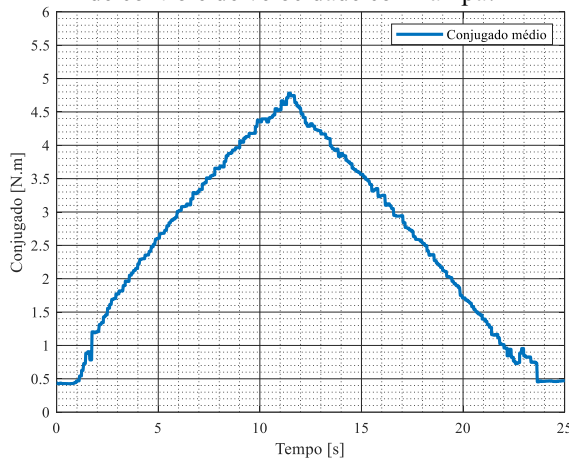
Figura 4.69 – Corrente do Barramento CC para o Ensaio de controle de velocidade com rampa.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

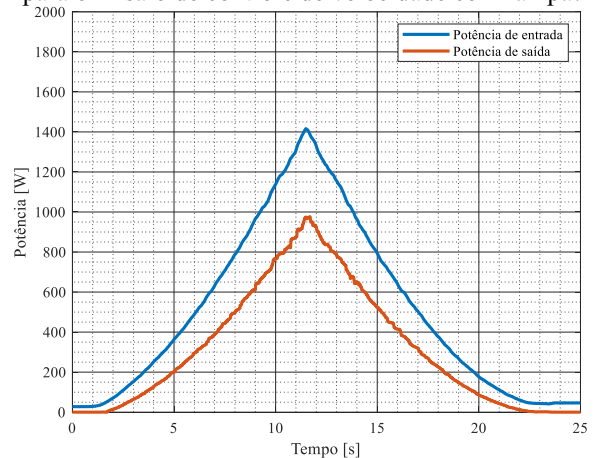
O conjugado médio, em resposta a mudança da corrente de entrada, para manter a velocidade no montante requisitado, foi sendo alterado durante o ensaio, apresentando o mesmo perfil triangular da velocidade, como pode ser notado na Figura 4.70. A potência de entrada, assim como a potência de saída responderam ao controle de velocidade, como visto na Figura 4.71. Devido ao formato da corrente de entrada, com a tensão de alimentação constante, a potência de entrada apresentou o mesmo perfil da velocidade. Além disso, a potência de saída apresenta o mesmo perfil do conjugado e da velocidade.

Figura 4.70 – Conjugado médio saída para o Ensaio de controle de velocidade com rampa.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 4.71 – Potência de entrada e Potência de saída para o Ensaio de controle de velocidade com rampa.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

De modo geral, o controle de velocidade apresentou bons resultados, conseguindo encontrar o *setpoint* do controle de corrente por histerese adequado para manter a velocidade nos montantes solicitados e, apesar de não atracar a velocidade ao *setpoint* do controle, o erro encontrado foi relativamente baixo. Alguns segundos de transitório foram necessários para que o *setpoint* de histerese fosse encontrado e para que a velocidade conseguisse seguir o formato da rampa de subida e descida.

4.5 Ensaio com aplicação do Estimador de conjugado

Este ensaio consistiu na aplicação do estimador de conjugado agregado a plataforma. Para execução deste ensaio foi aplicado no barramento CC tensões de 30, 40, 50, 75, 100, 125 e 150 V. O ângulo de condução foi mantido em 15° para todas as fases e o simulador de carga permaneceu constante. Destaca-se que o MRV 8/6 foi acionado em malha aberta de velocidade e com regulador de corrente por histerese desativado, como mostra a Tabela 4.13. Durante o

ensaio, todos os dados coletados, calculados e estimados foram salvos com uma taxa de amostragem de 40 kHz.

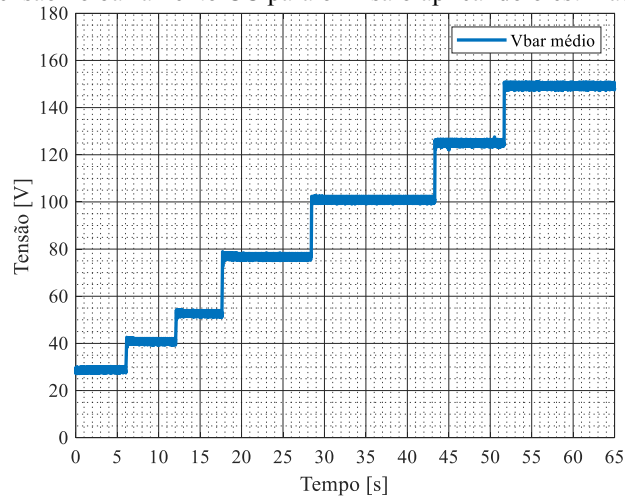
Tabela 4.13 – Parâmetros para o Ensaio aplicando o estimador de conjugado.

