

DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR PARA UMA MÁQUINA DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL TIPO 6/4 PROJETADA EM LABORATÓRIO

VINÍCIUS A. MESQUITA, JUCELINO TALEIRES, ANDRESA K. R. SOMBRA, WILKLEY B. CORREIRA, WELLINGTON A. SILVA, RÔMULO N. C. ALMEIDA, LAURINDA L. N. DOS REIS, GIOVANNI C. BARROSO

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará
Fortaleza, CE, Brasil*

Abstract— This paper presents the development of a switched reluctance machine (SRM) 6/4 simulator. The machine was developed by teachers and students of the Federal University of Ceará. Thus, came the need to design a simulator that considers the intrinsic parameters and non-linearities of this machine. For this, the mathematical modeling of the machine, the characterization of the mechanical parameters and the identification of the inductance profile were performed. In addition, the drive circuit was developed based on an asymmetric half-bridge converter, considering different drive logic. It was also envisaged the application of different loads in the SRM, being possible to operate it as a primary machine of a direct current (DC) generator or in phase lack. In order to evaluate the simulator implemented in the laboratory test bench, a speed controller was developed, which is tested in the simulator and in the bench, in the condition of load application in the DC generator and in phase lack. The experimental results of speed remained within the values observed in the simulator, while the reference current generated by the controller of the simulator showed close values when operating around the plant identification point. The data comparison proved the simulator efficiency.

Keywords— SRM, simulator, modeling, laboratory.

Resumo— Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um simulador para uma máquina de relutância variável (MRV) 6/4 projetada por professores e alunos da Universidade Federal do Ceará. Surgiu, então, a necessidade de projeto um simulador considerando os parâmetros e não linearidades intrínsecas desta máquina em particular. Para isto, foi realizada a modelagem matemática da máquina, a caracterização dos parâmetros mecânicos e a identificação do perfil de indutâncias. Além disso, elaborou-se o circuito de acionamento baseado em um conversor de meia-ponte assimétrico, considerando diferentes lógicas de acionamento. Foi prevista, ainda, a aplicação de diferentes cargas na MRV, sendo possível operá-la, inclusive, como máquina primária de um gerador de corrente contínua (CC) ou em falta de fase. Para validar o simulador implementado, foi desenvolvido um controlador de velocidade, o qual é testado, no simulador e na bancada, na condição de aplicação de carga no gerador CC e em falta de fase. Os resultados experimentais de velocidade permaneceram dentro dos valores observados no simulador, enquanto a corrente de referência gerada pelo controlador do simulador apresentou valores próximos quando operava em torno do ponto de identificação da planta. A comparação dos dados comprovou a eficiência do simulador.

Palavras-chave— MRV, simulador, modelagem, laboratório.

1 Introdução

A máquina de relutância variável (MRV) é uma máquina elétrica de simples construção, sendo uma das pioneiras na indústria. O interesse industrial pela MRV acontece desde 1850 (Krishnan, 2001), tendo sua utilização diminuída devido à complexidade de acionamento para a tecnologia da época. Com o avanço da engenharia dos materiais e da microeletrônica, novas técnicas de acionamento e controle de dispositivos elétricos surgiram, tornando possível a utilização de máquinas elétricas que outrora era limitada. As principais vantagens da MRV são sua simples construção, elevada robustez, baixo custo de produção e a dispensabilidade do uso de materiais magnéticos (Silva, 2017).

Além disso, a máquina tem tolerância a falhas que a distingue de outras máquinas elétricas, principalmente devido à continuidade de operação em caso de falta de fase. As desvantagens são excessivo ruído durante a operação, ondulação no conjugado eletromagnético produzido, necessidade da informação de posição (sensor acoplado ao eixo do rotor) e alta complexidade de acionamento de cada fase.

Atualmente, revela-se o interesse crescente da comunidade acadêmica em estudar novos conversores para a máquina (Anand, 2016), redução do ruído para motores de alta eficiência (Kawa, 2017), utilização na geração de energia (Nassereddine, Rizk e Nagrial, 2009), medidas para diminuição da oscilação do conjugado (Deng, Mecrow, *et al.*, 2017), projeto de MRVs que possuem alta relação de conjugado e peso para veículos elétricos (Zhu, Cheng, *et al.*, 2017).

A MRV estudada neste trabalho foi resultado da dissertação de mestrado de Teixeira (Teixeira, 2008), em que foi desenvolvido um protótipo com potência nominal de 1 HP, configuração 6/4 e rotação nominal de 2000 rpm. Por conseguinte, diversos trabalhos foram desenvolvidos utilizando o protótipo, como a caracterização eletromecânica estática e dinâmica da máquina (Oliveira, 2013), controlador de corrente baseado no controlador de variância mínima (Reis, Coelho, *et al.*, 2007), controlador de velocidade tipo PI em uma estrutura de autossintonia (Sobreira, 2008), controle preditivo de velocidade (Silva, Reis, *et al.*, 2013), dentre outros.

