

Desenvolvimento de uma Plataforma de Instrumentação Virtual para um MRV 8/6

Development of a Virtual Instrumentation Platform for an 8/6 SRM

Desarrollo de una plataforma de instrumentación virtual para un MRV 8/6

Recebido: 24/01/2022 | Revisado: 02/02/2022 | Aceito: 10/02/2022 | Publicado: 15/02/2022

Victor Henrique da Cunha Faria

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0063-6319>
Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
E-mail: victorhcf@ufu.br

Luciano Coutinho Gomes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2827-6944>
Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
E-mail: lcgomes@ufu.br

Ricardo Tirone Fidelis

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0693-3659>
Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
E-mail: ricardotirone@gmail.com

Marcos José de Moraes Filho

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5545-3566>
Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial - MG, Brasil
E-mail: marcos.jmf@hotmail.com

Ana Caroline Marques Costa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6295-4406>
Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
E-mail: mcosta.anacarol@gmail.com

Gustavo de Oliveira Machado

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3563-2350>
Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
E-mail: gustavo.olvmachado@gmail.com

Resumo

O motor a relutância variável (MRV) vem ganhando espaço nas últimas décadas devido ao avanço da eletrônica de potência e do controle. Com isso, novas pesquisas vêm surgindo em busca de metodologias que possam aumentar sua eficiência. O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma plataforma de instrumentação virtual que possibilitasse 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. Foi utilizado um sistema de acionamento robusto, com capacidade de aplicar o controle implementado através do DSP/FPGA do myRIO-1900. 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 ensaios, acionando o MRV 8/6 e coletando as formas de onda dispostas no supervísório, as quais foram comparadas com os sinais coletados por instrumentos de medição convencionais. Os ensaios demonstraram que a plataforma desenvolvida apresentou resultados confiáveis, com baixo erro de medição, e executaram a lógica de acionamento correta.

Palavras-chave: Instrumentação; Virtual; Motor; MRV; LabVIEW.

Abstract

The switched reluctance motor (SRM) has been gaining space during the last decades due to the advance of power and control of electronics. Thereby, new researches are emerging in search of methodologies that can increase its efficiency. The objective of this work was the development of a virtual instrumentation starter of an 8/6 SRM, as well as allowing the monitoring of fundamental quantities for studying during the experiments, grouping all the functionalities in a single interface. A robust drive system was used, with the ability to apply the control implemented through the DSP/FPGA from myRIO-1900's. The applied data acquisition system, was composed of position and time sensors conjugate, improving current control and measurement information in real time measurement of quantities. To demonstrate the capacity of the created platform, tests were carried out, activating the 8/6 SRM and collecting the waveforms arranged in the supervisory, which were compared with the signals collected by conventional measuring instruments. The tests showed that the developed platform presented reliable results, with low measurement error, and performed the correct triggering logic.

Keywords: Virtual; Instrumentation; Motor; SRM; LabVIEW.

Resumen

El motor de reluctancia variable (MRV) ha ido ganando espacio en las últimas décadas debido a los avances en electrónica de potencia y control. Con ello, han surgido nuevas investigaciones en busca de metodologías que puedan aumentar su eficacia. El objetivo de este trabajo fue desarrollar una plataforma de instrumentación virtual que pudiera accionar un MRV 8/6, así como, permitir la monitorización de las magnitudes fundamentales para su estudio durante los experimentos, agrupando todas las funcionalidades en una única interfaz. Se utilizó un sistema de accionamiento robusto, con capacidad para aplicar el control implementado a través del DSP/FPGA myRIO-1900. El sistema de adquisición de datos aplicado estaba compuesto por sensores de corriente, tensión, posición y conjugados, que proporcionaban información para el control del accionamiento y para la inspección en tiempo real de las magnitudes. Para demostrar la capacidad de la plataforma creada, se realizaron pruebas, accionando el MRV 8/6 y recogiendo las formas de onda disponibles en el supervisor, que se compararon con las señales recogidas por los instrumentos de medición convencionales. Las pruebas demostraron que la plataforma desarrollada presentaba resultados fiables, con un bajo error de medición, y ejecutaba la lógica de accionamiento correcta.

Palabras clave: Instrumentación; Virtual; Motor; MRV; LabVIEW.

1. Introdução

A popularidade do motor a relutância variável (MRV) cresceu significativamente nas últimas décadas devido ao desenvolvimento tecnológico, tornando-se uma atraente alternativa aos motores tradicionais em uma gama de aplicações. Durante muitos anos seu uso foi desconsiderado em virtude da complexidade do seu acionamento e controle, porém com a redução do custo dos componentes eletrônicos aliado ao avanço de técnicas de controle, as características positivas do MRV começaram a sobressair aos pontos negativos (Kula et al., 2016).

Características como a estrutura simples, robusta, com baixo custo de produção e elevado conjugado de partida do MRV destacam-se como suas principais vantagens. Além disso, as perdas de potência são menores, concentrando-se no estator da máquina, já que o rotor é construído com chapas de material ferromagnético, não havendo enrolamentos. Entretanto, o ruído sonoro gerado e a oscilação do torque são algumas das desvantagens apresentadas, instigando grande foco de estudos e pesquisas nessa área (Moraes Filho, 2017).

Assim, de acordo às características indicadas, a pesquisa científica de novas metodologias que aprimorem o desempenho do acionamento e controle de MRVs tem se intensificado expressivamente nos últimos anos (Moraes Filho, 2017). Nesse cenário, é primordial que no estudo do comportamento de uma máquina elétrica, mediante a aplicação de novas metodologias, seja possível analisar as grandezas principais envolvidas, como corrente, tensão, velocidade, torque, entre outras variáveis. Muitos trabalhos têm implementado bancadas e plataformas de acionamento de máquinas elétricas, as quais visam reduzir os esforços no estudo de motores.

Oliveira (2018) realizou a implementação e estruturação de uma plataforma para ensaios com motores de indução trifásicos, fez a aquisição e o monitoramento de dados de tensão, corrente, potência, velocidade e conjugado usando instrumentos de medições convencionais (osciloscópio, torquímetro e tacômetro). A plataforma permitiu que fossem ensaiados motores de indução trifásicos de até 5 cv.

No trabalho de Moraes Filho (2017) foi produzida uma plataforma que possibilitou o estudo da máquina a relutância variável acionada como motor. 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. A aquisição de dados para o controle ocorreu por meio de sensores de corrente, enquanto que, para análise das formas de onda, foram utilizados instrumentos de medição tradicionais.

Fidelis et al. (2018) propuseram uma bancada de testes para estudos em geradores a relutância variável em aplicações de energia eólica. Foram verificadas técnicas de controle da tensão gerada para pequenas turbinas eólicas, além de testes na máquina a relutância em diferentes condições de operação, variando a velocidade, as variáveis de excitação, as variáveis de

magnetização e os ângulos de acionamento. A plataforma foi implementada com base no DSP/FPGA myRIO 1900 e LabVIEW, possibilitando 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.

A instrumentação virtual é grande aliada na construção de plataformas de acionamento de máquinas elétricas, 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). Com isso, é possível reduzir o custo do projeto, já que instrumentos convencionais tem uso específico e alto custo de aquisição (Lopes, 2007).

Desse modo, o presente artigo tem como objetivo o desenvolvimento de uma plataforma de instrumentação virtual com o foco no acionamento de um motor a relutância variável 8/6 e também o monitoramento em tempo real das principais grandezas envolvidas. A plataforma deverá permitir ao usuário 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 e validação de novas técnicas e metodologias.

