

Modelagem de fontes modulares de corrente do Sirius em Sistemas Descritores

Felipe de Paula Alves Benedicto* Gustavo da Silva Lima*
 Thiago Trindade Cardoso* Cleber Rodrigues**
 Gabriel Oehlmeyer Brunheira** Pedro Machado de Almeida*
 André Augusto Ferreira*

* Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, (e-mail: felipe.benedicto@engenharia.ufjf.br, silva.gustavo@engenharia.ufjf.br, thiago.trindade@engenharia.ufjf.br, pedro.machado@engenharia.ufjf.br, andre.ferreira@engenharia.ufjf.br).

** Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, Campinas, SP, (e-mail: cleber.rodriques@lnls.br, gabriel.brunheira@lnls.br).

Abstract: This paper presents a model of modular current sources used in Sirius, associated in series/parallel. The adopted model is based on descriptor systems theory and considers an association of N parallel modules. The mathematical model and the equivalent switched circuit are implemented, respectively, in the Matlab and PSIM software. The results obtained are satisfactory in relation to the model's precision.

Resumo: Este trabalho apresenta a modelagem de fontes modulares de corrente, associadas em série/paralelo, utilizadas no Sirius. O modelo proposto é baseado na teoria de sistemas descritores, e considera a associação de N módulos série-paralelo. O modelo matemático e o circuito chaveado equivalente são implementados, respectivamente, nos softwares Matlab e PSIM. Os resultados obtidos são satisfatórios em relação a precisão do modelo.

Keywords: Power Electronics; Descriptor Systems; Modeling; Control Systems; Sirius

Palavras-chaves: Eletrônica de Potência, Sistemas Descritores, Modelagem, Sistemas de Controle, Sirius

1. INTRODUÇÃO

Em Outubro de 2018, na cidade de Campinas, Brasil, foi inaugurada a primeira etapa do projeto Sirius. Desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), no campus do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), o Sirius - A Nova Fonte de Luz Síncrotron Brasileira - é hoje o maior empreendimento científico brasileiro e visa garantir avanços em diversas áreas, como física de materiais, química, biofísica, cristalografia, medicina, entre outras áreas (Wiedemann, 2015; Baader and Pomílio, 2014).

A luz síncrotron é a radiação eletromagnética de alto brilho proveniente da deflexão de um feixe de partículas carregadas, acelerado a velocidades próximas à da luz. O feixe de partículas é guiado, em sua trajetória, através de campos magnéticos produzidos por eletroímãs dispostos ao longo de três etapas, a saber: LINAC (do inglês *Linear Accelerator*), Booster e Anel de Armazenamento (LNLS, 2014).

A energização dos magnetos é realizada através de conversores estáticos operando como fontes de corrente. Os conversores ciclantes de alta potência, foco deste trabalho, operam sob requisitos de alta precisão e confiabilidade na entrega dos níveis de tensão e corrente (de Castro Lobato, 2016).



Figura 1. Fotografia do Sirius em Março de 2019 (Fonte: CNPEM)

Visando o desenvolvimento e aplicação de estratégias de controle adequadas, a etapa de obtenção de modelos que descrevam satisfatoriamente o sistema constitui-se extremamente relevante no processo de comissionamento das fontes. Outros trabalhos têm se proposto ao desenvolvimento de modelos do sistema no espaço de estados, técnicas de identificação e modelagem clássica por função de transferência. (de Oliveira, 2018; da Silva Lima, 2019; Brunheira et al., 2013).

Este trabalho tem como objetivo a apresentação de uma nova alternativa à modelagem das fontes ciclantes que

alimentam os dipolos magnéticos do Booster através de equações algébrico-diferenciais (EAD). É considerado o modelo para associação série-paralelo de N módulos e verificado através de simulações computacionais a precisão do modelo em relação ao circuito chaveado.

Na seção 2 a topologia do conversor é apresentada, bem como suas particularidades. A seção 3 aborda a teoria de modelagem para sistemas descritores; na seção 4 os resultados de simulações são exibidos e, finalmente, as conclusões são apresentadas na seção 5.