Parâmetros	Valores ajustados
Tensão Barramento CC	Variável
Largura de pulso de excitação	15°
Controle de corrente por Histerese	Desativado
Fases acionadas	Todas as fases
Controle de Velocidade	Desativado
Simulador de carga	Constante

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A tensão entregue pela fonte ao motor pode ser observada na Figura 4.72. Nota-se que o ensaio apresentou duração total de 65 segundos, em que a tensão variou entre 30 V e 150 V.

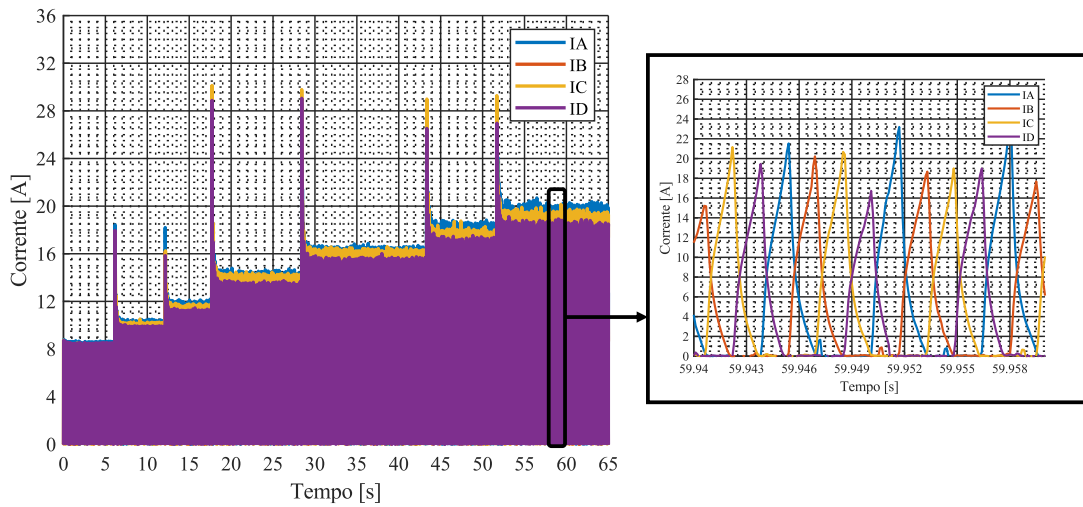
Figura 4.72 – Tensão no barramento CC para o Ensaio aplicando o estimador de conjugado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

As correntes instantâneas para as quatro fases estão registradas na Figura 4.73, onde nota-se o aumento da amplitude das correntes ao grau que a tensão aplicada nos enrolamentos aumentou. No instante de tempo destacado, percebe-se que as correntes de fase estão em grau máximo de condução, de modo que não haja sobreposição de fase.

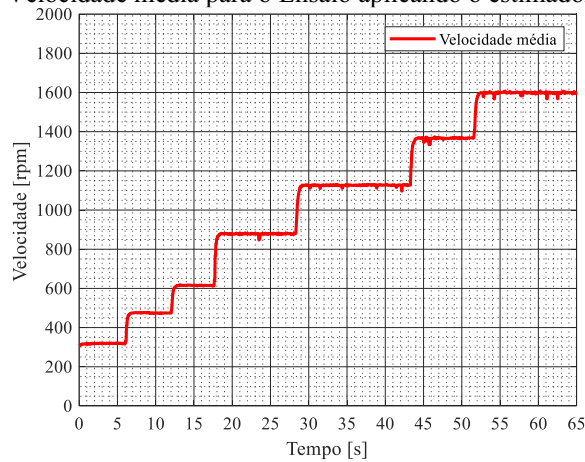
Figura 4.73 – Correntes de fase instantânea para o Ensaio aplicando o estimador de conjugado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A velocidade resultante ao acionamento da máquina compreende montantes entre 300 rpm e 1600 rpm. A velocidade demonstrou comportamento de elevação de seus valores em função da elevação da tensão de entrada fornecida, já que a alteração da tensão implica diretamente na potência de entrada consumida pelo motor. A velocidade média está sendo apresentada na Figura 4.74 para os 65 segundos de ensaio.

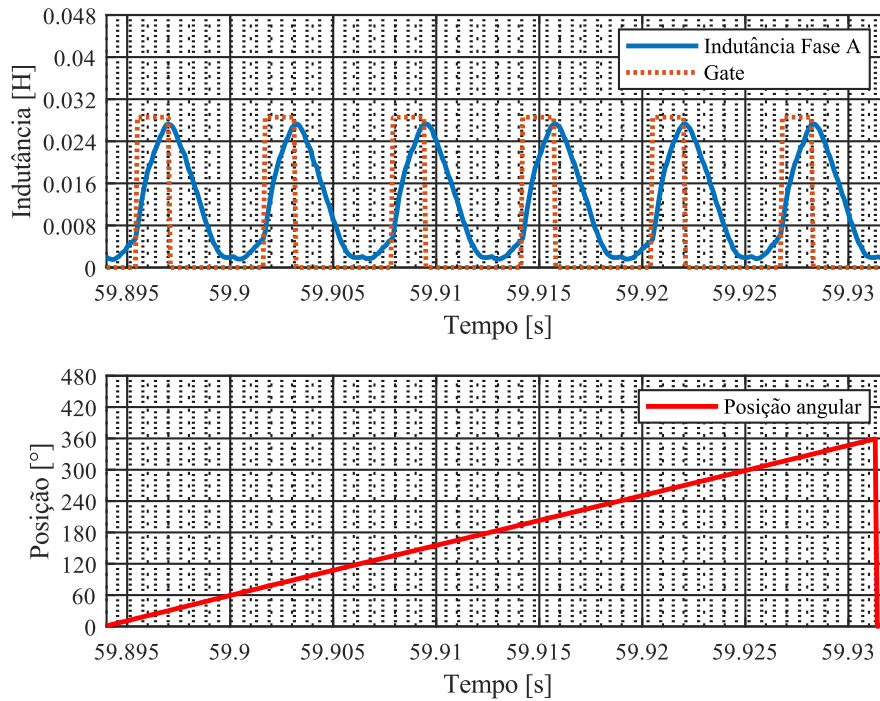
Figura 4.74 – Velocidade média para o Ensaio aplicando o estimador de conjugado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Fornecendo a medição da corrente das quatro fases pelos sensores Hall e a medição posição mecânica do rotor pelo encoder absoluto, o estimador calculou a indutância estimada para cada fase do motor. A Figura 4.75 exibe a indutância estimada da Fase A, o disparo de *gate* da Fase A e a posição angular do rotor.