2. Materiais e Métodos

2.1 Delineamento experimental

Este trabalho teve como finalidade o desenvolvimento e teste de uma plataforma que tornasse possível o acionamento de um MRV 8/6, de modo que fosse capaz de mostrar as formas de onda de tensão e corrente por fase, tensão e corrente do barramento de corrente contínua (barramento CC), velocidade e torque. A implementação ocorreu por meio de um instrumento virtual com a linguagem de programação LabVIEW, o qual agrupou diversas funcionalidades em uma única interface gráfica. Para tal, os métodos de pesquisa adotados neste trabalho, fundamentado em Koche (2011), é de caráter experimental e de natureza quantitativa.

A compreensão do princípio de operação do motor a relutância variável, tanto quanto os procedimentos necessários para o acionamento do motor, foram primordiais para a estruturação da plataforma. Tais conhecimentos também permitiram sistematizar os processos a serem realizados pelo instrumento virtual, além de compreender quais grandezas do motor poderiam ser manipuladas durante o acionamento e quais variáveis seriam relevantes para exibição em tempo real.

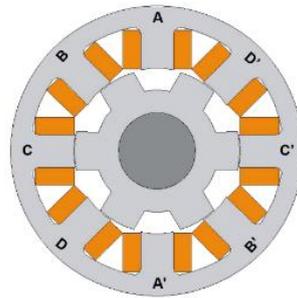
2.2 Princípio de funcionamento do MRV

O motor a relutância variável está entre as mais simples máquinas elétricas em termos construtivos, sendo caracterizado por apresentar dupla saliência (Loría et al., 2013; Dias, 2012). Somente no estator há a presença de enrolamentos, os quais são constituídos por pares de bobinas que estão localizadas em polos opostos. Pode-se ligar as bobinas em série ou mesmo em paralelo, de acordo com as características elétricas do motor e do sistema de acionamento (Moraes Filho, 2017).

Motores a relutância variável se diferenciam de acordo com as configurações dos polos salientes. As configurações mais comuns são os motores tetrafásicos, 8/6 (8 polos no estator e 6 polos no rotor) e os motores de trifásicos, 6/4 (6 polos no estator e 4 polos no rotor) (Loría et al., 2013). É importante alertar que quanto maior a quantidade de polos existentes em um determinado motor, menores serão as oscilações de conjugado, porém, maior será a complexidade do conversor para seu acionamento (Moraes Filho, 2017).

A Figura 1 exhibe a seção transversal do motor a relutância variável 8/6 que integra a plataforma de instrumentação virtual implementada no trabalho. Nela, nota-se que há oito polos salientes no estator e seis polos salientes no rotor. Ainda, pode-se observar que os pares de bobinas estão alinhados e são opostos.

Figura 1: Seção transversal de um motor a relutância variável 8/6.

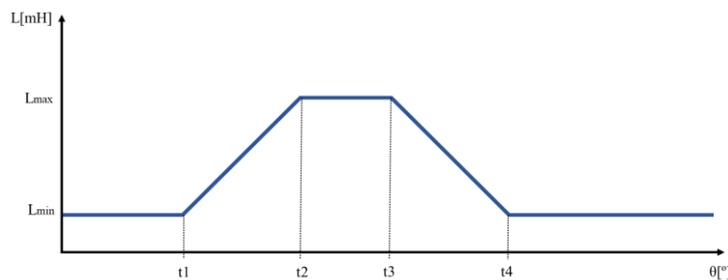


Fonte: Autores.

A dupla saliência é um aspecto construtivo primordial 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). 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 (Moraes Filho, 2017; Wichert, 2008; 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). A Figura 2 evidencia melhor tal propriedade, mostrando a forma de onda ideal da indutância de uma fase excitada do MRV mediante a mudança da posição do eixo da máquina.

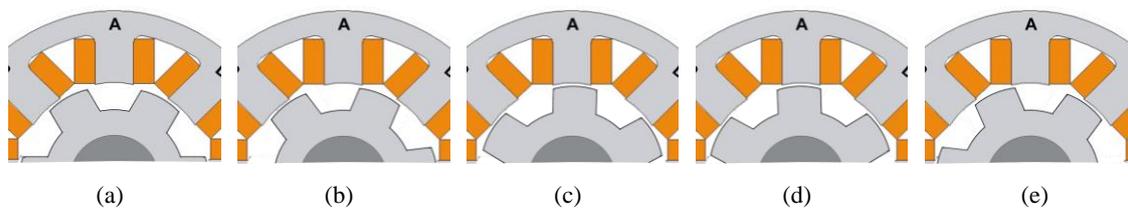
Figura 2: Perfil da indutância do MRV de uma fase.



Fonte: Autores.

A Figura 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 (t_1 , t_2 , t_3 , t_4).

Figura 3: Posições instantâneas do rotor do motor a relutância variável: (a) 0- t_1 (b) t_1 (c) t_2 (d) t_3 (e) t_4 .



Fonte: Autores.

1. 0-t1: Nesse instante os polos do estator e do rotor estão completamente desalinhados, como mostra a Figura 3-a. O fluxo magnético majoritariamente está sendo conduzido pelo trajeto do ar. A indutância apresenta o valor mínimo e quase constante, não produzindo torque.
2. t1-t2: Nessa região ocorre a gradativa sobreposição dos polos, começando a se sobrepor no instante t1 (Figura 3-b) e estando totalmente sobrepostos em t2 (Figura 3-c). 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. t2-t3: 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. t3-t4: O polo do rotor se afasta, diminuindo gradualmente a sobreposição ao polo do estator, semelhante ao que ocorre na região t1-t2, 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. 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.

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).

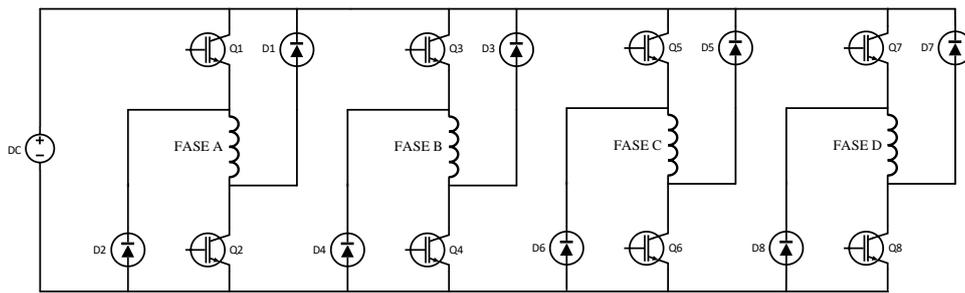
2.3 Sistema de acionamento do MRV

Embora o MRV apresente simplicidade em sua construção, é necessário um controle relativamente complexo de acionamento, pois 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. 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 (Reis, 2020).

Portanto, o MRV não pode meramente ser conectado a fontes AC ou DC. Para ser 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 DC e os enrolamentos do motor (Vijayakumar et al., 2008; Fidelis et al., 2016).

A topologia do conversor e seu controle são de grande importância para a eficiência total da máquina (Elmutalab et al., 2016). Existe uma ampla gama de topologias de conversores aplicadas no acionamento de máquinas a relutância variável, porém, dentre as opções disponíveis, os conversores em meia ponte assimétrica são os tradicionalmente usados (Oliveira, 2011). A Figura 4 retrata o esquema elétrico de um conversor em meia ponte assimétrica de quatro fases.