Outros trabalhos já trataram da modelagem da MRV em *software*. Em (Mahdavi, 1997), o autor modela uma MRV no *PSPICE* focado na não-linearidade do acionamento. Em (Pletea, 2001), o autor modela a máquina, a carga mecânica e o conversor de aciona-

mento utilizando a linguagem Pascal. Em (Soares, 2001), o autor modela uma MRV tipo 6/4, contemplando as características não lineares, no ambiente do *Matlab*. Em (Martinez, 2007) o autor também modela e controla a MRV no *Matlab/Simulink*, com o foco na máquina funcionando como gerador. No entanto, o autor não valida o sistema experimentalmente. Em (Chang, 2011) os autores utilizaram o *software PSIM* para modelar uma MRV de 4 fases operando como motor, com a justificativa da simplicidade e eficácia que o *software* oferece para simulações envolvendo eletrônica de potência e acionamento de máquinas elétricas.

Este trabalho, como citado anteriormente, propõe o desenvolvimento de um simulador da MRV projetada, contemplando suas características não-lineares, no ambiente de um software mais atual, em comparação com o método utilizado por (Pletea, 2001), e voltado para circuitos elétricos, como é o caso do *PSIM*. Além disso, o *PSIM* tem a vantagem de exigir menor esforço computacional se comparado ao *Matlab*, por exemplo.

2 Máquina de Relutância Variável

A máquina de relutância é considerada atraente tanto devido à simplicidade construtiva como pela ausência de ímãs permanentes em sua construção. A MRV é constituída por um estator, no qual são alocados os enrolamentos de fase, e por um rotor de polos salientes constituído de material ferromagnético. O número de pólos no estator e no rotor podem variar, bem como o número de fases da máquina.

2.1 Equações e Modelo Elétrico

A máquina de relutância é uma máquina elétrica em que o conjugado é produzido pela tendência do rotor de se mover para uma posição onde a indutância do enrolamento energizado será maximizada (Miller, 2001), ou seja, a relutância do circuito magnético tenderá a ser mínima. A Figura 1 exibe uma visão 3D simplificada de uma MRV tipo 6/4 (6 pólos no estator e 4 no rotor).

A equação da tensão aplicada nos terminais da máquina é dada pela Equação 1.

$$v = R \cdot i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + \omega_m \cdot i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (1)$$

Sendo v a tensão nos terminais da máquina, i a corrente que circula na bobina, L a indutância variável dependente da corrente i e da posição angular θ e ω_m a velocidade angular do rotor. O primeiro e o segundo termo da Equação 1 representam, respectivamente, a queda de tensão na resistência e na indutância, enquanto o último representa a força contraeletromotriz. O circuito equivalente da máquina é representado na Figura 2.

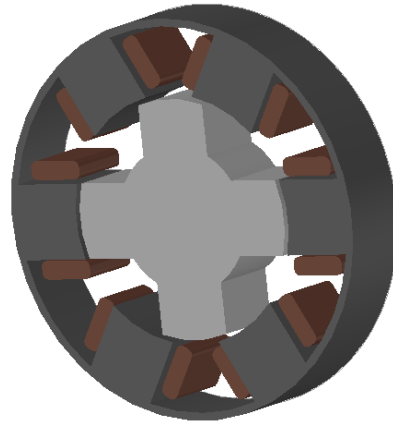


Figura 1. Visão 3D simplificada da MRV tipo 6/4

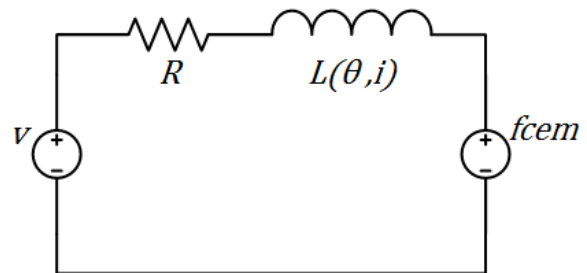


Figura 2. Circuito equivalente simplificado da MRV

A potência mecânica p_{conv} convertida é dada pela Equação 2.

$$p_{conv} = \frac{1}{2} i^2 \omega_m \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (2)$$

Sendo assim, o conjugado eletromecânico da máquina é calculado pela Equação 3.

$$T_{em} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (3)$$

2.2 Característica Não-linear de Indutância

As MRVs utilizam materiais ferromagnéticos para que os campos magnéticos da máquina tenham direção e forma, bem como para aumentar a densidade de fluxo magnético em determinada amplitude de corrente. Neste sentido, a MRV opera com elevada densidade de fluxo, em funcionamento normal, assim o material se mantém em estado de saturação magnética (Fitzgerald, Kingsley E D, 2014).

Devido ao perfil de funcionamento da máquina, a indutância desta possui característica não-linear. Sendo assim, também a sua derivada em relação ao tempo possui característica não-linear.

