

COMPARAÇÃO DE FERRAMENTAS OPEN SOURCE PARA SIMULAÇÃO DE CONVERSORES E ALGORITMOS DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

João Pedro Basilio Dinareli¹ (IC), Wilson Cesar Sant'Ana (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Eletrônica de Potência. Conversores Multiníveis. Modulação PWM. Open Source. Simulação Computacional.

Introdução

A simulação computacional é uma ferramenta importantíssima, tanto no ensino quanto na pesquisa e desenvolvimento. Através de simulação, é possível o teste de topologias, mudanças em estratégias de controle, verificação de sensibilidade à variação de valores de componentes e etc (Maithil et al., 2013) - além de ser uma excelente ferramenta para a busca de respostas para perguntas do tipo “e se...” (Patil et al., 2022). Tudo isso com a vantagem de se poder realizar todos esses testes de cenários sem o risco de prejuízos financeiros por danos ou acidentes com os operadores dos equipamentos.

Um dos softwares de simulação mais completos é o Matlab. Esse software possui uma infinidade de bibliotecas (ou toolboxes) para as mais diversas áreas do conhecimento (por exemplo, farmácia, economia, etc - e, obviamente, as engenharias). A interface do Matlab, em si, é um prompt de comando (onde se executam funções e scripts para diversas finalidades) - mas ele também apresenta um simulador gráfico, próprio para a execução de sistemas dinâmicos através de diagramas em blocos (chamado Simulink). Embora o Matlab/Simulink seja considerado padrão, tanto na indústria quanto na academia, o custo de suas licenças de utilização são proibitivas, principalmente para empresas de pequeno e médio porte (que não possuem recursos suficientes para a aquisição de uma licença comercial e nem possuem permissão legal para a utilização das chamadas “versões de estudantes”).

Este trabalho se insere no contexto de simulação de conversores eletrônicos de potência, como os utilizados em equipamentos de energias renováveis, acionamentos de motores, fontes de alimentação e etc. Nesse contexto específico, um outro software comercial muito utilizado é o PSIM - mas também vão existir as mesmas limitações em relação às licenças de uso, tal qual com o Matlab/Simulink.

Dadas essas limitações, têm-se buscado (mundialmente) alternativas Open Source aos softwares comerciais. Uma espécie de clone do prompt de comandos do Matlab é o Octave - que, por utilizar a mesma sintaxe do Matlab, possibilita a execução de muitos scripts originalmente escritos para o Matlab. Outra alternativa ao prompt de comandos do Matlab é o Python. O Python é um ambiente riquíssimo em termos de possibilidades e com uma base de usuários cada vez maior. Entretanto, tanto Octave quanto Python permitem apenas a execução de simulações sob formato de script, onde os sistemas físicos são modelados em termos de equações diferenciais e executados sequencialmente.

Em Amaral e Cardoso (2022) se apresenta um procedimento genérico para simulação de conversores em Python (na verdade, o mesmo procedimento também poderia ser aplicado ao Octave). Primeiramente, os dispositivos ou conversores precisam ser modelados em seus dois estados de operação (condução e corte) e esse modelo precisa ser discretizado. Em seguida, as equações discretizadas são organizadas em estruturas de decisões e o sistema pode ser simulado em malha fechada. A grande desvantagem desse procedimento é não permitir a simulação direta de circuitos ou de diagrama em blocos - tal qual realizada no Simulink ou no PSIM. Existe uma biblioteca para Python (chamada Python Power Electronics) que já possui os modelos de diversos dispositivos - mas também apresenta o problema da dificuldade no desenho dos circuitos. Nessa biblioteca, os circuitos precisam ser desenhados sob forma de planilha, o que ainda está muito distante do Simulink.

Os conversores de eletrônica de potência são compostos por chaves controladas. Tanto o Simulink quanto o PSIM, podem realizar simulações considerando essas chaves como ideais ou inserir limitações próprias dos componentes reais (IGBTs, MOSFETs, etc.). Um simulador muito utilizado na eletrônica em geral é o SPICE. Normalmente, os

fabricantes de componentes fornecem modelos SPICE desses componentes. Entretanto, simuladores SPICE são mais apropriados para simulação elétrica dos componentes, sendo necessárias adaptações para inserir algoritmos de controle (em malha aberta ou fechada).

Uma outra alternativa Open Source ao Matlab é o Scilab. O Scilab também apresenta um prompt de comandos, mas sua grande vantagem é que ele também apresenta um simulador gráfico para sistemas dinâmicos (chamado Xcos). Em versões anteriores, ele permitia apenas a simulação por diagramas em blocos. Em um dado momento, o Xcos passou a integrar modelos do Open Modelica e, com isso, já é possível a simulação de conversores eletrônicos e sistemas de potência de forma muito parecida com o Matlab/Simulink.