2. TOPOLOGIA

O sistema de alimentação da carga magnética no Sirius é dividido em dois estágios como ilustrado na Figura 2. O estágio ou módulo de entrada é responsável pela conversão CA/CC e regula a tensão do barramento CC (de Castro Lobato, 2016).

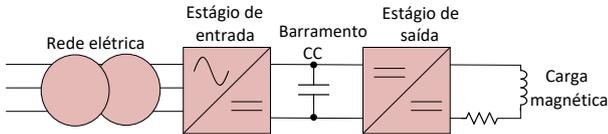


Figura 2. Topologia para alimentação da carga magnética.

O estágio ou módulo de saída é composto por um conversor ponte completa conectado a um filtro de terceira ordem, como detalhado na Figura 3. Nessa topologia o módulo de entrada é modelado como uma fonte de tensão constante V_{cc} e o principal objetivo do filtro passivo é a redução das componentes harmônicas de alta frequência resultantes da comutação desse conversor (Künzi, 2015).

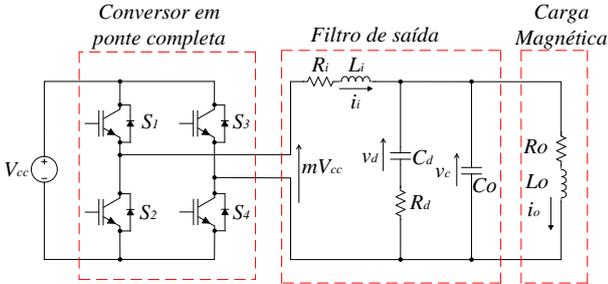


Figura 3. Topologia do módulo de saída.

A associação desses módulos em série e paralelo permite alimentar magnetos com elevadas tensões e correntes, tendo seus picos na ordem de 900 V e 1100 A. Nesse caso, é possível a utilização de interruptores com menor corrente de condução e frequência de comutação mais elevadas do que se fosse utilizado apenas um módulo (de Oliveira, 2018).

Para comutação do conversor em ponte completa o emprego da técnica de PWM unipolar (do inglês *Pulse Width Modulation*) em detrimento de PWM bipolar é vantajosa pelo fato de a componente de alta frequência resultante da comutação ser duas vezes superior a frequência de comutação. Assim, a ondulação da corrente no indutor L é quatro vezes menor em comparação com a comutação bipolar.

Assim, o filtro de saída pode ser dimensionado com menor indutância (de Castro Lobato, 2016).

Este trabalho apresenta a modelagem de N módulos em série-paralelo. A necessidade de uma modelagem precisa, deve-se a sua aplicação, onde o erro desejado é cerca de 100 partes por milhão (ppm) (Cardoso, 2019). Dessa forma, sistemas descritores são utilizados para realização do modelo e o erro entre a modelagem e o circuito chaveado é analisado.

3. MODELAGEM

A modelagem da associação série de fontes modulares de corrente aplicadas a magnetos de aceleradores de partículas foram feitas com sucesso utilizando espaço de estados e técnicas de identificação de sistemas (de Oliveira, 2018; da Silva Lima, 2019).

Não consta na literatura consultada a modelagem da conexão em paralelo das fontes de corrente, apenas o modelo da configuração das fontes associadas em série. Isso pode ser explicado pelo fato de que sistemas redundantes, geralmente, resultam na necessidade de inclusão de equações que não apresentam variáveis de estado e tampouco são equações diferenciais, o que gera dificuldade na realização da modelagem no espaço de estados (de Oliveira, 2018).

A associação em paralelo de módulos de saída das fontes modulares de corrente do Booster é um exemplo de sistema redundante, uma vez que a tensão na carga pode ser expressa como a tensão de saída do primeiro ou segundo conversores.

Essa seção tem como objetivo introduzir a teoria sobre sistemas descritores, bem como apresentar a modelagem de dois módulos de saída em paralelo, de 4 módulos de saída em série-paralelo e da generalização dos módulos de saída em série-paralelo para N módulos.