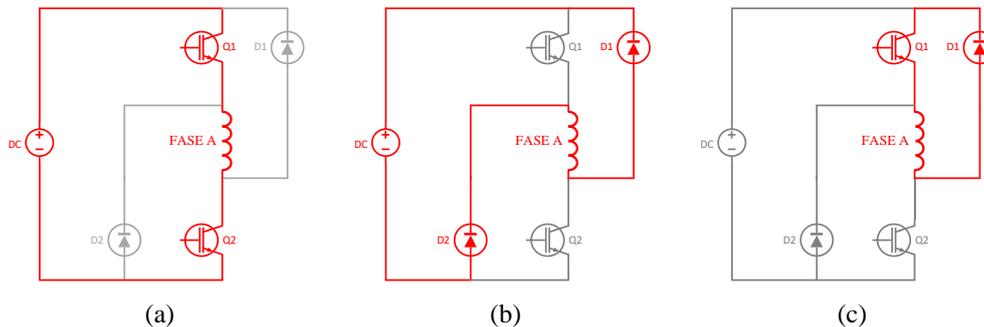
Figura 4: Esquema elétrico de um conversor em meia ponte assimétrica.



Fonte: Autores.

O conversor em meia ponte assimétrica contém quatro componentes semicondutores em cada braço, dos quais dois são diodos e dois são chaves elétricas 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 controlar o chaveamento de corrente para cada fase. Com isso, este tipo de conversor tem três modos de operação: magnetização, desmagnetização e roda livre (Moraes Filho, 2017; Vijayraghavan, 2001). Os três modos de funcionamento do conversor estão ilustrados na Figura 5, destacando em vermelho os componentes que estão ativos e os locais em que há passagem de corrente.

Figura 5: Modos de operação do conversor em meia ponte assimétrica: (a) magnetização, (b) desmagnetização, (c) roda livre.



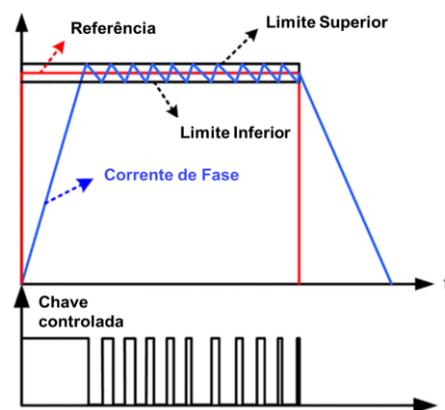
Fonte: Autores.

- Magnetização: neste modo de operação, ilustrado pela Figura 5-a, os diodos estão inversamente polarizados, pois as chaves controladas são acionadas e o enrolamento do motor fica sujeito a tensão do barramento CC. Isso causa o aumento da corrente neste enrolamento e fornece energia ao motor (Elmutalab et al., 2016).
- Desmagnetização: neste modo, Figura 5-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 a tensão inversa do barramento de corrente contínua, fato que contribui com 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 (Moraes Filho, 2017).
- Roda livre: ocorre quando somente uma das chaves controladas é fechada, como exemplifica a Figura 5-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 carga e a corrente irá apresentar um decaimento exponencial (Oliveira, 2011).

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. A função do sensor de posição do rotor é indicar a posição do eixo em tempo real ao controlador. 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 almeçadas de velocidade e torque (Carvalho et al., 2017).

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 et al., 2018). A Figura 6 mostra o comportamento da corrente diante o controle por histerese.

Figura 6: Controle de corrente por histerese em um MRV.



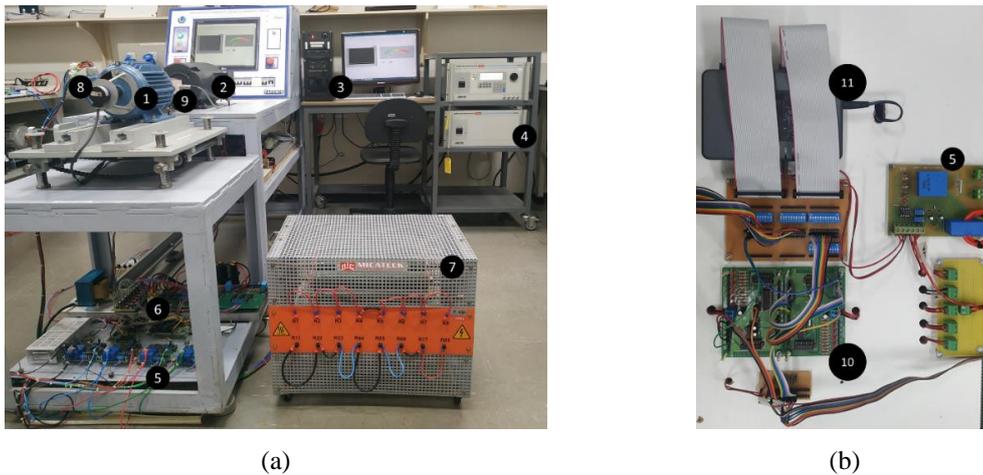
Fonte: Adaptado de Yasa et al. (2018).

Como mostra a Figura 6, a estratégia de controle 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, no momento em que ambas as chaves estão fechadas a corrente na fase aumenta (o conversor opera no modo de magnetização) até o limite superior. Quando isso ocorre, o controle abre uma das chaves, operando em roda livre, e com isso, a corrente tende a diminuir até o limite inferior (Nashed, 2014; Yasa et al., 2018).

2.4 Plataforma de Instrumentação Virtual

A plataforma de instrumentação virtual desenvolvida neste trabalho é composta por vários elementos que interagem entre si, em vista de acionar e monitorar um motor a relutância variável 8/6. A Figura 7 mostra uma visão geral da plataforma e os elementos que a compõem.

Figura 7: Plataforma de Instrumentação Virtual implementada no trabalho.



Fonte: Autores.

Dentre os elementos presentes na plataforma e apresentados na Figura 7, destacam-se:

1. Motor a relutância variável 8/6.
2. Motor 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 gate drives.
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 compõem a plataforma são detalhados nas subseções abaixo, descrevendo suas características operacionais e a sua importância no sistema.

2.4.1 Máquina a relutância variável

A máquina a relutância variável que compõem a plataforma foi projetada, simulada e confeccionada no laboratório que ampara este trabalho. Os parâmetros de projeto dispostos do MRV em Bianchi & 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.

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

2.4.2 Simulador de Carga Mecânica

O simulador de carga foi desenvolvido por (Silva, 2015) e tem a capacidade de impor cargas mecânicas no rotor das máquinas elétricas sob análise. Esse é um elemento importante agregado a 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, um conversor CA/CC e um banco de resistência.

A máquina de corrente contínua é acionada 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 e o banco de resistência. Além disso, a velocidade no eixo é determinada pela máquina sob teste, nesta situação um MRV 8/6.

2.4.3 Fonte programável CSW5550

A fonte programável CSW5550 tem a responsabilidade de fornecer tensão CA trifásica para alimentação do MRV, a qual é retificada e conectada ao conversor em meia ponte assimétrica. Ela 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.

Segundo Pinheiro et al. (2021), a programação 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.

2.4.4 Sensores de tensão e corrente

As medições dos sinais de tensão e corrente (por fase e do barramento) 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 8: Placa condicionadores de sinais para medição de tensão e corrente.