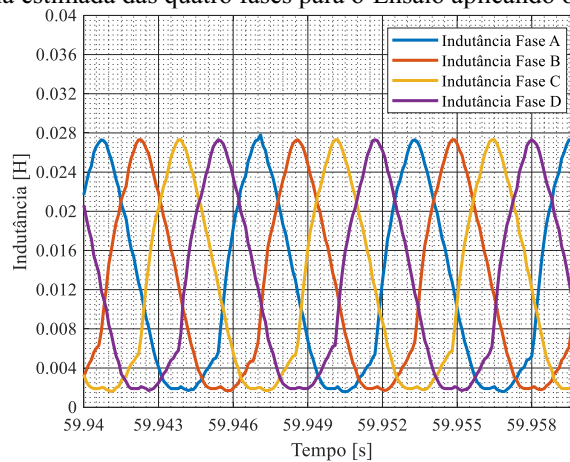
Figura 4.75 – Indutância estimada da Fase A para o Ensaio aplicando o estimador de conjugado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para uma rotação completa do rotor, nota-se que na indutância da Fase A o perfil de oscilou seis vezes, a cada 60° mecânicos, correspondendo aos momentos em que os polos salientes do MRV 8/6 deslocavam-se entre a posição de menor e maior relutância. Os pulsos de disparo foram acionados nos momentos em que havia o incremento positivo de indutância, permitindo validar que a máquina estava operando como motor. A indutância estimada para as quatro fases do MRV 8/6 está registrada na Figura 4.76.

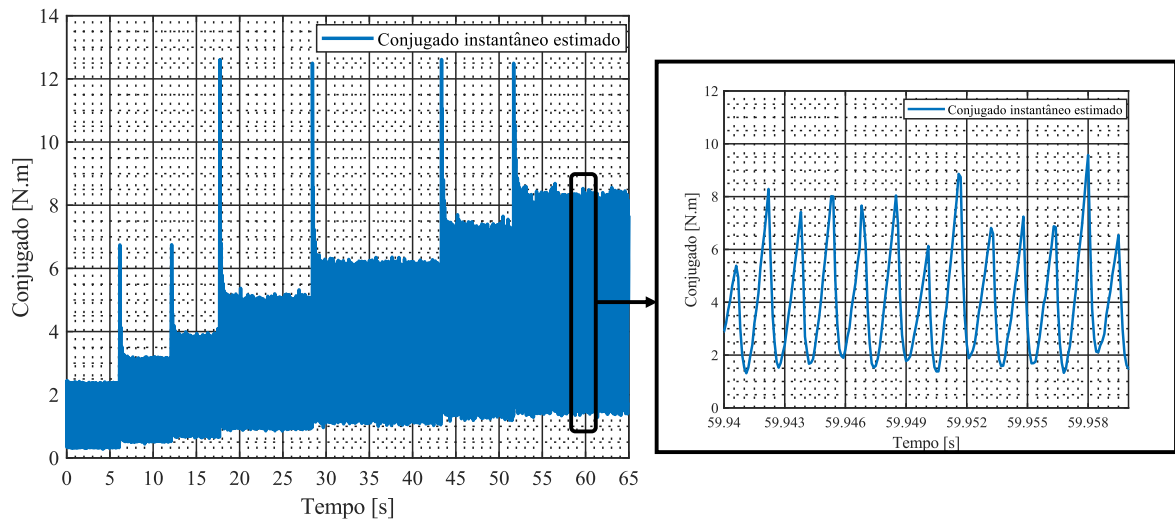
Figura 4.76 – Indutância estimada das quatro fases para o Ensaio aplicando o estimador de conjugado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O estimador aplicou internamente a indutância estimada na Equação 2.12 e calculou o conjugado eletromagnético instantâneo para cada uma das fases do motor. A Figura 4.77 exibe o conjugado estimado, somando as contribuições do conjugado estimado de cada fase.