Este trabalho teve como objetivo realizar uma comparação entre as alternativas apresentadas anteriormente. Tabelas resumo foram apresentadas para consulta.

Metodologia

Inicialmente, o discente realizou um levantamento sobre as alternativas disponíveis (Scilab, Octave, Python e SPICE). Em seguida as respectivas documentações foram estudadas.

Antes do início dos trabalhos, os autores haviam tomado algumas premissas iniciais, dentre essas havia o palpite de que as alternativas baseadas em Python iriam ser “o melhor caminho”, dada a vasta gama de bibliotecas e base de usuários dessa linguagem. Após a leitura do artigo Amaral e Cardoso (2022), que utilizava Python para simular um conversor DC-DC do tipo buck em malha fechada, todo o procedimento (incluindo a modelagem do conversor) foi replicado com sucesso. Entretanto, se percebeu que a falta de uma interface gráfica iria dificultar o objetivo final que é a obtenção de uma ferramenta similar ao Matlab/Simulink. Uma segunda tentativa com Python foi feita com a biblioteca “Python Power Electronics”. A biblioteca Python Power Electronics, embora já trouxesse diversos componentes já modelados, utiliza uma planilha para o desenho do circuito a ser simulado - o que não melhora o problema da falta de similaridade com o Simulink.

Dessa forma, alternativas que não tivessem uma interface gráfica (que permitissem a simulação direta de circuitos ou de diagramas em blocos) foram descartadas, dado que não apresentam a mesma facilidade para o usuário do que o Simulink.

Em seguida, o discente começou a trabalhar no Scilab, que conta com o ambiente gráfico Xcos. O Xcos sempre foi conhecido como uma alternativa ao simulink

na simulação de sistemas dinâmicos representados por diagramas em blocos (onde é possível simular blocos de funções de transferências e as relações entre esses blocos). Foram feitos testes para modulação PWM (um sinal modulante que é comparado com uma portadora triangular e como resultado, têm-se um sinal cuja largura do pulso de saída é proporcional à amplitude do sinal modulante). Esse modulador mais básico foi reaproveitado na modulação PWM para ponte H bipolar e na ponte H unipolar. Em seguida, o modulador unipolar foi repetido 3 vezes (com variação nas defasagens das portadoras triangulares), de forma a se obter os pulsos para um conversor multinível do tipo cascata de pontes H.

Devido à integração do Xcos com o Open Modelica, também foi possível simular elementos de circuitos elétricos (como resistores, indutores e capacitores). Um dispositivo muito importante nos conversores eletrônicos é a chave controlada, que conduz ou bloqueia uma corrente, dependendo de seu controle. Esse tipo de elemento pôde ser simulado com uma chave ideal. Dessa forma, o conversor em ponte H pôde ser simulado tanto com o PWM bipolar (gerando uma saída entre +V e -V) quanto com o PWM unipolar (gerando uma saída entre +V e 0V e entre 0V e -V).

Em seguida, o discente repetiu as mesmas simulações (PWMs e conversores) no software ngspice. O procedimento com o ngspice não foi tão similar ao Matlab/Simulink quanto com o Scilab/Xcos: foi preciso desenhar o esquemático no kicad, gerar uma netlist e simular no ngspice. Entretanto, o resultado surpreendente foi que as simulações foram muito mais rápidas do que no Scilab, conforme será mostrado na seção de “Resultados e Discussões”.

Já no fim dos trabalhos, os autores tomaram conhecimento de algumas outras ferramentas (desenvolvidas em universidades) que podem ser de interesse. Um delas é o GeckoCIRCUITS, desenvolvido na ETH Zurich e apresentado em Müsing e Kolar (2014). Essa ferramenta parece ser mais voltada ao ensino, sendo que foi dado um enfoque em animações sobre o comportamento de certas grandezas do circuito (por exemplo, indicação do sentido das correntes). Outra ferramenta foi o GSEIM (General-purpose Simulator with Explicit and Implicit Methods), desenvolvida no IIT Bombay e apresentada em Nandan e Patil (2022). O GSEIM, ao que parece, é uma alternativa promissora, bem nos moldes do Simulink e do PSIM - entretanto não foi analisada nesse trabalho (ficando como sugestão para trabalhos futuros).