Fonte: Autores.

A placa condicionadora de sinais está sendo mostrada na Figura 8, ela consegue medir tensão e corrente com módulo de 500 V e 25 A, respectivamente, seja contínua ou alternada. Os sinais de entrada são condicionados para um sinal de saída de

0 a 3,3V, ideais para serem lidos pelo NI MyRIO-1900. Os detalhes de desenvolvimento da placa podem ser encontrados em Moraes Filho (2017), no qual são especificados os circuitos que a compõem.

2.4.5 Encoder absoluto

O Encoder tem função de detectar a posição dos polos do rotor em relação aos polos do estator. Para integrar a plataforma de instrumentação virtual foi utilizado um Encoder do tipo absoluto. Com a medição 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 9.

Figura 9: Encoder Absoluto TRD-NA1024NW.



Fonte: Moraes Filho (2017).

De acordo com Moraes Filho (2017), as principais características do Encoder Absoluto mostrado na Figura 9 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 instantaneamente de 5000 rpm.

2.4.6 Transdutor de torque

A medição de torque 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 10, 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 $+5$ V, proporcional ao conjugado (Oliveira, 2018).

Figura 10: Transdutor de conjugado T22/100NM da HBM.



Fonte: Oliveira (2018).

2.4.7 NI myRIO-1900

O controlador responsável pela lógica de acionamento e controle do MRV é o NI myRIO-1900, sendo esse, um dispositivo embarcado produzido e comercializado pela National Instruments (NI). A Figura 11 exibe o myRIO-1900, o qual apresenta três conectores que contêm entradas analógicas (AI), saídas analógicas (AO), entradas e saídas digitais (DIO), entradas e saídas de áudio.

Figura 11: NI myRIO-1900.



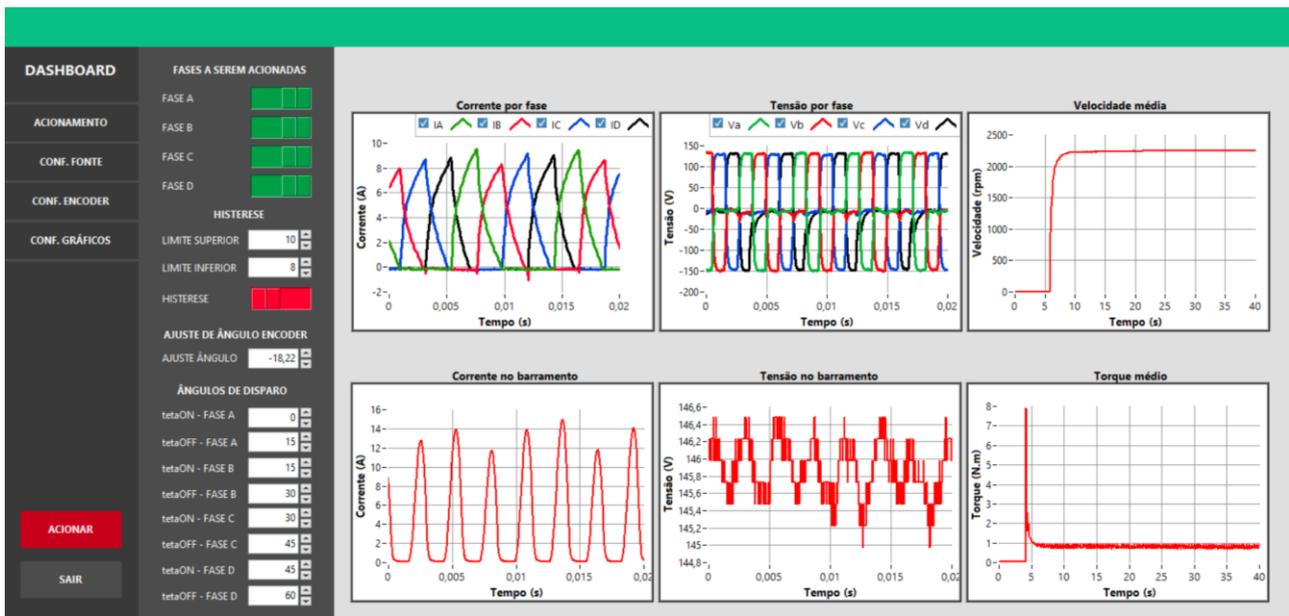
Fonte: Fidelis (2018).

Segundo Fidelis (2018), o NI MyRIO-1900 é equipado com um processador em tempo real ARM Cortex A9 dual core 667MHz/512MB, um módulo FPGA integrado Xilinx Zynq 7 Series com um Clock onboard de 40 a 76MHz, 10 Entradas analógicas operando a 500KS/s, 06 saídas analógicas operando a 345KS/s e 40 Linhas de entrada e saída digital operando a 50MS/s. Ainda, o NI myRIO-1900 tem barramentos de conexão com o computador via USB e wireless 802.11bgn.

2.4.8 Software de Controle e Monitoramento

A proposta do trabalho implicou no desenvolvimento de um instrumento virtual que agrupasse todas as funcionalidades (acionamento, controle e monitoração) em um único ambiente. Sendo este, amigável ao usuário, intuitivo e de simples manuseio. Para tal, foi criado um software em LabVIEW para DESKTOP que comunicasse com o NI MyRIO-1900, permitindo manipular os parâmetros de acionamento e visualizar as grandezas importantes. A Figura 12 apresenta a interface de usuário implementada.

Figura 12: Interface Gráfica de acionamento e monitoramento.



Fonte: Autores.

A interface é composta pelo menu lateral esquerdo e por uma janela que abriga os gráficos com as formas de onda coletadas pelo sistema de aquisição de dados. As principais funcionalidades que a plataforma de instrumentação virtual consegue implementar através da interface estão relacionadas em forma de tópico no Quadro 1.

Quadro 1: Funcionalidades da plataforma através da Interface Gráfica.

	FUNCIONALIDADE
ACIONAMENTO	<ul style="list-style-type: none"> • Acionar/ Desacionar o MRV. • Seleção na interface de quais fases serão acionadas. • Ativar/Desativar o controle de corrente por Histerese e 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.
MONITORAMENTO	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização da forma de onda das tensões e correntes de fase. • Visualização dos disparos do conversor. • Visualização da forma de onda da tensão e corrente do barramento. • Visualização da velocidade de rotação da máquina. • Visualização do conjugado na carga mecânica. • Calcular e visualizar a potência de entrada e a potência de saída. • Salvar formas de onda em arquivos .csv ou em imagem.

Fonte: Autores.