3.1 Sistemas Descritores

Sistemas descritores (também chamados de sistemas singulares, ou ainda, sistemas generalizados) são tidos como sistemas aumentados em relação ao espaço de estados, porque, além de utilizarem-se de equações diferenciais para modelagem de sistemas físicos, também utilizam-se de equações algébricas (Scholz, 2015). As equações algébricas servem como suporte na modelagem dos sistemas e suas variáveis são tidas como variáveis auxiliares.

Os sistemas descritores aparecem com frequência na representação de sistemas físicos como: sistemas elétricos de potência, sistemas de controle, engenharia aeroespacial, projeto de reatores nucleares, análise de redes, sistemas econômicos, dentre outros (de Mendonça, 1998). Por fim, a equação dinâmica que o representa é a seguinte:

$$\begin{cases} \mathbf{E}\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D} \end{cases} \quad (1)$$

na qual $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$, $u \in \mathbf{R}^m$ e $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^p$ representam, respectivamente, os vetores de estado, de entrada de controle e de saída do sistema; tem-se também $\mathbf{E} \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n \times m}$, $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{p \times n}$ e $\mathbf{D} \in \mathbf{R}^{1 \times m}$ (de Mendonça, 1998).

3.3 Modelo Dinâmico de 4 Módulos de Saída em Série-paralelo

A associação série-paralelo de módulos de saída nas fontes de corrente do Booster, além de permitir a divisão da corrente fornecida às cargas pelos módulos, permite, também, a divisão da tensão de operação dos módulos, ou seja, essa associação permite a divisão da potência necessária a ser fornecida para a carga magnética.

O objetivo principal da modelagem da associação série-paralelo dos módulos, ou conversor série-paralelo, é comparar sua modelagem com a realizada para o conversor paralelo e encontrar padrões que permitam descrever a modelagem de uma estrutura em que N módulos de saída sejam associados em série-paralelo para alimentar uma carga magnética, o que resultaria na facilitação da modelagem da planta em operação no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron.

Assim, por sua simplicidade, escolheu-se o conversor série-paralelo com 4 módulos de saída, como mostra a Figura 5.

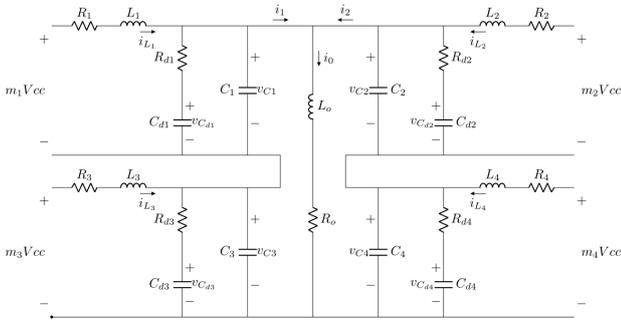


Figura 5. Associação em série-paralelo de 4 módulos de saída

Novamente, certificou-se de encontrar equações algébricas que auxiliassem na modelagem do sistema.

$$0 = i_1 + i_2 - i_o \quad (12)$$

$$0 = v_{C1} + v_{C3} - v_{C2} - v_{C4} \quad (13)$$

Com isso, aplicadas as leis de Kirchhoff, encontrou-se as seguintes equações diferenciais:

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = m_1 V_{cc} - R_1 i_{L1} - v_{C1} \quad (14)$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = m_2 V_{cc} - R_2 i_{L2} - v_{C2} \quad (15)$$

$$L_3 \frac{di_{L3}}{dt} = m_3 V_{cc} - R_3 i_{L3} - v_{C3} \quad (16)$$

$$L_4 \frac{di_{L4}}{dt} = m_4 V_{cc} - R_4 i_{L4} - v_{C4} \quad (17)$$

$$C_{d1} \frac{dv_{C_{d1}}}{dt} = \frac{V_{C1}}{R_{d1}} - \frac{v_{C_{d1}}}{R_{d1}} \quad (18)$$

$$C_{d2} \frac{dv_{C_{d2}}}{dt} = \frac{V_{C2}}{R_{d2}} - \frac{v_{C_{d2}}}{R_{d2}} \quad (19)$$

$$C_{d3} \frac{dv_{C_{d3}}}{dt} = \frac{V_{C3}}{R_{d3}} - \frac{v_{C_{d3}}}{R_{d3}} \quad (20)$$