Para obtenção dos perfis de indutância não lineares da máquina, utilizou-se o método de determinação da impedância com tensão alternada, o qual consiste na aplicação de um sinal senoidal de tensão e de corrente no enrolamento da fase.

A natureza do circuito indutivo da MRV proporciona uma defasagem entre os ângulos dos fasores da tensão e da corrente, o que permite a medição da indutância a partir dos dados adquiridos no ensaio (Oliveira, 2013). O resultado é mostrado na Figura 3.

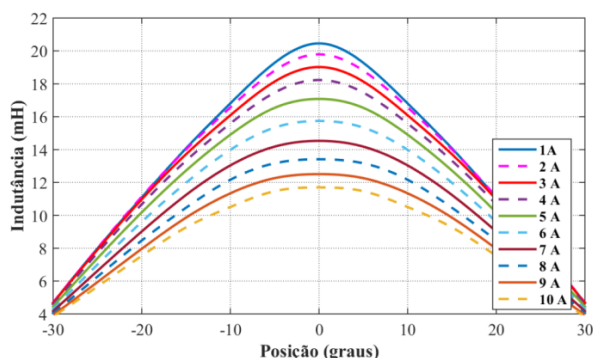


Figura 3. Perfis de indutâncias da MRV

2.3 Identificação dos Parâmetros Mecânicos

Em Silva (2017), a identificação dos parâmetros J , momento de inércia da máquina, e B , coeficiente de amortecimento, baseou-se na seguinte metodologia: acionou-se a máquina em vazio até alcançar a velocidade de 1000 rpm (104,7 rad/s); após estabelecer-se o regime permanente, a máquina foi desligada e se verificou o comportamento dinâmico desta.

O coeficiente de amortecimento B é calculado com a máquina funcionando sem carga e em regime permanente, caracterizada pela taxa de variação de velocidade $d\omega/dt$ nula.

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos após o ensaio. Conhecendo o valor do torque eletromagnético e em posse da velocidade angular, o valor de B obtido é de $0,98 \cdot 10^{-3} N.m.s$.

É possível observar que no instante 5 s, a máquina foi desenergizada e levou 0,67 s para sair da velocidade de 1000 rpm para 362 rpm (equivalente à redução de 63,2%), o que corresponde a uma constante de tempo mecânica (τ) igual a 0,67 s.

Aplicando as condições referentes ao ensaio na Equação 4, obtém-se um J equivalente a $0,66 \cdot 10^{-3} kg.m^2$

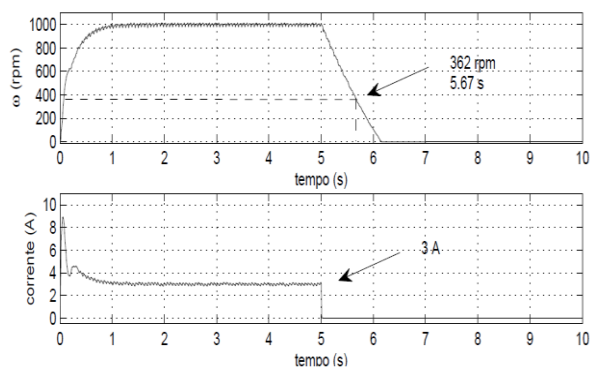


Figura 4. Identificação da constante de tempo mecânica

$$T_{em} - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (4)$$

3 Sistema de Acionamento

Um sistema de acionamento para uma MRV é composto pelo conversor de potência com seu respectivo *driver*, o qual proporcionará a entrega da energia à máquina a partir de uma fonte de potência, e, finalmente, pelo dispositivo de controle. Para o adequado chaveamento entre as fases da máquina, é necessário o conhecimento da posição angular do rotor.

Normalmente, faz-se uso de um sensor de posição acoplado ao eixo da máquina para se prover essa informação ou se utiliza de alguma técnica de estimação da posição (*sensorless*) (Silva, 2017). A Figura 5 apresenta um diagrama esquemático da composição do sistema da bancada deste trabalho.

3.1 Características de Acionamento

O acionamento da MRV depende da energização das fases em posições angulares específicas, uma vez que tal característica influencia no desempenho da máquina (Silva, 2017).

O tipo de acionamento mais comumente utilizado é o conversor meia ponte assimétrico, pois permite o controle da corrente, a recuperação da energia armazenada no campo magnético e a aplicação de tensão reversa na bobina da fase para rápida descarga de corrente, além de possuir construção simplificada e conferir independência entre as fases.

A Figura 6 mostra um conversor meia ponte assimétrico para uma MRV trifásica.