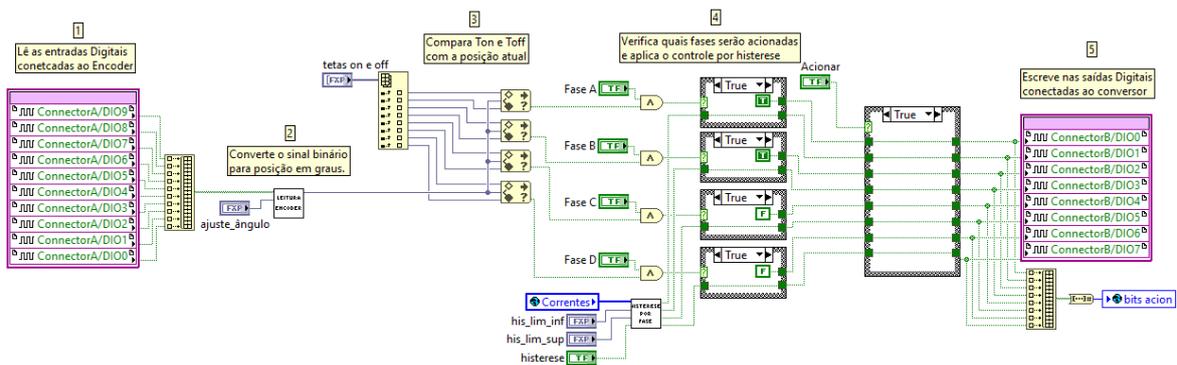
O Quadro 1 mostra as diferentes possibilidades de controle em tempo real das grandezas relevantes ao acionamento e também, a capacidade de supervisionar e salvar as formas de ondas desejadas. Para que isso fosse possível, todo o código foi programado em LabVIEW, tanto a instância processada no FPGA, quanto a instância processada no computador.

Como destacado na seção anterior, o NI myRIO-1900 é um dispositivo embarcado, portanto, a programação é convertida e salva em sua memória interna. Nele, em seu núcleo FPGA, é implementado o código responsável por acionar o motor e adquirir os sinais de corrente, tensão, posição e torque. Se a conexão via barramento USB ao computador estiver disponível, os sinais adquiridos são enviados ao computador e serão recebidas as condições personalizadas de acionamento.

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. Ainda, nesse âmbito, é feito o processamento das informações não impactantes no acionamento, como por exemplo, cálculo das potências de entrada/saída e cálculo da eficiência energética do motor.

A Figura 13 mostra o código em LabVIEW que realiza o acionamento aplicando o controle de histerese, ressaltando que, o mesmo é empregado em malha aberta, sem realimentação da velocidade.

Figura 13: Código em LabVIEW executado no FPGA para acionamento do MRV.



Fonte: Autores.

O código exibido na Figura 13 está em um laço de repetição que é executado a 50 kHz, o qual é implementado no FPGA do NI myRIO-1900. Podem-se apontar os seguintes processos executados que fazem o acionamento do motor: a) leitura das portas digitais em que os 10 bits do Encoder estão conectados; b) conversão do sinal digital recebido em código gray para posição em rpm; c) comparação da posição medida com os intervalos angulares de excitação de cada fase; d) recebimento da corrente medida e comparação com os limites do controle de histerese; e) definição da abertura das chaves do conversor baseado na posição do rotor e na histerese; f) envio do sinal para as chaves do conversor através das saídas digitais.

3. Resultados e Discussão

Em busca de demonstrar a capacidade da plataforma de instrumentação virtual e validar o sistema de aquisição de dados foram executados dois ensaios. Durante os ensaios foram utilizados instrumentos convencionais para comparação dos dados aquisitados, sendo estes, um osciloscópio para medição de tensão e corrente, e um tacômetro para medição da velocidade.

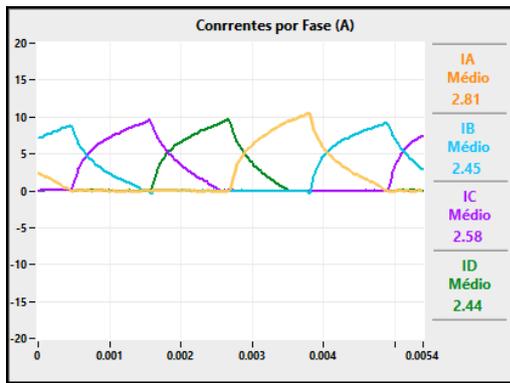
Portanto, foram executados dois ensaios, os quais foram constituídos pelo acionamento do motor a relutância variável 8/6 em duas diferentes condições. Nos dois ensaios todas as 4 fases foram utilizadas e os ângulos de condução mantiveram-se

em 15°, de forma que não houvesse sobreposição de fases. Com isso, os dados coletados (tensão, corrente, velocidade e torque) em cada um dos ensaios estão serão descritos e discutidos abaixo.

3.1 Ensaio 1

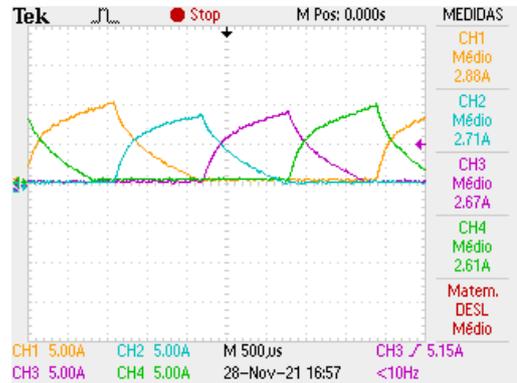
O primeiro ensaio consistiu no acionamento do MRV sem o controle de corrente por histerese. Neste, foi imposto no barramento CC cerca de 150 V, resultando nas correntes de fase em regime permanente exibidas na Figura 14 (plataforma de instrumentação virtual) e na Figura 15 (osciloscópio).

Figura 14: Correntes nas 4 fases do MRV 8/6 medidas pela plataforma de instrumentação virtual do Ensaio 1.



Fonte: Autores.

Figura 15: Correntes nas 4 fases do MRV 8/6 medidas pelo osciloscópio do Ensaio 1.



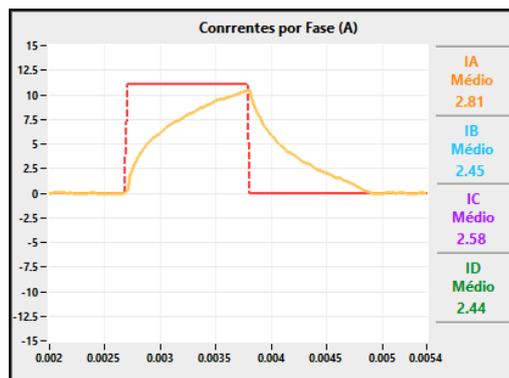
Fonte: Autores.

A Figura 14 mostra as correntes elétricas das quatro fases do motor coletadas pela plataforma, enquanto que a Figura 15 mostra as correntes coletadas pelo osciloscópio. 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 14, 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 é 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 16 pode-se ver a relação entre a corrente na Fase A e o pulso de acionamento das chaves controladas.

Figura 16: Corrente da fase A (laranja) e pulsos das chaves controladas da fase A (vermelho).

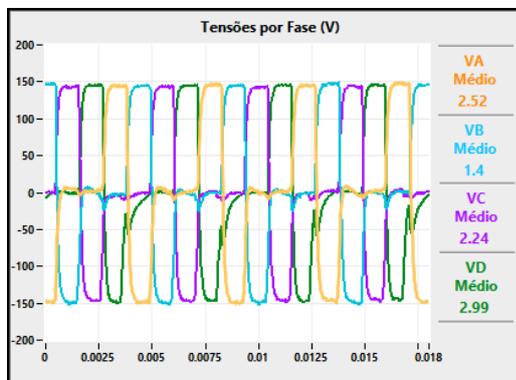


Fonte: Autores.

Não havendo controle de corrente por histerese neste ensaio, as duas chaves controladas são mantidas fechadas durante a magnetização da fase e mantidas abertas na desmagnetização. Logo, como indica a Figura 16, 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.