$$C_{d4} \frac{dv_{C_{d4}}}{dt} = \frac{V_{C4}}{R_{d4}} - \frac{v_{C_{d4}}}{R_{d4}} \quad (21)$$

$$C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} = i_{L1} - i_1 - \frac{V_{C1}}{R_{d1}} + \frac{v_{C_{d1}}}{R_{d1}} \quad (22)$$

$$C_2 \frac{dv_{C2}}{dt} = i_{L2} - i_2 - \frac{V_{C2}}{R_{d2}} + \frac{v_{C_{d2}}}{R_{d2}} \quad (23)$$

$$C_3 \frac{dv_{C3}}{dt} = i_{L3} - i_1 - \frac{V_{C3}}{R_{d3}} + \frac{v_{C_{d3}}}{R_{d3}} \quad (24)$$

$$C_4 \frac{dv_{C4}}{dt} = i_{L4} - i_2 - \frac{V_{C4}}{R_{d4}} + \frac{v_{C_{d4}}}{R_{d4}} \quad (25)$$

$$L_o \frac{di_o}{dt} = v_{C1} + v_{C3} - R_o i_o \quad (26)$$

Por fim, é bom salientar que as equações diferenciais e algébricas devem ser escritas na forma matricial para efeito de simulação, porém, como as matrizes possuem um grande número de variáveis e, assim, são muito grandes, elas não serão apresentadas no presente artigo, apenas suas equações.

3.4 Modelo Dinâmico de N Módulos de Saída em Série-paralelo

Buscando-se cumprir o objetivo de modelar a associação de módulos de saída em operação na fonte de corrente do Booster do LNLS, foi realizada uma comparação entre o modelo obtido para os módulos de saída associados em paralelo com o obtido para os módulos associados em série-paralelo.

Foi observado um padrão na modelagem dos dois sistemas, o que possibilitou a arquitetura de um modelo no qual há a associação de N módulos de saída em série-paralelo. Sendo assim, as equações do modelo encontram-se na sequência.

$$0 = i_1 + i_2 - i_o \quad (27)$$

$$0 = \sum_{i=1}^n v_{C_{(2i)}} - \sum_{i=1}^n v_{C_{(2i-1)}} \quad (28)$$

$$L_o \frac{di_o}{dt} = \sum_{i=1}^n v_{C_{(2i-1)}} - R_o i_o \quad (29)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = m_1 V_{cc} - R_1 i_{L1} - v_{C1} \\ \vdots \\ L_{(2n)} \frac{di_{L(2n)}}{dt} = m_{(2n)} V_{cc} - R_{(2n)} i_{L(2n)} - v_{C(2n)} \end{array} \right. \quad (30)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{d1} \frac{dv_{C_{d1}}}{dt} = \frac{v_{C1}}{R_{d1}} - \frac{v_{C_{d1}}}{R_{d1}} \\ \vdots \\ C_{d(2n)} \frac{dv_{C_{d(2n)}}}{dt} = \frac{v_{C(2n)}}{R_{d(2n)}} - \frac{v_{C_{d(2n)}}}{R_{d(2n)}} \end{array} \right. \quad (31)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} = i_{L1} - i_1 - \frac{v_{C1}}{R_{d1}} + \frac{v_{C_{d1}}}{R_{d1}} \\ C_2 \frac{dv_{C2}}{dt} = i_{L2} - i_2 - \frac{v_{C2}}{R_{d2}} + \frac{v_{C_{d2}}}{R_{d2}} \\ \vdots \\ C_{(2n-1)} \frac{dv_{C(2n-1)}}{dt} = i_{L(2n-1)} - i_1 - \frac{v_{C(2n-1)}}{R_{d(2n-1)}} + \frac{v_{C_{d(2n-1)}}}{R_{d(2n-1)}} \\ C_{(2n)} \frac{dv_{C(2n)}}{dt} = i_{L(2n)} - i_2 - \frac{v_{C(2n)}}{R_{d(2n)}} + \frac{v_{C_{d(2n)}}}{R_{d(2n)}} \end{array} \right. \quad (32)$$

A variável n tem como valor a divisão do número N de módulos de saída presentes no sistema dividido por dois. Além disso, os componentes presentes nos módulos de saída devem ser numerados de acordo com o modelo. Assim, os números presentes na indicação dos componentes dos módulos de saída à esquerda da carga magnética, devem ser ímpares, já os presentes nos módulos à direita da carga, devem ser pares.