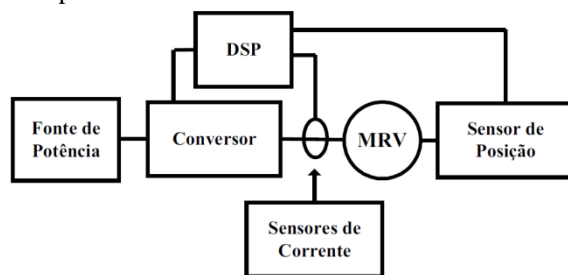


Figura 5. Diagrama esquemático do sistema de acionamento da MRV

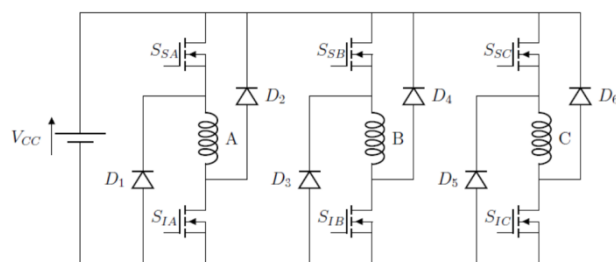


Figura 6. Conversor meia ponte assimétrico

3.1 Comutação Suave

Para o acionamento, optou-se pela utilização da comutação suave. Para médias e baixas rotações da MRV operando como motor, a velocidade pode ser controlada pelo chaveamento da corrente.

O método de acionamento por comutação suave (também chamado de soft switching ou soft chopping) corresponde a um chaveamento em que apenas uma chave é acionada para controlar a corrente. A outra chave permanece ligada e é denominada chave de comutação devido à sua função de apenas conduzir durante o início e fim do período de condução da fase (Miller, 2001). Com isso, as perdas nas chaves são reduzidas.

Além disso, a ondulação de corrente durante o controle da corrente é reduzida, pois a tensão aplicada à bobina oscila entre 0 e a tensão da fonte.

A Figura 7 exemplifica a comutação suave, em que o controle da corrente ocorre apenas com uma chave.

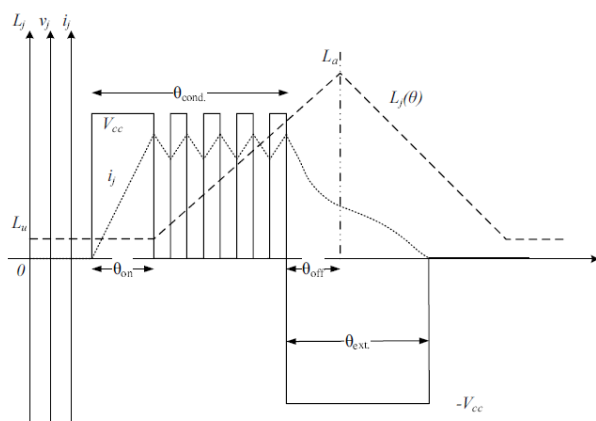


Figura 7. Exemplo de comutação suave

3.2 Controle de Corrente

O controle de corrente por histerese com frequência fixa é utilizado para manter a corrente em torno de um valor de referência. Esta técnica é usada devido à simplicidade de implementação.

A frequência de acionamento das chaves é de 25 kHz, sendo este um valor elevado, o que torna o controle de corrente imperceptível ao controle de velocidade.

No controle de corrente por histerese, a frequência é fixa e o valor da corrente de referência pelo menos uma das chaves da fase é desligada quando a corrente que circula na bobina excede um valor determinado. Devido à descarga, a corrente diminui até atingir um valor abaixo do determinado, habilitando a chave ser ligada novamente. Esse ciclo se repete em torno do valor ajustado de corrente.

A estratégia de controle de histerese utilizada foi de modo a manter a frequência de chaveamento do conversor constante, permitindo variação da banda de histerese.

A Figura 8 permite observar a corrente na fase em conjunto com o acionamento da chave e o comportamento da indutância, de modo a explicitar a ação do controle de histerese.

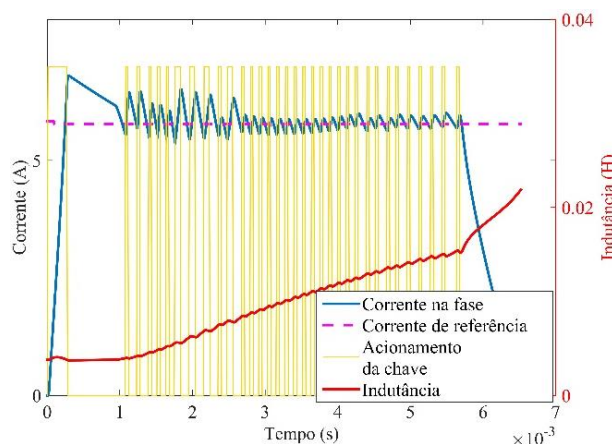


Figura 8. Conversor meia ponte assimétrico

4 Simulador

A fim de implementar e analisar o desempenho do controlador em situação de falta de fase, desenvolveu-se uma simulação em *PSIM* para a MRV específica da bancada deste trabalho, utilizando elementos do simulador e blocos de programação em C. O simulador tem o objetivo de contemplar as características não-lineares da máquina, além de reproduzir as condições de perturbações que se percebe na bancada.