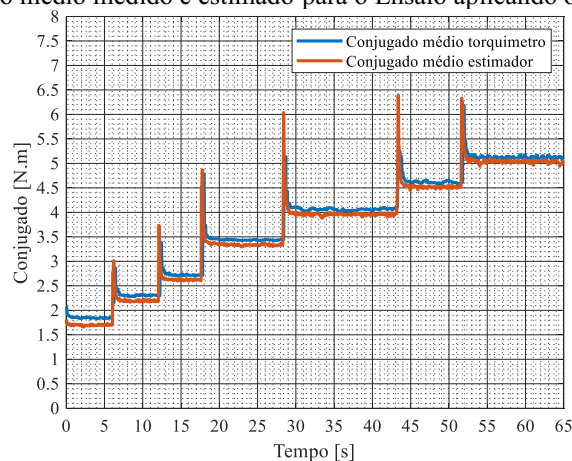
Figura 4.77 – Conjugado instantâneo estimado para o Ensaio aplicando o estimador de conjugado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O valor médio do conjugado eletromagnético estimado foi determinado ao longo de todo o ensaio, permitindo comparar com o conjugado mensurado pelo torquímetro agregado a plataforma. A Figura 4.78 exibe o conjugado médio medido pelo torquímetro e o conjugado médio encontrado a partir do estimador.

Figura 4.78 – Conjugado médio medido e estimado para o Ensaio aplicando o estimador de conjugado.

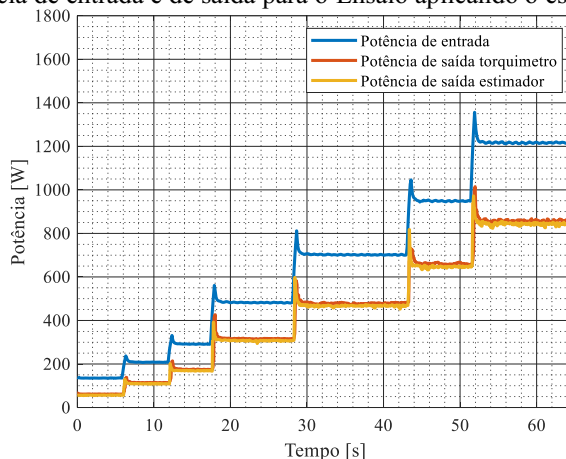


Fonte: Elaborado pelo Autor.

O conjugado estimado foi visualmente próximo à medição advinda do torquímetro e o erro médio encontrado o ensaio foi de aproximadamente 2,11 %. Aplicando os valores de

conjugado médio estimado, o conjugado médio coletado pelo torquímetro e a velocidade média encontrada, calculou-se a potência de saída. A potência de entrada também foi calculada a partir da tensão e corrente fornecidas pela fonte, lidas no barramento CC. A Figura 4.79 apresenta os resultados obtidos para a potência de entrada e para a potência de saída para todo o ensaio.

Figura 4.79 – Potência de entrada e de saída para o Ensaio aplicando o estimador de conjugado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Através desse teste foi possível validar a versatilidade da plataforma de instrumentação virtual em acionar o MRV 8/6 e agregar novos procedimentos ao código já estabelecido, como o estimador de conjugado. Sendo assim, foi aplicado o estimador que possibilitou visualizar em tempo real a indutância estimada e o conjugado eletromagnético estimado, permitindo monitorar novas grandezas impactantes no acionamento do MRV por meio da plataforma.

4.6 Considerações finais

Uma grande gama de ensaios foi implementada neste capítulo em busca de validar o correto funcionamento da plataforma de instrumentação virtual, analisando o efeito dos parâmetros de acionamento e capacidade do sistema de aquisição de dados em monitorar em tempo real as grandezas de interesse. Também foi exposto a simplicidade de acréscimo de novos procedimentos a plataforma, como mostrado pela implementação do controle de velocidade e o estimador de conjugado.

Nos experimentos de comparação entre as grandezas mensuradas pela plataforma e as grandezas medidas por instrumentos convencionais, ficou evidente que o sistema de aquisição de dados apresentou resultados satisfatórios. A taxa de amostragem permitiu reconstruir os sinais de corrente e tensão fidedignamente e os sensores foram bem condicionados e calibrados.

Por meio destes ensaios também foi possível analisar o acionamento da máquina como motor, verificando o comportamento do mesmo mediante o controle de corrente por histerese.

Os testes com variação de parâmetros permitiram compreender as respostas naturais do MRV 8/6 frente à mudança da tensão de alimentação, do θ_{off} e do *setpoint* do controlador de corrente por histerese. Ainda, foram realizados experimentos com a imposição de falta de fases para diferentes combinações. A variação de parâmetros foi implementada de maneira programática, considerando que a plataforma possibilita a alteração das grandezas de acionamento de forma manual através da interface, foram criadas rotinas que alteravam automaticamente os valores de controle de acordo com o solicitado.

Foi apresentado o acréscimo do controle de velocidade à plataforma, realizado com simplicidade, devido à estrutura já presente. O controle implementado mostrou bom desempenho, conseguindo impor a velocidade com baixa taxa de erro. Também foi apresentado a implementação do estimador de conjugado junto a plataforma, possibilitando monitorar a indutância, conjugado eletromagnético e fluxo.