Como forma de verificar o modelo e na tentativa de alcançar o objetivo do estudo, esse foi aplicado para modelagem dos módulos de saída da fonte de corrente do Booster do projeto Sirius, que pode ser visto na Figura 6. Como foi dito anteriormente, esse, possui 8 módulos de saída associados, o que resulta no valor de 4 para n .

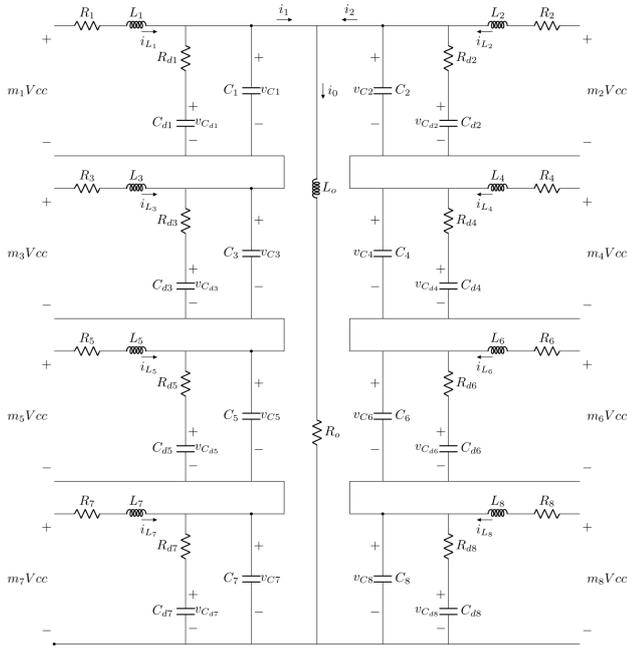


Figura 6. Associação em série-paralelo de 8 módulos de saída

4. RESULTADOS

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos da aplicação dos conceitos abordados neste artigo. Para verificação do modelo proposto, foram comparados o modelo matemático, em ambiente MATLAB, com o sistema simulado no PSIM.

Para validação, tanto o modelo matemático no MATLAB, quanto o simulado, no PSIM, foram submetidos, num primeiro e segundo teste, a um degrau unitário e um degrau de 0,2 a 0,8, respectivamente, no índice de modulação.

O modelo simulado no PSIM segue a topologia do módulo de saída ilustrado na Figura 3, no qual, a tensão na entrada do módulo é obtida por meio do chaveamento do conversor ponte completa. A simulação foi realizada com um passo de 10^{-7} segundos.

Os parâmetros utilizados na validação, são exibidos na tabela 1, que também apresenta a frequência de comutação F_c utilizada no conversor em ponte completa. Assim,

segundo-se o modelo obtido para associação de N módulos de saída em série-paralelo, que também pode ser usado para a associação em paralelo, utilizou-se para 2 módulos de saída em paralelo, $n = \{1, 2\}$. Para 4 módulos de saída em série-paralelo, $n = \{1, 2, 3, 4\}$; e para 8 módulos de saída em série-paralelo, $n = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$.

$R_n(\Omega)$	L_n (mH)	$C_{dn}(\mu F)$	$R_{dn}(\Omega)$	$C_n(\mu F)$
0,026	94	23,5	3,6	2,8
V_{cc} (V)	R_o (Ω)	L_o (mH)	F_c (kHz)	
10	0,274	21,3	10	

Tabela 1. Parâmetros do Estágio de Saída

4.1 2 Módulos de Saída em Paralelo

O modelo proposto para sistema com dois módulos de saída conectados em paralelo, quando submetido a um degrau unitário, comportou-se de forma satisfatória, apresentando um erro absoluto máximo de 40,36 ppm (partes por milhão) e um erro absoluto médio de 25,53 ppm.