A disposição dos módulos de processamento do simulador é apresentada na Figura 9.

A divisão dos módulos consiste em: conversor: circuito do conversor de meia ponte assimétrico; MRV: processamento das variáveis pertinentes à máquina, tais como cálculo de indutância linear ou não linear, corrente e tensão em cada fase e conjugado eletromagnético de cada fase; acionamento: sistema de acionamento; cargas: aplica cargas na ponta do eixo da máquina com características constante, linear e quadrática e contém um gerador de corrente contínua, o qual fornece energia para um banco de resistores e, como resultado, gera um conjugado resistente à MRV; controlador de velocidade: toma os valores de velocidade na ponta do eixo e gera o sinal de controle de corrente de referência; cálculo de velocidade: tem como entrada o conjugado resultante e como saída, as velocidades, em rad/s e rpm, e a posição.

Para o cálculo instantâneo da indutância não linear e da sua derivada com relação ao ângulo, aplicou-se uma técnica utilizada por (Chang, 2011). Primeiramente, obteve-se os valores da indutância para cada valor de corrente e de posição angular pré-determinados. Em seguida, os resultados foram processados no *software Matlab* por meio de uma interpolação a partir dos valores do passo anterior, de modo a obter dados numéricos mais refinados, isto é, de maior resolução.

Estes dados serviram de base para um componente do PSIM (*lookup table*) que toma os valores da corrente e de ângulo de uma fase e, em seguida, calcula o valor da indutância e sua derivada a partir dos dados de base fornecidos pela interpolação.

O cálculo é feito utilizando a Equação 5, em que k corresponde à posição na tabela, v_{in} corresponde ao valor de entrada na tabela, v_o ao valor de saída na tabela, v_{inp} ao valor de entrada atual e v_{out} ao valor calculado para a entrada v_{inp} .

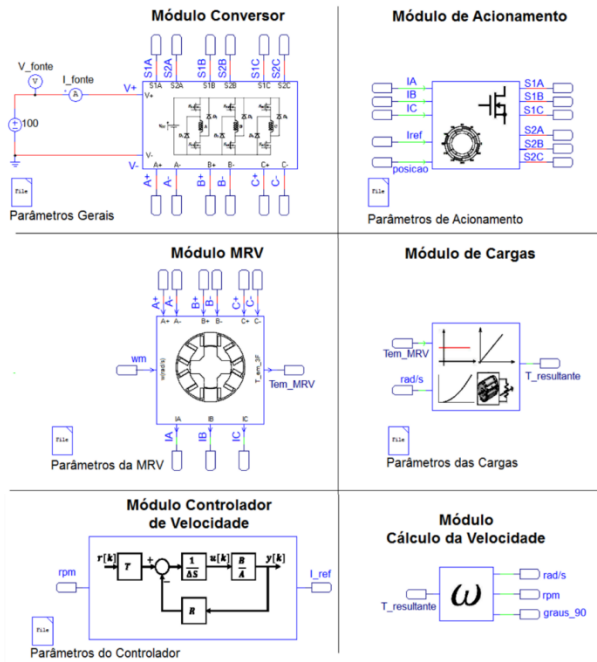


Figura 9. Visão geral do simulador implementado no PSIM

$$v_{out} = v_o(k) + \frac{(v_o(k+1) - v_o(k))(v_{inp} - v_{in}(k))}{v_{in}(k+1) - v_{in}(k)} \quad (5)$$

5 Controle

As etapas de identificação da malha de velocidade e projeto do controlador foram realizadas no ambiente de simulação desenvolvido.

Um modelo genérico da planta da MRV é apresentado na Figura 10. Observa-se a presença da malha de controle de corrente (C_i), mais interna, e de velocidade (C_v), possuindo um tempo de amostragem, respectivamente, de 40 μ s e 10 ms.

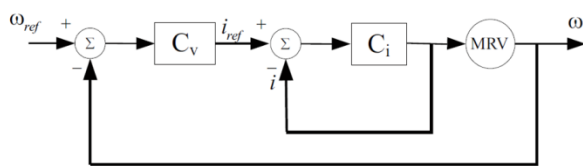


Figura 10. Diagrama do sistema de controle de velocidade da MRV

5.1 Identificação da Malha de Velocidade

O modelo de velocidade foi obtido a partir da resposta ao degrau, aplicando-se 4 A ao circuito de acionamento. O gráfico apresentado na Figura 11 mostra que pode-se aproximar o modelo de velocidade, adequando-se ao *hardware* utilizado, por uma função de transferência de primeira ordem do tipo:

$$G(s) = \frac{506.81}{0.63s + 1} \quad (6)$$

O controle de velocidade é implementado em DSP, portanto, se faz necessário obter um modelo em tempo discreto. Dessa forma, considerando a aproximação *backward*, a Equação 6 se torna na Equação 7.