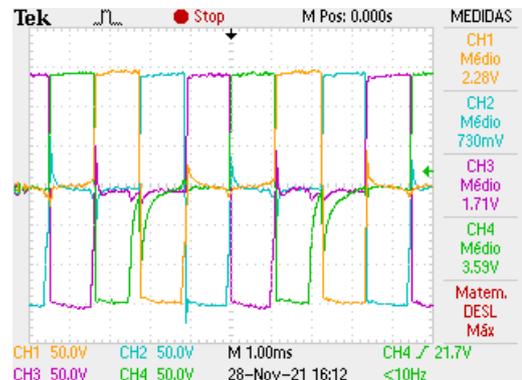
As tensões de fase também respondem ao chaveamento do conversor, como pode ser notado na Figura 17 e na Figura 18. Como foram aplicados 150 V no barramento CC, essa foi a tensão aplicada na fase durante a etapa de magnetização. Quanto ao processo de desmagnetização, a fase apresenta o comportamento de 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 17: Tensões nas 4 fases do MRV 8/6 medidas pela plataforma do Ensaio 1.



Fonte: Autores.

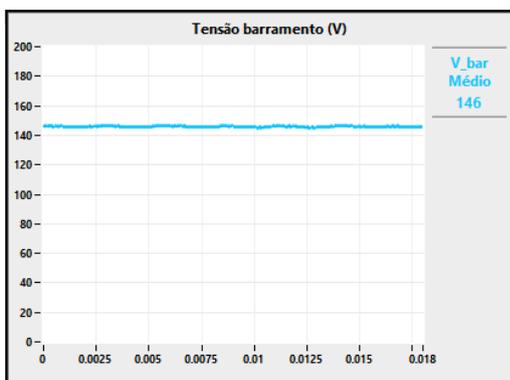
Figura 18: Correntes nas 4 fases do MRV 8/6 medidas pelo osciloscópio do Ensaio 1.



Fonte: Autores.

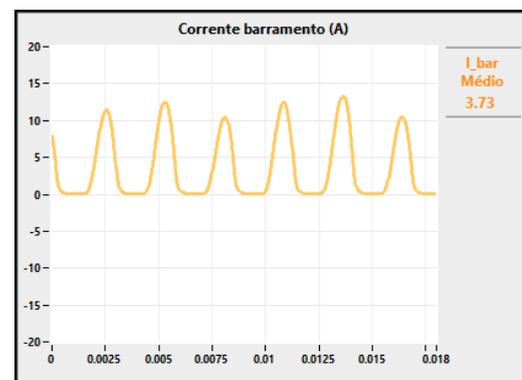
Ainda sobre as tensões de fase, é importante observar que as medições realizadas na plataforma são condizentes com medições captadas pelo osciloscópio, permitindo entender que o sistema de aquisições de tensões também foi bem projetado. Tal afirmação é mais uma vez comprovada por meio das medições de corrente, de tensão e de potência no barramento CC, as quais estão respectivamente exibidas na Figura 19, na Figura 21 e na Figura 21. A Figura 22 reúne essas mesmas grandezas, aquisicionadas pelo osciloscópio.

Figura 19: Tensão no barramento CC medida pela plataforma de instrumentação virtual do Ensaio 1.



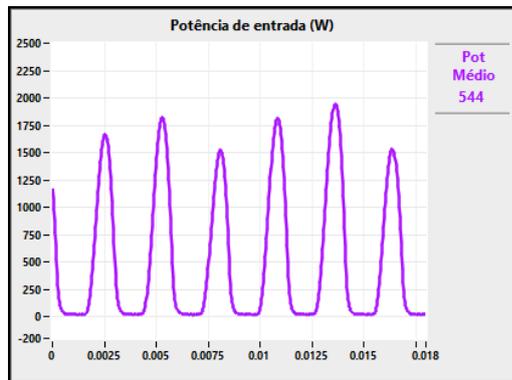
Fonte: Autores.

Figura 20: Correntes no barramento CC medida pela plataforma de instrumentação virtual do Ensaio 1.



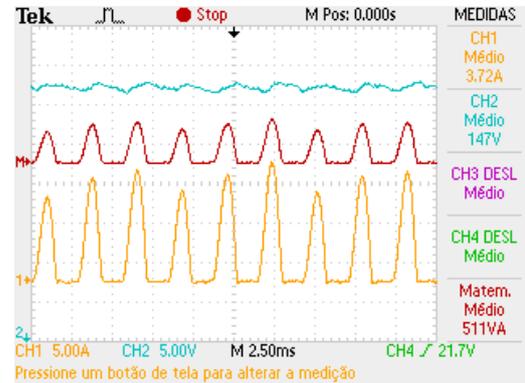
Fonte: Autores.

Figura 21: Potência no barramento CC medida pela plataforma de instrumentação virtual do Ensaio 1.



Fonte: Autores.

Figura 22: Tensão, corrente e potência no barramento CC medidas pelo osciloscópio do Ensaio 1.

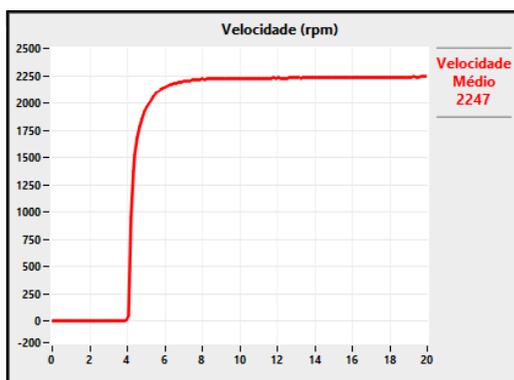


Fonte: Autores.

A tensão no barramento CC é retificada, podendo ser considerada fundamentalmente contínua, a qual apresentou valor médio de 146 V. Na forma de onda da corrente é visto altos picos intercalados com instantes de corrente zero, com média de 3,73 A. 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 VA. Comparando as medições com o osciloscópio, é visto que as formas de ondas das grandezas são semelhantes, entretanto nota-se uma diferença de 33 VA na potência média calculada.

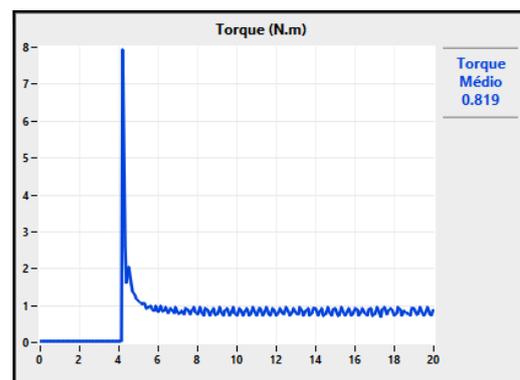
A velocidade média mensurada pelo estimador de velocidade da plataforma foi de 2247 rpm, enquanto que, utilizando o tacômetro, encontrou-se 2250 rpm. Como pode ser inferido a partir da Figura 23, que mostra a evolução da velocidade média no tempo, foram necessários aproximadamente 4 segundos para que a velocidade fosse estabilizada. Vale ressaltar que, como não foi aplicado controle de velocidade em malha fechada, a velocidade é afetada diretamente pelo valor da corrente e pela carga imposta ao motor.

Figura 23: Velocidade média do MRV 8/6 no Ensaio 1.



Fonte: Autores.

Figura 24: Torque médio do MRV 8/6 no Ensaio 1.