5. CONCLUSÕES

5.1 Considerações finais

Neste trabalho foi apresentada uma contribuição para o desenvolvimento de plataformas de acionamento, controle e monitoramento de Motores a Relutância Variável com a aplicação de técnicas de instrumentação virtual. Foi possível verificar que a plataforma desenvolvida permitiu o controle dos parâmetros de acionamento por meio de uma interface gráfica ou mesmo programaticamente. O monitoramento de todas as grandezas foi disponibilizado em tempo real na interface gráfica, mostrando os valores instantâneos e os valores médios calculados. Além disso, a plataforma poderá possibilitar a realização de futuras pesquisas em um ambiente propício, intuitivo e flexível.

Os componentes utilizados para construção da plataforma, bem como os procedimentos realizados, foram apresentados e discutidos detalhadamente. Foi ressaltada a preocupação com a flexibilidade e futuras adesões ao código de controle, fornecendo comunicação com o código principal através do Computador e do núcleo DSP do controlador empregado, de modo que, fosse possível utilizar os dados coletados para controlar os parâmetros disponíveis no acionamento. Em vista de demonstrar a usabilidade, foram utilizadas as medições de velocidade e o regulador do *setpoint* de histerese para implementação do controle de velocidade em malha fechada. Além disso, também foram usados a corrente e posição angular mensuradas para implementação de um estimador de conjugado.

Os resultados experimentais apresentados e discutidos permitiram compreender a importância da instrumentação virtual na construção de plataformas para fins educacionais e de pesquisa. Principalmente quando se trata de manuseio de parâmetros de acionamento durante a operação do motor e da aquisição de dados em tempo real por meio de sensores e placas DAQ, exibindo graficamente na tela de um computador, possibilitando supervisionar o acionamento. Dessa forma, a plataforma apresentou ótimo desempenho, mostrando-se robusta e precisa para acionar o motor em diferentes condições de operação, diferentes velocidades e diferentes valores de conjugado impostos. A lógica de acionamento e o sistema de aquisição de dados foram analisadas em dois ensaios, em que as medições de tensão, corrente, potência de entrada e velocidade foram realizadas com o auxílio de instrumentos convencionais.

Nos ensaios experimentais com variação de tensão de entrada, variação do ângulo de condução de fase e variação do nível de *setpoint* de histerese, além de mostrar a capacidade da

plataforma em executar ensaios de maneira automatizada, percebeu-se o impacto desses parâmetros na potência de saída do MRV, resultando na variação da velocidade e conjugado. Conclui-se então, que é possível controlar a velocidade em malha fechada, a partir da alteração da tensão de entrada, alteração do θ_{off} e de acordo com o *setpoint* de histerese do regulador de corrente. Quanto ao ensaio em que foram simuladas experimentalmente faltas de fase, verificou-se que o MRV se mostrou resistente a faltas e conseguiu operar com duas das quatro fases perdidas, com redução de velocidade e conjugado menores que 20%.

Adicionalmente, foi possível comprovar a capacidade da plataforma em receber novos processos de maneira simples. O controle de velocidade foi adicionado com a implementação de um controlador PI no computador, calculando o erro de medição e enviando ao código de acionamento no FPGA o novo valor do *setpoint* de histerese. Para fins de verificação da possibilidade de aplicação do controle da velocidade pela plataforma, o controle apresentou bom desempenho, conseguindo seguir as referências de velocidade com baixos erros médios. Fazendo uso da flexibilidade da plataforma foi agregado um estimador de conjugado, possibilitando analisar e monitorar os valores estimados de indutância, de conjugado eletromagnético e de fluxo magnético do MRV 8/6.

Por fim, foi possível concluir que a plataforma de instrumentação virtual para acionamento, controle e monitoramento de um MRV 8/6 mostrou de forma geral alta flexibilidade na adição de novas ferramentas e desempenho satisfatório, tanto no controle quanto na aquisição de sinais, permitindo salvar todos os dados durante o acionamento.

5.2 Trabalhos Futuros

Com base nos resultados encontrados no desenvolvimento da plataforma de instrumentação virtual, apresentam-se como sugestões para trabalhos futuros:

- expandir o sistema de aquisição da plataforma de instrumentação virtual com adição de transdutores de temperatura, de vibração e de ruídos, possibilitando estudos sobre a minimização de vibração no MRV;
- empregar a plataforma de instrumentação virtual para estudos sobre metodologia de acionamento *sensorless*;
- usar a plataforma de instrumentação virtual para estudos de minimização da oscilação de conjugado no MRV 8/6, empregando o estimador de conjugado;

- aplicar a plataforma de instrumentação virtual para estudos de otimização dos ângulos de disparo com auxílio de técnicas de aprendizado de máquina;
- utilizar a plataforma de instrumentação virtual para levantamento das características eletromagnéticas da MaRV acoplada;
- normatizar ensaios para a Máquina a Relutância Variável a partir de normas existentes de outras máquinas elétricas.

REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, R.; ASHOK, S. Data-Driven Optimization of Torque Distribution Function for Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Motor. In: INTERNATIONAL CONFERENCE FOR EMERGING TECHNOLOGY (INCET), 2020, Belgaum, India. **Anais [...]**. Belgaum, India: IEEE, 2020. p. 675-680.
- AHN, J. W.; LUKMAN, G. F. Switched reluctance motor: Research trends and overview. **CES Transactions on Electrical Machines and Systems**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 339-347, 17 jan. 2019. <https://doi.org/10.30941/CESTEMS.2018.00043>.
- ALMEIDA, L. A. **Estudo de técnicas de controle de máquinas de relutância chaveada para aplicações em sistemas de acionamentos com velocidade variável**. 2018. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018.
- ARAUJO, W. R. H. *et al.* Efficiency enhancement of switched reluctance generator employing optimized control associated with tracking technique. **Energies**, [S. l.], v. 14, n. 24, p. 1-26. 13 dez. 2021. <https://doi.org/10.3390/en14248388>.
- BARROS, T. A. S. **Propostas de controles de potência e otimização do desempenho do gerador de relutância variável aplicado em geração eólica conectado à rede elétrica baixa tensão**. 2015. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.
- BARROS, T. A. S. *et al.* Automatic Characterization System of Switched Reluctance Machines and Nonlinear Modeling by Interpolation Using Smoothing Splines. **IEEE Access**, [s.l.], v. 6, p. 26011-26021, 11 abr. 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2825607>.
- BARTOLO, J. B. *et al.* Design and initial testing of a high speed 45 kW switched reluctance drive for aerospace application. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, [s.l.], v. 64, n. 2, p. 988-997, 19 out. 2017. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2618342>.
- BERNARDELI, V. R. **Controle de conjugado em motores a relutância variável multifásicos**. 2008. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- BILGIN, B.; JIANG, J. W.; EMADI, A. **Switched reluctance motor drives: fundamentals to applications**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2018.
- CABEZUELO, D. *et al.* SRM converter topologies for EV application: state of the technology. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS (IEEE), 26., 2017, [s.l.] **Anais [...]** 2017, [s.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 3 ago. 2017. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001359>.
- CAO, Y.; CHEN, H. Research on function and design of virtual instrument based on labVIEW technology. **Journal of Chemical and Pharmaceutical Research**, [s.l.], v. 6, n. 6, p. 1099-1104, jan. 2014.

CHEN, H. Implementation of a three-phase switched reluctance generator system for a wind power application. *In: SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC LAUNCH TECHNOLOGY*, 14., 2008, Victoria, BC, Canadá, **Anais [...]**. Victoria, BC, Canadá: IEEE, 2008. <https://doi.org/10.1109/ELT.2008.104>.

CHUMACERO-POLANCO, E. A. **Velocity sensorless control of switched reluctance motors**. 2014. 100 f. Thèse (Thèse de Doctorat) – Université Paris-Sud, Paris, 2014.

DANKADAI, N. K. *et al.* Direct instantaneous torque control of switched reluctance motor for aerospace applications. *In: INTERNATIONAL UNIVERSITIES ENGINEERING CONFERENCE (UPEC)*, 53., 2018, Glasgow, Reino Unido. **Anais [...]**. Glasgow, Reino Unido: IEEE, 2018. p. 1-6. <http://doi.org/10.1109/UPEC.2018.8541884>.

DIAS, R. J. **Motores a relutância Variável 6x4 e 6x6: estudo comparativo de operação e desempenho**. 2011. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal Uberlândia, Uberlândia, 2011.

ELMUTALAB, M. A. **Extending the speed range of a switched reluctance motor using a fast demagnetizing technique**. 2016. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – The Graduate Faculty of the University of Akron, Akron, Ohio, EUA, 2016.

EMERY, N. **Acoustic noise reduction in na 8/6 switched reluctance machine using structural design**. 2021. 132 f. Thesis (Master of Applied Science) – McMaster University, Hamilton, 2021.

FANG, G. *et al.* 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**, [s.l.] v. 2, p. 280-301, 30 abr. 2021. <https://doi.org/10.1109/OJIES.2021.3076807>

FARIA, V. H. C. *et al.* Virtual instrumentation applied in the development of a transformer test bench. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 16, p. e249101623890, 12 dez. 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i16.23890>.

FIDELIS, R. T. **Modelagem matemática e sistema embarcado em DSP/FPGA para acionamento e controle de um GRV 8/6 com estimativa em tempo real das curvas de indutância e conjugado**. 2018. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

FIDELIS, R. T. *et al.* Proposal of a test bench for switched reluctance machine 8/6 for wind energy application. *In: INTERNACIONAL CONFERENCE OF RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY*, 16., 2018, Salamanca. **Anais [...]**. Salamanca: [s.n.], 2018. p. 481-486. <https://doi.org/10.24084/repqj16.359>.

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**, [S. l.], v. 11, n. 5, p. e30911528358, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i5.28358>.

FUJISHIRO, S. *et al.* Design of an outer-rotor-type multipolar switched reluctance motor for electric vehicle. **Journal of Applied Physics**, v. 99, n. 8, p. 08R324-08R324-3, 28 abr. 2006. <https://doi.org/10.1063/1.2172180>.

GUO, Teng. **Double rotor switched reluctance machine with segmented rotors**. 2014. 203 f. Thesis (Master of Applied Science) – McMaster University, Hamilton, 2014.