$$G(z) = \frac{7.981}{z - 0.9843} \quad (7)$$

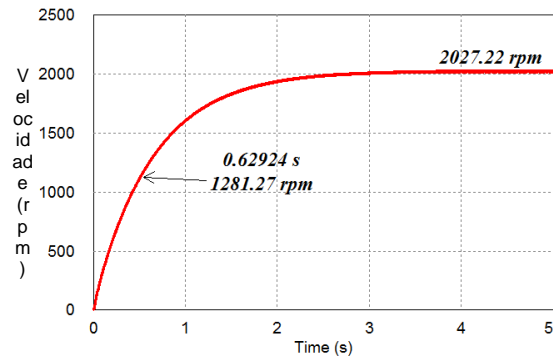


Figura 11. Resposta do sistema ao degrau

5.2 Projeto do Controlador de Velocidade

A estrutura RST, sendo a sigla referente a cada um dos polinômios desta, foi utilizada para implementar o controle de velocidade desejado devido à facilidade de aplicação, ao excelente desempenho quando projetado corretamente, à flexibilidade quanto ao método de controle a ser utilizado e à possibilidade de aplicação de filtros nos sinais de referência e saída. Um diagrama geral para implementação da estrutura é apresentado na Figura 12.

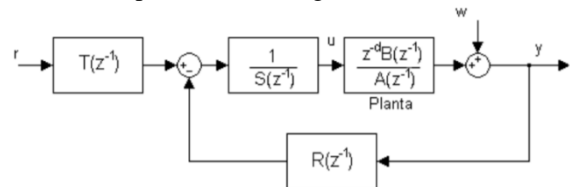


Figura 12. Diagrama geral de um controlador RST

Para o projeto, foi realizado o seguinte procedimento: especificação do desempenho desejado, estimação dos parâmetros do controlador e verificação da robustez do controlador com relação às margens de tolerância e às funções de sensibilidade.

A especificação do controlador foi: tempo de subida de 300 ms e máxima ultrapassagem percentual de 0,01%.

Para a estimação dos parâmetros do controlador, um algoritmo desenvolvido no *Matlab* resolve um sistema de equações, tendo sido os parâmetros do controlador necessários para a topologia RST. Logo, obtve-se os seguintes parâmetros da Tabela 1. A Tabela 2 resume as margens de ganho, fase e módulo do controlador adotado para o controle da velocidade, comprovando a robustez deste.

Para que o controlador seja considerado robusto, recomenda-se que a função de sensibilidade permaneça dentro dos limites de tolerância, conforme obtido na Figura 13.

Tabela 1. Parâmetros do controlador de velocidade

R		S		T
r_0	r_1	s_0	s_1	t_0
2,21132	-2,09038	1	-1	0,12094

Tabela 2. Análise de robustez do controlador

Margem de ganho	Margem de fase	Margem de módulo
12,03 (21,61 dB)	71,68°	0,917 (-0,754 dB)

O controlador de corrente foi projetado de acordo com a descrição no tópico 3.2.

6 Resultados e Discussões

Para a validação do simulador desenvolvido, foi utilizada a bancada da Figura 14. A bancada é composta por uma MRV trifásica, um controlador digital de sinais (DSC) TMS320F28335, um sensor de posição, um conversor meia-ponte assimétrico trifásico e um gerador de corrente contínua conectado a um banco de cargas resistivas. As principais características elétricas e mecânicas da máquina estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3. Principais características elétricas e mecânicas da MRV

Parâmetros	Valores
Potência nominal (HP)	1
Tensão nominal de fase (V_{CC})	120
Corrente nominal de fase (A)	10
Resistência média de fase (Ω)	0,45
Número de fases	3
Velocidade nominal (rpm)	2000
Número de polos do estator	6
Número de polos do rotor	4
Momento de inércia ($kg \cdot m^2$)	$0,66 \cdot 10^{-3}$

Para os testes, foi utilizado o controlador de velocidade definido em 5.2. Foi aplicado ao simulador um ângulo de adiantamento de ligamento e desligamento da fase de 2,5°, adequando-se ao utilizado em banca-

da. A comutação suave foi escolhida para chaveamento das fases. Além disso, foi produzida a curva de fluxo concatenado *versus* corrente, no simulador, para evidenciar as características não-lineares da máquina implementadas no *PSIM*, mostrado na Figura 15.