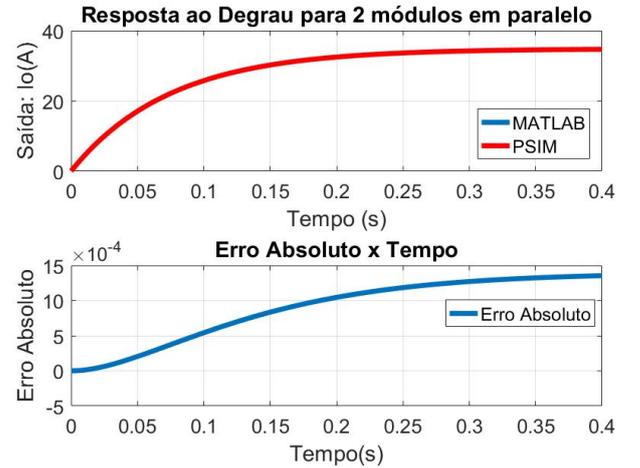


Figura 7. Resposta ao degrau unitário e erro absoluto para o modelo e simulação com dois módulos em paralelo

Quando submetido a uma variação do índice de modulação de $m = 0,2$ a $m = 0,8$, o modelo apresentou um erro absoluto máximo de 40,3 ppm e erro absoluto médio de 13,98 ppm. O resultado do teste é exibido na figura abaixo:

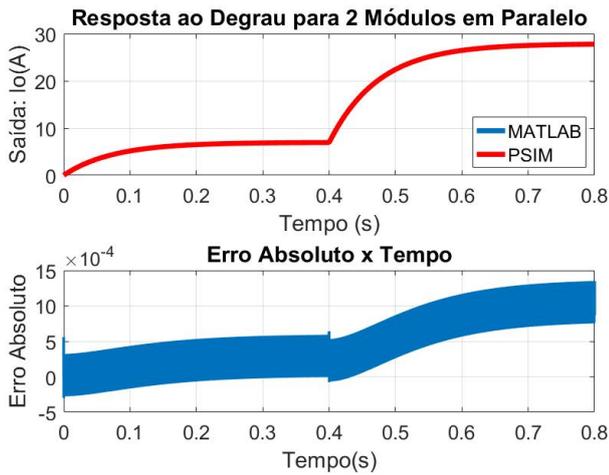


Figura 8. Resposta ao degrau de 0,2 a 0,8 e erro absoluto para o modelo e simulação com dois módulos em paralelo

4.2 4 Módulos de Saída em Série-paralelo

Da mesma forma, o modelo proposto para sistema com 4 módulos de saída conectados em série-paralelo, quando submetido a um degrau unitário, apresentou um erro absoluto máximo de 73,5 ppm e erro absoluto médio de 36 ppm.

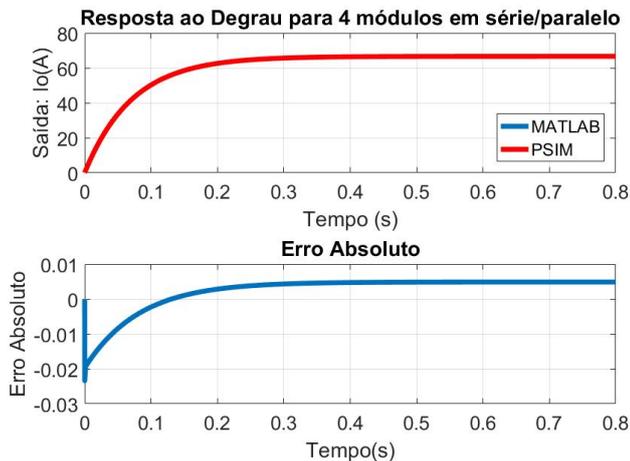


Figura 9. Resposta ao degrau unitário e erro absoluto para o modelo e simulação com quatro módulos série/paralelo

Quando submetido a um degrau de $m = 0,2$ a $m = 0,8$ o modelo apresentou erro absoluto máximo da ordem de 65,5 ppm e erro absoluto médio de 6,59 ppm. O resultado do teste é exibido na figura abaixo:

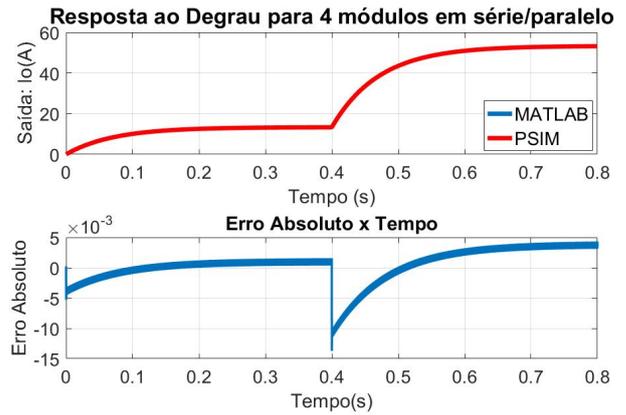


Figura 10. Resposta ao degrau de 0,2 a 0,8 e erro absoluto para o modelo e simulação para quatro módulos série/paralelo

4.3 8 Módulos de Saída em Série-paralelo

Por fim, o modelo proposto para sistema com 8 módulos de saída conectados em série-paralelo, quando submetido a um degrau unitário, apresentou um erro absoluto máximo de 132,07 ppm e erro absoluto médio de 102,72 ppm

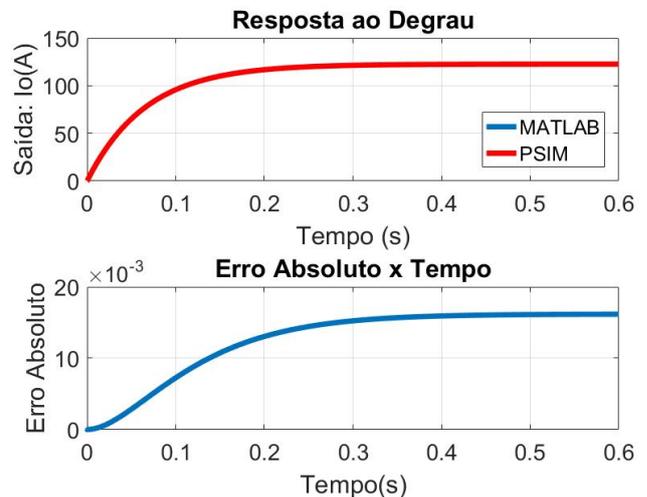


Figura 11. Resposta ao degrau unitário e erro absoluto para o modelo e simulação com 8 módulos em série/paralelo

Para uma variação entre $m = 0,2$ e $m = 0,8$ do tipo degrau no índice de modulação, o modelo para 8 módulos apresentou erro absoluto máximo de 111,69 ppm e erro absoluto médio de 55,9 ppm. O teste é exibido na figura abaixo:

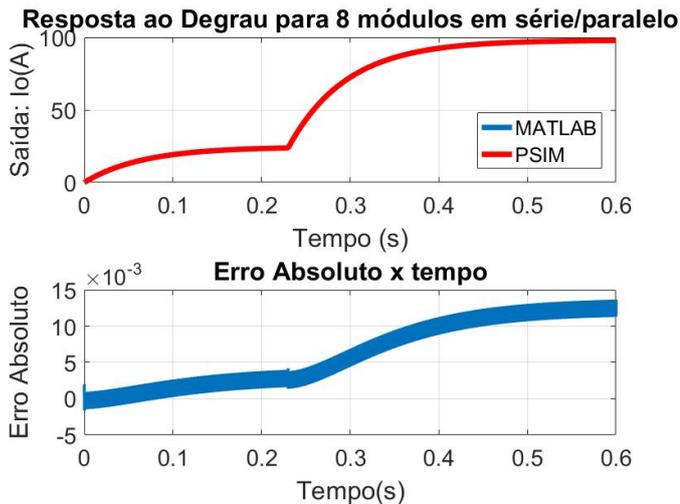


Figura 12. Resposta ao degrau de 0,2 a 0,8 e erro absoluto para o modelo e simulação com 8 módulos em série/paralelo

5. CONCLUSÃO

A modelagem do sistema de conversores modulares através das equações algébrico-diferenciais, também chamado de sistemas descritores, mostrou-se extremamente útil à representação do sistema, em variadas configurações. Ademais, a modelagem por sistemas descritores avança a compreensão do sistema a medida em que permite a obtenção de um modelo paralelo sem a necessidade de pressuposições acerca do sistema, como ocorre, por exemplo, no modelo em espaço de estados, em que deve-se considerar uma mesma tensão de saída dos conversores para tornar possível a modelagem.