Resultados e discussão

Uma primeira comparação entre os simuladores (de acordo com a similaridade com o Matlab/Simulink) é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação entre as alternativas Open Source no quesito similaridade com o Matlab/Simulink.

	prompt Matlab	Simulink
Octave	mu ita	nen huma
Python	intermedi ária	nen huma
Scilab/Xcos	intermedi ária	mu ita
kicad/ngspice	pouca ^{*1}	pouca ^{*2}

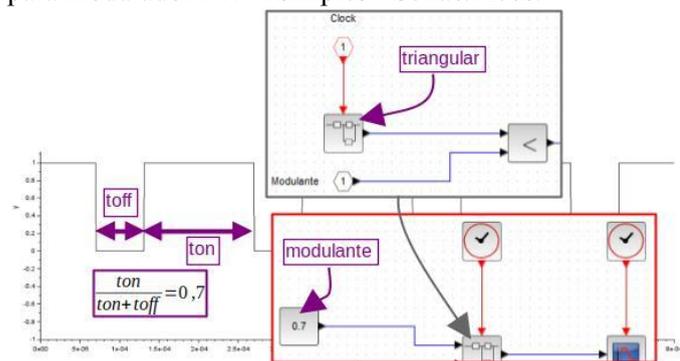
obs *1: o ngspice apresenta um prompt onde se pode lançar comandos e executar scripts (mas a similaridade com a sintaxe do Matlab é baixa);

obs *2: o kicad permite desenhar os circuitos esquemáticos (apenas existe o inconveniente de se ter de gerar uma netlist antes da simulação no ngspice).

Dado que os procedimentos de simulação no Octave e no Python não apresentam similaridade alguma com o Simulink (que foi benchmark), estas opções foram excluídas do restante dos testes.

A Figura 1 apresenta os resultados do modulador PWM simples. Observa-se a comparação entre o sinal modulante (nesse exemplo, uma constante de valor 0,7) e a portadora triangular (implementada dentro do superbloco cinza).

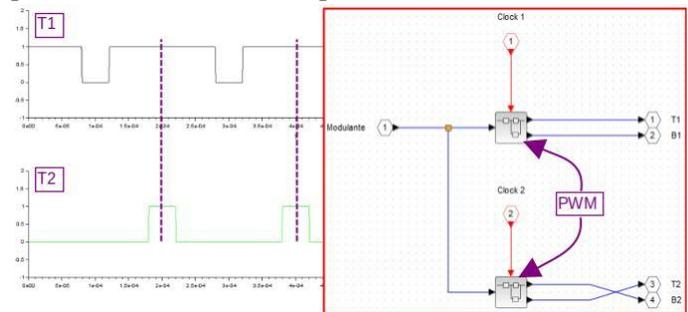
Figura 1 – Diagrama de simulação e resultado obtido para modulador PWM simples - Scilab/Xcos.



A Figura 2 apresenta os resultados do modulador PWM unipolar. Cada um dos blocos cinza é uma repetição do modulador simples. A figura não mostra, mas no segundo modulador existe uma defasagem interna de 180° na portadora triangular. Notar, também, o cruzamento dos pulsos da segunda “perna” do conversor.

Figura 2 – Diagrama de simulação e resultado obtido

para modulador PWM unipolar - Scilab/Xcos.



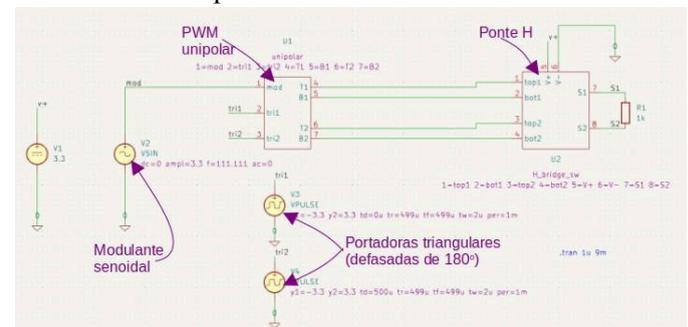
A Figura 3 apresenta os resultados da saída do conversor ponte H com modulador PWM unipolar. Observa-se que as saídas variam de +V a 0V no semiciclo positivo de 0V a -V no semiciclo negativo.

Figura 3 – Diagrama de simulação e resultado obtido para conversor ponte H com PWM unipolar - Scilab/Xcos.