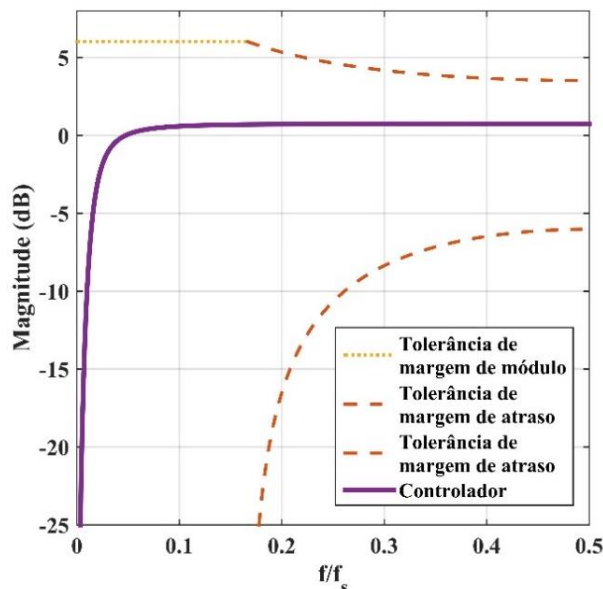


Figura 13. Resposta em frequência da função de sensibilidade

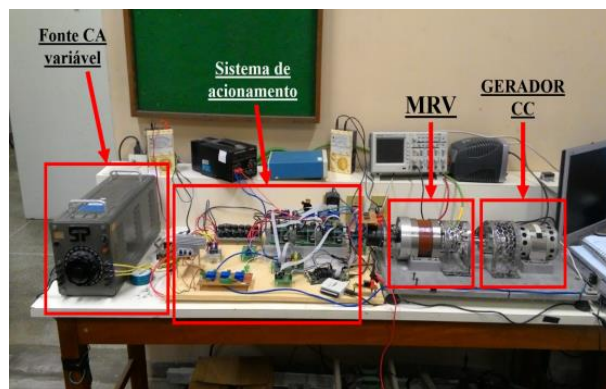


Figura 14. Esquemático de ligação da bancada experimental

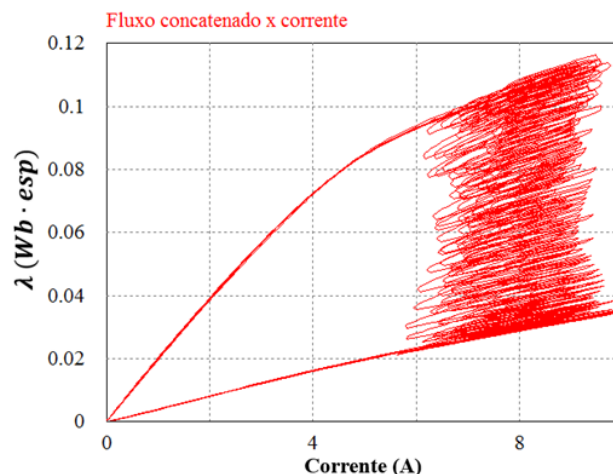


Figura 15. Curva de fluxo concatenado por corrente

6.1 Aplicação de Carga ao Gerador CC

O controlador foi aplicado ao simulador sendo definida uma velocidade de referência de 1000 rpm. A comparação entre os resultados obtidos no simulador e na bancada experimental para a velocidade e para a corrente de referência são apresentados na Figura 16. Em 2,98 segundos após o acionamento, foi inserida uma carga resistiva de 3 Ω ao gerador CC.

Os valores de velocidade e corrente fornecidos pelo simulador desenvolvido se mostraram satisfatoriamente próximos aos valores medidos experimentalmente em bancada. Para uma análise quantitativa, foi calculado o erro quadrático médio com finalidade de explicitar a diferença entre os dados simulados e reais em regime permanente, sendo desprezado o regime transitório. A Tabela 4 resume os erros de velocidade durante o período de operação em vazio e após a aplicação de carga ao gerador CC.

6.2 Operação com Aplicação de Falta de Fase

Foi verificada, ainda, a reprodutibilidade de resultados do simulador desenvolvido para a situação de falta de uma fase. Utilizando o mesmo controlador de 5.3, a máquina foi acionada e, após 5 segundos, uma falta de fase aplicada. Os resultados são expressos na Figura 17.

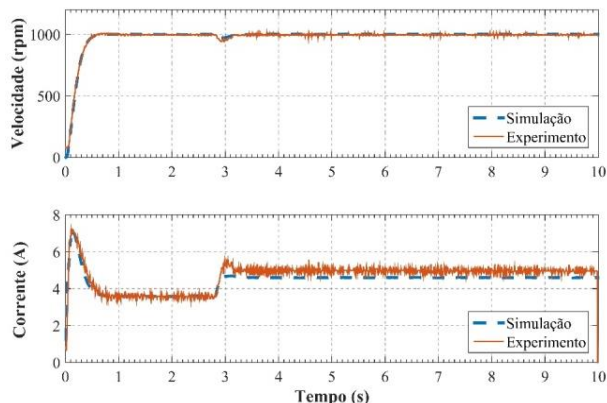


Figura 16. Resultados de velocidade e corrente de referência para a condição de carga

Tabela 4. Erro quadrático médio de velocidade e corrente para o controlador em condição de carga

Perturbação	Velocidade (rpm)	
	Real e referência	Real e simulado
Operando a vazio	0,582%	0,569%
Operando com carga de 3 Ω no gerador CC	0,799%	0,839%

Os valores obtidos através do simulador desenvolvido, novamente, se mostraram satisfatórios, tendo em vista a proximidade com os valores reais medidos em

bancada. A Tabela 5 apresenta a análise quantitativa de desempenho do controlador com base na medição do erro quadrático médio.