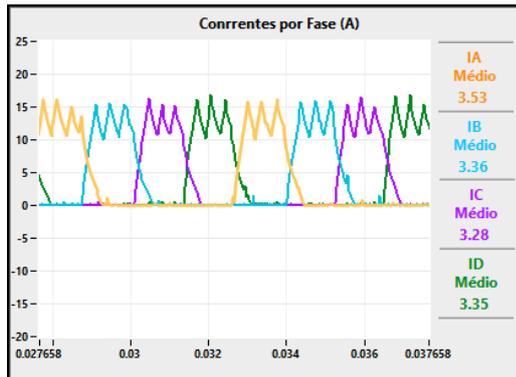
Fonte: Autores.

O torque médio do motor a relutância variável no tempo é visto na Figura 24, o qual tem aproximadamente 0,82 N.m. Quando o motor é acionado, o mesmo passa por um período transitório antes de entrar no regime permanente, podendo ser observado um pico de 7,8 N.m no perfil inicial. No MRV, mesmo em regime permanente, ocorre oscilação do torque, sendo está uma característica inerente à máquina, em virtude do seu aspecto construtivo (polos duplamente salientes) e ao chaveamento da corrente em seu acionamento.

3.2 Ensaio 2

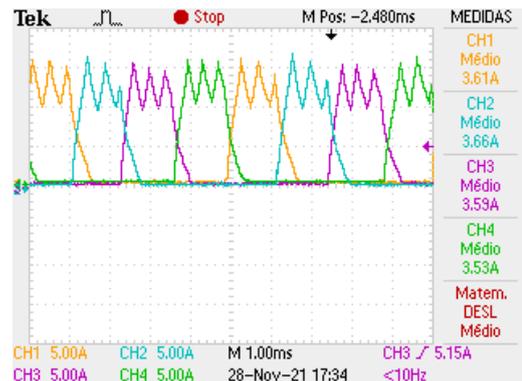
Neste ensaio foi realizado o acionamento do motor a relutância variável com tensão de 300 V no barramento CC. Além disso, foi implementado controle de corrente por histerese, com limites de 11 A e 15 A, valores determinados de modo a manter a velocidade próxima a 2000 rpm. O comportamento das correntes durante o acionamento pode ser visualizado na Figura 25 e na Figura 26.

Figura 25: Correntes nas 4 fases do MRV 8/6 medidas pela plataforma de instrumentação virtual no Ensaio 2.



Fonte: Autores.

Figura 26: Correntes nas 4 fases do MRV 8/6 medidas pelo osciloscópio no Ensaio 2.

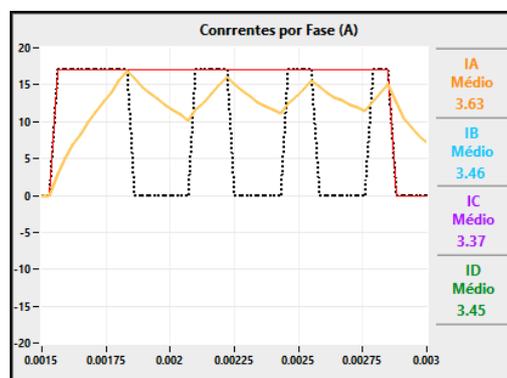


Fonte: Autores.

Na Figura 25 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 melhor compreendidos por meio da Figura 27. A curva em vermelho representa um dos gates, este, acionado durante todo o período de condução da fase A (sinal em laranja). A curva pontilhada em preto mostra o nível 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.

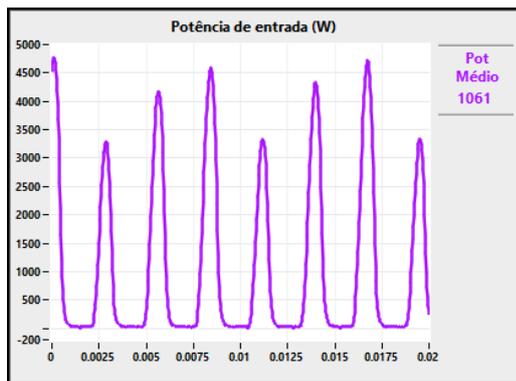
Figura 27: Corrente da fase A (laranja) e pulsos das chaves controladas da fase A (vermelho e preto).



Fonte: Autores.

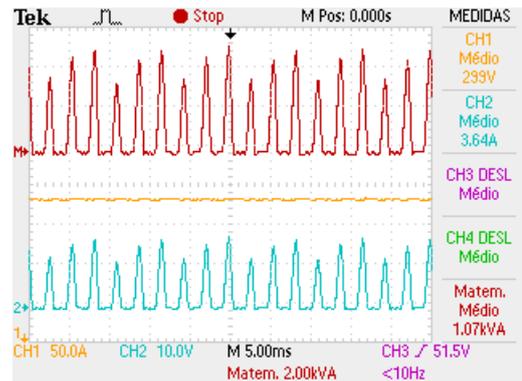
A potência no barramento CC calculada pela plataforma foi de 1061 VA, que se diferiu apenas por 9 VA do valor encontrado pelo osciloscópio, como é mostrado ao comparar a Figura 28 e a Figura 29. Em ambas as figuras, a potência apresenta aspecto pulsante com instantes de amplitude igual zero, comportamento proveniente da forma de onda da corrente, sendo este, semelhante ao comportamento observado no Ensaio 1.

Figura 28: Potência no barramento CC medida pela plataforma de instrumentação virtual no Ensaio 2.



Fonte: Autores.

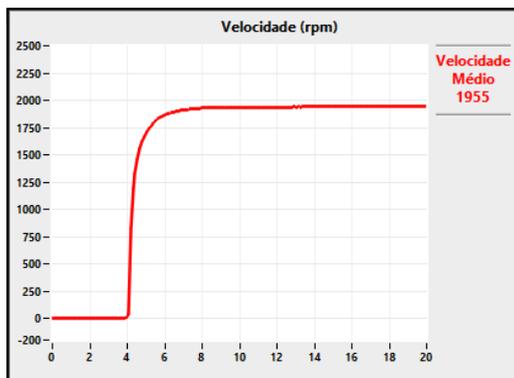
Figura 29: Tensão, corrente e potência no barramento CC medidas pelo osciloscópio no Ensaio 2.



Fonte: Autores.

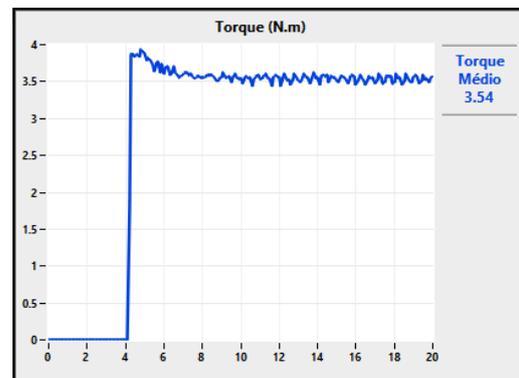
A Figura 30 mostra a velocidade em função do tempo, operando em regime permanente, com média de 1955 rpm e assim como no Ensaio 1, foram gastos 4 segundos para a velocidade chegar à estabilidade. A Figura 31 exibe o torque médio, que após um período transitório, apresenta característica oscilatória entorno do valor médio de 3,54 N.m.

Figura 30: Velocidade média do MRV 8/6 no Ensaio 2.



Fonte: Autores.