HAMOUDA, M.; SZÁMEL, L. Optimum control parameters of switched reluctance motor for torque production improvement over the entire speed range. **Acta Polytechnica Hungarica**, [s.l.], v. 16, n. 3, p. 79-99, 2019.

HIEU, P. T.; LEE, D. H.; AHN, J. W. Design of 2-phase 4/2 SRM for torque ripple reduction. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS (ICEMS), 15th., 2012, [s.l.]. **Anais [...]**. [s.l.: s.n.], 2012.

JEONG, K. I.; DEE, J. H.; AHN, J. W. Performance and Design of a Novel Single-Phase Hybrid Switched Reluctance Motor for Hammer Breaker Application. **20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)**, p. 11–14, ago. 2017. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2017.8056416>.

KACHAPORNKUL, S. *et al.* Performance Improvement of a Switched Reluctance Motor and Drive System Designed for an Electric Motorcycle. **Energies**, v. 15, n. 3, 1 fev. 2022. <https://doi.org/10.3390/en15030694>.

KANDHASAMY, S. Machine learning based SRM control using FPGAs for torque ripple minimization. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN INFORMATION AND COMMUNICATION (ICAIC), 2020, Fukuoka, Japão. **Anais [...]** Fukuoka, Japão: IEEE, 2020. p. 675-680. <https://doi.org/10.1109/ICAIC48513.2020.9065241>.

KANG, S. *et al.* Development of a teaching experiment platform for a signal generator based on LabVIEW. **World Transactions on Engineering and Technology Education**, Harbin, v. 12, n. 2, p. 261-265, 2014.

KIMPARA, M. L. M. **Mitigation of Torque Ripple and Vibration in Switched Reluctance Motor Drives: a Switching Optimization**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

KRISHNAN, R. **Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications**. Boca Raton: CRC Press, 2001.

KULA, S.; COSMAN, S. Switched reluctance motor model implemented on PXI FPGA target. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FUNDAMENTALS OF ELECTRICAL ENGINEERING, 2016, Bucareste. **Anais [...]**. Bucareste: [s.n.] 2016. p. 1-4.

LEBSIR, A. *et al.* Compared applications of permanent magnet and switched reluctance machine: State of the art. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ENGINEERING, ENERGY AND ELECTRICAL DRIVES, 4th., 2013, Istanbul, Turkey, **Anais [...]**. Istanbul, Turkey: [s.n.], 2013. p. 439-443.

LI, H. **Torque ripple minimization in switched reluctance machines.** 2017. 133 f. Thesis (Master of Applied Science) – McMaster University, Hamilton, 2017.

LOPES, V. J. S. **Instrumentação virtual aplicada ao ensino experimental de engenharia elétrica.** 2007. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

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

MAMEDE, A. C. F. **Projeto iterativo, simulação, análise e otimização da máquina a relutância variável monofásica.** 2016. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

MARK, C. S.-H. **18/12 Switched reluctance motor design for a mild-hybrid electric powertrain application.** 2020. 122 f. Thesis (Master of Applied Science) – McMaster University, Hamilton, 2020.

MIYAUCHI, W.; GOTO, H.; YOSHIZAWA, H. A Novel Sensorless Drive Method of SRM based on Nonlinear Flux Model using Fourier Series. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS, ICEMS, 23rd., 2020, Hamamatsu, Japan. **Anais [...]**. Hamamatsu, Japan: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. <https://doi.org/10.23919/ICEMS50442.2020.9291181>.

MORAES FILHO, M. J. **Desenvolvimento de plataforma de acionamento digital para motor a relutância variável 8/6.** 2017. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

MUELLER, M. A. Design and performance of a 20 kW, 100 rpm, switched reluctance generator for a direct drive wind energy converter. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC MACHINES AND DRIVES (IEEE), 2005, San Antonio, TX, USA. **Anais [...]**. San Antonio, TX, USA: [s.n.], 2005. p. 56-63. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2005.195701>.

NASHED, M. N. F. *et al.* Hysteresis current control of switched reluctance motor in aircraft applications. **International Journal of Power Electronics and Drive Systems**. [S. l.], v. 4, n. 3, p. 25-40, 2014. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v4i3.6210>.

OLIVEIRA, C. A. **Plataforma para ensaios de motores de indução trifásicos e simulação de cargas mecânicas: acionamento, operação e monitoramento com auxílio de fonte programável.** 2018. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

OLIVEIRA, E. S. L. **Sistemas inteligentes aplicados no controle e na obtenção de indutância de um gerador a relutância chaveado.** 2015. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

PENG, F.; YE, J.; EMADI, A. Position sensorless control of switched reluctance motor based on numerical method. ENERGY CONVERSION CONGRESS AND EXPOSITION - IEEE, 7th, 2016, [s.l.]. **Proceedings** [...] [s.l.]: IEEE, 2016.

REIS, M. R. C. **Técnicas de acionamento e controle ótimo aplicados ao motor a relutância chaveado para maximizar o rendimento.** 2020. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020.