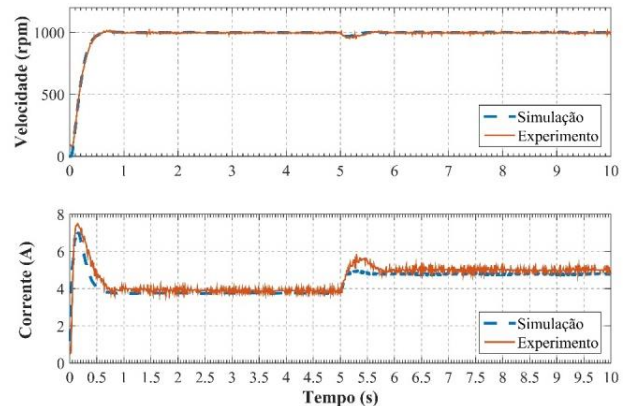


Figura 17. Resultados de velocidade e corrente de referência para a condição de falta de fase.

Tabela 5. Erro quadrático médio de velocidade e corrente para o controlador em condição de falta de uma fase

Perturbação	Velocidade (rpm)	
	Real e referência	Real e simulado
Operando a vazio	0,551%	0,563%
Operando em falta de uma fase	0,626%	0,679%

6 Conclusão

Foi desenvolvido um modelo de simulação para representar uma máquina de relutância variável projetada em laboratório. O simulador permitiu avaliar o comportamento desta máquina sob diversas circunstâncias com um grau de fidelidade satisfatório.

A versatilidade e capacidade de modularizar circuitos e blocos de equações do *PSIM* tornaram o simulador desenvolvido uma ferramenta poderosa e de fácil manuseio para a realização de análises da MRV projetada.

O erro quadrático médio apresentado nas Tabelas 4 e 5 comprovam a fidelidade do simulador quando confrontados com dados reais, resultando em um erro percentual máximo de 0,839%. A Figura 15 explicita a natureza não-linear da máquina aplicada no ambiente de simulação, tornando o simulador bastante autêntico à situação real.

Referências Bibliográficas

- Anand, A. and Singh, B. (2016). “Dual output cuk converter fed switched reluctance motor drive” – Bikaner: IEEE 7th Power India International Conference (PIICON). p. 1-6.
- Chang, Y. T. and Cheng, K. W. E. (2011). A Simulation Model for a 4 Phase Switched Reluctance Motor For PSIM. Hong Kong: IEEE. p. 5.

- Deng, X., Mecrow, B., Wu, H. & Martin, W. (2017). Design and Development of Low Torque Ripple Variable-Speed Drive System with Six-Phase Switched Reluctance Motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. pp. 1-1.
- Fitzgerald, A. E., Kingsley, C. & D, U. S. (2014). *Máquinas Elétricas*. 7ª ed. Porto Alegre: McGraw Hill.
- Kawa, M. et al. (2016). Acoustic noise reduction of a high efficiency switched reluctance motor for hybrid electric vehicles with novel current waveform. Miami: 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). p. 1-6
- Krishnan, R. (2001). *Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications*. s.l.: CRC Press.
- Miller, T. (2001). *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*. Woburn: Newnes Power Engineering Series.
- Nassereddine, M., Rizk, J. and Nagrial, M. (2009). Conversion of a switched reluctance motor to operate as a generator for wind power applications. Bucharest: IEEE. pp. 1-5.
- Oliveira, V. S. (2013). Aplicação do método dos elementos finitos 3d na caracterização eletromagnética estática de motores de relutância variável com validação experimental. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará*. Fortaleza. pp.124.
- Reis, L. L. N. et al. (2007). Current Control of Switched Reluctance Motor Based on Generalized Minimum Variance Controller. Nova Iorque: IEEE. pp. 3541-3545.
- Silva, W. A. (2017). Controle da Máquina de Relutância Variável em Situações de Falta de Fase. *Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará*. Fortaleza. p. 97.
- Silva, W. A., Reis, L. L. N. d., Torricco, B. C. & Almeida, R. N. d. C. (2013). Speed control in switched reluctance motor based on generalized predictive control. Gramado: IEEE, pp. 903-908.
- Sobreira, F. B. (2008). Controle de Velocidade Aplicado a um sistema de acionamento com motor de relutância variável. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará*. pp. 108.
- Teixeira, V. S. d. C. (2008). Projeto de motores a relutância variável e ferramenta computacional para determinação das características estáticas da máquina. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará*. pp. 165.
- Zhu, J., Cheng, K. E., Xue, X. & Zou, Y. (2017). Design of a novel high-torque-density in-wheel switched reluctance motor for electric vehicles. Dublin: IEEE. pp. 1-2.