Por fim, os modelos para as configurações de dois módulos em paralelo e quatro módulos em série/paralelo apresentaram, respectivamente, erro máximo em margens desejáveis, menores que 100 ppm, enquanto o modelo para a associação de 8 módulos em série/paralelo ultrapassou a margem dos 100 ppm para o erro máximo.

Observa-se também uma relação entre o aumento dos erros, máximo e médio, proporcional ao incremento de módulos no sistema. Este efeito pode estar relacionado ao aumento de elementos não lineares no sistema.

Como trabalhos futuros, pretende-se investigar a relação entre erro e número de módulos, bem como desenvolver uma estratégia de controle baseada na teoria de sistemas descritores para controle da corrente dos módulos de saída.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Juiz de Fora, à FAPEMIG, à BIC/UFJF e TP/UFJF, e ao CNPEM pelo suporte a este trabalho.

REFERÊNCIAS

Baader, J. and Pomílio, J. (2014). Técnica de bobina girante para caracterização dos magnetos do laboratório nacional de luz síncrotron. In *MOMAG 2014: 16º*

SBMO-Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 11º CBMag-Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 1024–1029.

Brunheira, G.O., Bonaldo, J.P., da Rosa, J.N.H., Rodrigues, C., and Pomílio, J.A. (2013). Digital control system for high precision power supplies of the new brazilian synchrotron source. In *2013 Brazilian Power Electronics Conference*, 326–331. IEEE.

Cardoso, T.T. (2019). *Estratégia de Controle Moderno e Discreto Aplicado a um Protótipo de Fonte Modular de Corrente do Sirius*. Master's thesis, Universidade Federal de Juiz de Fora - Juiz de Fora - MG.

da Silva Lima, G. (2019). Técnicas de identificação de sistemas aplicadas às fontes corretoras de baixa potência do Sirius. Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica), UFJF (Universidade da de Juiz de Fora), Juiz de Fora, Brasil.

de Castro Lobato, S. (2016). *Fonte de Corrente para Aplicação em Magnetos de Aceleradores de Partículas*. Master's thesis, Universidade Federal de Juiz de Fora - Juiz de Fora - MG.

de Mendonça, R.A.M. (1998). *Estabilização em Duas Etapas de Sistemas Descritores*. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis - SC.

de Oliveira, F.H., Aquino, E.P., Rodrigues, C., Oliveira, J.G., Montagner, V.F., de Almeida, P.M., and Ferreira, A.A. (2017). Current source converter model and control for a particle accelerator quadrupole magnet. In *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, 1–6. IEEE.

de Oliveira, F.H. (2018). *Controle Discreto de fonte modular de Corrente aplica a Magnetos de Aceleradores de Partículas*. Master's thesis, Universidade Federal de Juiz de Fora - Juiz de Fora - Brasil.

Künzi, R. (2015). Passive power filters. In *Proceedings, CAS - CERN Accelerator School: Power Converters: Baden, Switzerland, May 7-14, 2014*, 265–289. doi:10.5170/CERN-2015-003.265.

LNLS (2014). Projeto sirius, a nova fonte de luz síncrotron brasileira.

Mohan, N., Undeland, T.M., and Robbins, W.P. (2003). *Power electronics: converters, applications, and design*. John Wiley & sons.

Scholz, L. (2015). Control theory of descriptor systems lecture notes. *TU Berlin (WS2014/15)*.

Tanaka, K., Ohtake, H., and Wang, H.O. (2007). A descriptor system approach to fuzzy control system design via fuzzy lyapunov functions. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 15(3), 333–341.

Wiedemann, H. (2015). *Particle accelerator physics*. Springer.