SCALCON, F. P. **Contribuições ao acionamento e controle dos motores de relutância variável e síncrono de relutância.** 2019. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

SANTOS NETO, P. J. **Otimização de desempenho do gerador de relutância variável aplicado em sistemas eólicos: uma abordagem via planejamento de experimento computacional.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

SHIN, S. *et al.* Study on Commutation Control Method for Reducing Noise and Vibration in SRM. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s.l.], v. 54, n. 5, p. 4415–4424, 1 set. 2018.

SILVA, F. S. Banca de simulação de cargas mecânicas para motor de indução trifásico acionado pro conversor de frequência. 2015. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

SILVA, W. A. **Controle de máquina de relutância variável em situações de falta de fase.** 2017. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SILVA, W. A. *et al.* Adaptive feedforward control applied in SRM drive speed control in fault situations. **Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control**. [s. l.], v. 140, n. 5, p. 051002, sept. 2017. <https://doi.org/10.1115/1.4037836>.

SILVEIRA, A. F. V. **Modelagem, construção, testes e análise de desempenho de um gerador a relutância chaveado.** 2008. 255 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

SILVEIRA, A. W. F. V. **Controle de tensão na carga para motor/gerador a relutância variável de três fases.** 2011. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

SILVEIRA, A. W. F. V. *et al.* Estratégia de controle para o GRV baseada na variação do ângulo de magnetização. CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS (INDUSCON), 9., 2010, São Paulo. **Anais** [...] São Paulo, 2010.

SONG, S.; MA, S.; ZHANG, Z. Static electromagnetic characteristics measurement system for switched reluctance machine. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS, ICEMS, 2013, [s.l.]. **Anais** [...]. [s.l.]: IEEE Computer Society, 2013.

SUN, J. *et al.* Design of transient characteristic measuring system for switched reluctance drive based on LabVIEW. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MEASUREMENT, INFORMATION AND CONTROL*. 2012, Harbin, China, **Proceedings** [...]. 2012. Harbin, China: IEEE, 2012. p. 278-281. <https://doi.org/10.1109/MIC.2012.6273330>.

NAGY, H. *et al.* Rapid control prototyping of a speed control strategy for a switched reluctance machine. *INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXPOSITION ON ELECTRICAL AND POWER ENGINEERING*, 2016, Romania. **Anais** [...]. Romania: Iasi, 2016. p. 664-668. <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781422>.

ULLAH, S. *et al.* A permanent magnet assist, segmented rotor, switched, reluctance drive for fault tolerant aerospace applications. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s.l.], v. 55, n.1, p. 298-305, jan./fev. 2019. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2864718>.

UYSAL, A. *et al.* Fuzzy proportional-integral speed control of switched reluctance motor with MATLAB/Simulink and programmable logic controller communication. **Measurement and Control (United Kingdom)**, [s.l.], v. 52, n. 7-8, p. 1137-1144, set. 2019. <https://doi.org/10.1177/0020294019858188>.

VIAJANTE, G. P. *et al.* Design and implementation of a fuzzy control system applied to a 6x4 SRG. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s. l.], v. 57, n. 1, p. 528-536, 2021.

VIAJANTE, G. P. **Gerador a relutância variável em conexão com a rede e elétrica para injeção de potência ativa**. 2013. 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

VIJAYAKUMAR, K. *et al.* Switched reluctance motor modeling, design, simulation, and analysis: A comprehensive review. **IEEE Transactions on Magnetics**, [s. l.], v. 44, n. 12, p. 4605-4617, 2008.

WANG, H. *et al.* Position sensorless control of switched reluctance motors eliminating mutual inductance effect. *INTERNATIONAL MAGNETIC CONFERENCE, INTERMAG*, 2018, Singapore. **Anais** [...]. Singapore: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. - IEEE. 2018.

WICHERT, T. **Design and construction modifications of switched reluctance machines**. 2008. 161 f. Tese (Pós-Doutorado em Engenharia Elétrica) – Warsaw University of Technology, Warsaw, 2008.

XIAO, D. *et al.* Position-Sensorless Control of Switched Reluctance Motor Drives: A Review. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, [s.l.], v. 8, n. 1, p. 1209–1227, 1 mar. 2022. <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3110867>.

XU, Z.; LEE, D. H.; AHN, J. W. Stepped rotor type 12/14 bearingless SRM for self-starting and torque ripple reduction. *INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL INFORMATICS, INDIN*, 2015, [s.l.]. **Proceeding** [...]. [s.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2015. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2015.7281770>.

YASA, Y.; SOZER, Y.; GARIP, M. Loss of high speed switched reluctance machine with integrated simulation methods. **International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics**, [s. l.], v. 56, n. 3, p. 479-497, 2018. <https://doi.org/10.3233/JAE-170113>.

YE, J.; MALYSZ, P.; EMADI, A. A fixed-switching-frequency integral sliding mode current controller for switched reluctance motor drives. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 381-394, jun. 2015. <http://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2357717>.

ZAHARIA, M. V. **Contributions to the study of switched reluctance machine for automotive integrated starter-alternator application**. 2016. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Ecole Centrale de Lille, Villeneuve-d'Ascq, França, 2016.

ZHANG, M. *et al.* A new vibration reduction control strategy of switched reluctance machine. *In: IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC, 2017, Miami, United States*. **Anais [...]**. Miami, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017.