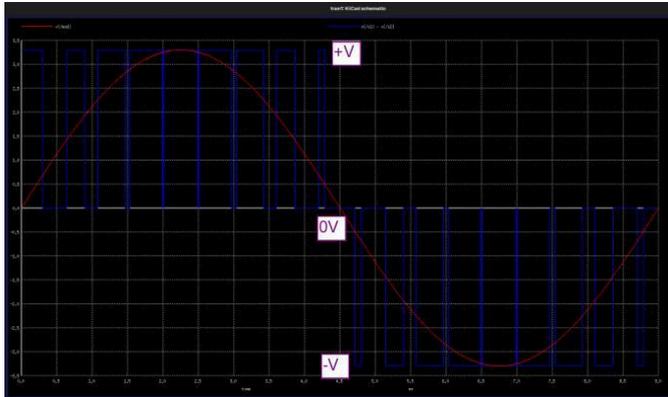
Até o momento, foram apresentados os resultados obtidos no Scilab/Xcos. As mesmas simulações foram repetidas no ngspice. A Figura 4 apresenta o diagrama de simulação da ponte H com modulação unipolar, desenhada no software kicad (esse passo é necessário para a geração de um arquivo netlist).

Figura 4 – Diagrama de simulação para conversor ponte H com PWM unipolar - kicad.



Com base na netlist gerada pelo kicad, a Figura 5 apresenta os resultados da saída do conversor ponte H com modulador PWM unipolar obtidos no ngspice. Observa-se o mesmo resultado obtido no Scilab/Xcos (Figura 3).

Figura 5 – Saída do conversor ponte H com PWM unipolar - ngspice



Os dois simuladores apresentaram os mesmos resultados. Mas, a primeira conclusão é que o uso do Scilab/Xcos é nitidamente mais parecido com Matlab/Simulink.

Em seguida foi investigado o tempo de execução do mesmo diagrama nos dois softwares. As Figuras 3 e 5 apresentam apenas 1 ciclo de fundamental em 100Hz (ou seja 10ms). Este tempo de simulação foi aumentado e o tempo de execução em cada software foi cronometrado. Os resultados são apresentados na Tabela 2. Observa-se que o ngspice é muito mais rápido do que o Scilab/Xcos. Uma possível interpretação é que o Scilab precisa de recursos para suportar sua interface gráfica - enquanto que o ngspice apenas faz os cálculos e plota o resultado final.

Tabela 2 – Comparação entre as alternativas Open Source no quesito velocidade de simulação

	Scilab/Xcos	ngspice
100ms	0min 27,48s	0min 01,02s
250ms	1min 08,17s	0min 01,57s
500ms	2min 23,61s	0min 02,71s
1s	5min 35,68s	0min 04,95s

obs: ambos resultados foram obtidos em sistema operacional Linux, distribuição Zorin OS 17.2, em uma CPU AMD® Ryzen 3 3100 com SSD e 16GB de RAM.

Conclusões

Este trabalho documentou o aprendizado do discente de IC em ferramentas Open Source visando aplicações em eletrônica de potência. Foram avaliados: Octave, Python, Scilab e SPICE (em sua implementação ngspice). Observou-se que a ferramenta que apresentou maior similaridade com o Matlab/Simulink foi o

Scilab/Xcos e, em segundo lugar distante, o ngspice (com kicad).

Observou-se que o ngspice realizou as simulações com muito maior velocidade do que o Scilab/Xcos (o mesmo conversor com o mesmo PWM foi utilizado, entretanto particularidades como o tipo de solver não foram levadas em consideração).

Tem-se como sugestão para pesquisas futuras o desenvolvimento de uma interface para simulação de sistemas dinâmicos ao estilo Simulink para o Octave ou para o Python. Isso iria tornar essas ferramentas extremamente atrativas aos usuários do Matlab/Simulink ou do PSIM.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Itajubá e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

Referências

Amaral e Cardoso (2022) Amaral, A. M., & Cardoso, A. J. M. Using Python for the Simulation of a Closed-Loop PI Controller for a Buck Converter. *Signals*, 3(2), 313-325, 2022.

Maithil et al. (2013) Maithil, N., Agrawal, R., Bharadwai, S. K., & Kothari, D. P., Simulation tools for power electronics-an overview. *International Journal on Emerging Technologies*, 4(1), 104-107, 2013.

Müsing e Kolar (2014) Müsing, A., & Kolar, J. W. Successful online education-GeckoCIRCUITS as open-source simulation platform. In 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE ASIA) (pp. 821-828). IEEE, 2014.

Nandan e Patil (2022) Nandan, A., & Patil, M. B. . Comparison of GSEIM with Simulink with respect to simulation speed. In 2022 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES) (Vol. 1, pp. 129-134). IEEE, 2022.

Patil et al. (2022) Patil, M. B., Hari, V. V. S., Korgaonkar, R. D., & Appaiah, K., An open-source simulation package for power electronics education. arXiv preprint arXiv:2204.12924, 2022.