Figura 31: Torque médio do MRV 8/6 no Ensaio 2.



Fonte: Autores.

3.3 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 1, a qual relaciona a velocidade média (rad/s) com o torque (N.m) no eixo da máquina, ambas informações mensuradas pela plataforma.

$$P_m = \omega_m T_e \quad (1)$$

Onde,

P_m = Potência mecânica de saída;

ω = velocidade angular do motor;

T_e = Torque entregue pelo motor.

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 2 descreve o procedimento para o cálculo do rendimento.

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} \times 100 \quad (2)$$

Em que,

η = rendimento;

P_e = Potência de entrada.

A Tabela 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 1: Grandezas obtidas nos ensaios.

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

Fonte: Autores.

De acordo com a Tabela 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.

4. Conclusão

A plataforma de instrumentação virtual destinada ao acionamento e monitoramento do MRV 8/6 cumpriu com o papel designado, apresentando em software e hardware, processos que simplificassem o estudo do motor e aplicação de novas metodologias. Para isso, reuniram-se todas as funcionalidades em uma interface única, permitindo, de forma amigável e simplificada, controlar a fonte de tensão, acionar o motor com diferentes parâmetros e alterá-los em tempo real, monitorar todos os sinais coletados e calculados, e salvar os dados em forma de tabela e imagem.

Os ensaios experimentais foram mostrados, comparados com instrumentos convencionais e discutidos, comprovando a coerência dos sinais captados pelo sistema de aquisição de dados da plataforma. Além disso, por meio dos resultados, foi validado o acionamento do MRV 8/6 para as condições propostas, mostrando que: como é característico ao motor a relutância variável, as correntes de fase apresentam altos picos, porém, seu valor médio é bem menor, cerca de 24% do pico de corrente, para o motor ensaiado; o controle de corrente por histerese atuou bem, limitando as correntes na banda selecionada; o rendimento da máquina cresce à medida que é acionada em condições próximas as nominais.

Recomenda-se para futuros trabalhos que seja implementado controle de velocidade em malha fechada, de modo a manter a velocidade fixa mesmo com a variação da carga em seu eixo. Além disso, pode-se analisar a influência dos ângulos de condução no comportamento do motor, e ainda, efeitos da sobreposição de fases no acionamento. Por fim, sugere-se que seja adicionada medição de temperatura nas bobinas estatóricas do motor, em vista de analisar seu efeito no acionamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro que foi essencial para o desenvolvimento da pesquisa.

Referências

- Bianchi, R. B. & Andrade, D. A. (2012). Projeto, Modelagem e Levantamento de Curva de Indutância de Máquina a Relutância Variável 8x6 Utilizando Elementos Finitos. *X Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica*, 1-6.
- Carvalho, C. F. & Signorelli, M. H. A. (2017). Princípio de funcionamento e acionamento do motor a relutância variável. *IV Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica*, 1-5.
- Dias, R. J. (2012). Motores a relutância variável 6x4 e 6x6: Estudo comparativo de operação e desempenho. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - *Universidade Federal de Uberlândia*, 1-98.
- Elmutalab, M. A., Elrayyah, A., Husain, T. & Sozer, Y. (2016). Extending the speed range of a switched reluctance motor using a fast demagnetizing technique. *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. <https://doi.org/10.1109/ecce.2016.7855105>
- Faria, V. H. da C., Caixeta, L. C. ., Ramos, G. E. O., & Gomes, L. C. (2021). Virtual instrumentation applied in the development of a transformer test bench. *Research, Society and Development*, 10(16), e249101623890. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i16.23890>
- Fidelis, R., Viajante, G., Gomes, L., Andrade, D., Chaves, E., Freitas, M., Vieira, C. & Filho, M. (2018). Proposal of a Test Bench for Switched Reluctance Machine 8/6 for Wind Energy Application. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1, 481–486. <https://doi.org/10.24084/repqj16.359>
- Fidelis, R.T., Viajante, G.P., Alves, D.C., Mendonça, F., Andrade, D.A., Souto, O.C., Wezs, L.G. & Coutinho, L.F. (2016). Development of an Experimental Platform to Drive the Switched Reluctance Machine. *Renewable energy & power quality journal*, 774-779.
- Fidelis, R. T. (2018). 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*, 100-152.
- Koche, J. C. (2011). Fundamentos de metodologia científica. Petrópolis: Vozes.
- Kula, S. & Cosman, S.I. (2016). Switched reluctance motor model implemented on PXI FPGA target. *2016 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/isfee.2016.7803165>
- Lopes, V. J. S. (2007). Instrumentação virtual aplicada ao ensino experimental de engenharia elétrica. 2007. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) – *Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo*, 25-98.
- Loria, A., Espinosa-Perez, G., Chumacero, E. & Aguado-Rojas, M. (2013). Speed-sensorless control of switched-reluctance motors with uncertain payload. *2013 American Control Conference*. <https://doi.org/10.1109/acc.2013.6580362>
- Machado, G. de O., Fidelis, R. T., Moraes Filho, M. J. de, Viajante, G. P., Silveira, A. W. F. V. da, & Gomes, L. C. (2022). Optimized design and finite element analysis of a four-phase 8/6 switched reluctance motor. *Research, Society and Development*, 11(2), e23411225681. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i2.25681>
- Moraes Filho, M. J. d. (2017). Desenvolvimento de plataforma de acionamento digital para motor a relutância variável 8/6. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - *Universidade Federal de Uberlândia*, 10-63.

- Nashed, Maged. (2014). Hysteresis Current Control of Switched Reluctance Motor in Aircraft Applications. *International Journal of Power Electronics and Drive System*. 4. 376-392.
- Oliveira, C. A. de. (2018). 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) - *Universidade Federal de Uberlândia*, 1-115.
- Oliveira, E. S. L. (2011). Projeto, construção, simulação, implementação e testes de um gerador a relutância chaveada monofásico. 2011. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - *Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo*, 37-52.
- Pinheiro, V. M., Oliveira, C. A. de, & Gomes, L. C. (2021). Contribution to the analysis of the three-phase induction generator with wound rotor: experimental and theoretical studies under normal operating conditions and with unbalance voltage. *Research, Society and Development*, 10(16), e93101623490. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i16.23490>
- Reis, M. R. C. (2020). 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 da Computação) - *Universidade Federal de Goiás*, 29-56.
- Silva, F. S. (2015). Bancada de simulação de cargas mecânicas para motor de indução trifásico acionado por conversor de frequência. 2015. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - *Universidade Federal de Uberlândia*, 78-84.
- Vijayakumar, K., Karthikeyan, R., Paramasivam, S., Arumugam, R. & Srinivas, K. (2008). Switched Reluctance Motor Modeling, Design, Simulation, and Analysis: A Comprehensive Review. *IEEE Transactions On Magnetics*, 44(12), 4605-4617. doi: 10.1109/tmag.2008.2003334
- Vijayraghavan, P. (2001). Design of Switched Reluctance Motors and Development of a Universal Controller for Switched Reluctance and Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives. 2001. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - *Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University*, 31-49.
- Wichert, T. (2008). Design and Construction Modifications of Switched Reluctance Machines. 2008. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - *Warsaw University of Technology*, 17-33.
- Yasa, Y., Sozer, Y. & Garip, M. (2018). Loss analysis of high speed switched reluctance machine with integrated simulation methods. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 56. 1-19.
- Zaharia, M.V. (2016). 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*, 5-28.