

## Projeto: Controle da corrente e tensão de um conversor *Boost* utilizando *hardware-in-the-loop*

### Resumo

Este roteiro aborda os itens a serem desenvolvidos no Projeto Final da disciplina SEL0328 - Laboratório de Controle de Sistemas. Os grupos que escolherem este projeto deverão desenvolver um controle em cascata de corrente e tensão de um conversor *Boost* utilizando uma simulação *hardware-in-the-loop*.

**Palavras-chave:** conversor *Boost*, controle de tensão e corrente, controle em cascata, modulação PWM, *hardware-in-the-loop*.

## 1 Introdução

A estratégia experimental *hardware-in-the-loop* (HIL) trata-se de um processo de emulação de performance de baixo custo frequentemente utilizada em sistemas onde testes não podem ser realizados com facilidade, capaz de capturar e respostas e dinâmicas do sistema sobre diferentes pontos de operação, sem a necessidade do acionamento do sistema físico real. Além de permitir a avaliação individual de algoritmos, componentes e *softwares* em lógica embarcada [1].

Com a finalidade de testar a eficácia do HIL em sistemas dinâmicos é considerado o uso de um conversor *boost* com perdas resistivas. O diagrama do circuito elétrico do conversor *boost* é apresentado na Figura 1.

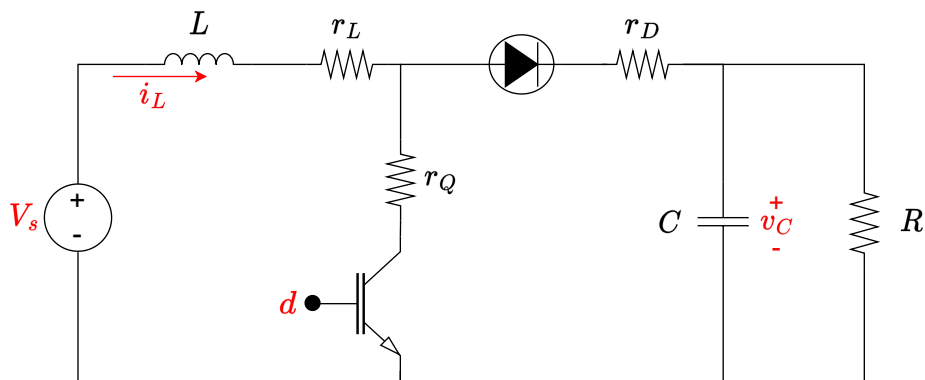


Figura 1: Diagrama elétrico do conversor CC-CC *Boost*.

onde  $L$  é a indutância,  $C$  a capacitância,  $V_s$  a tensão de entrada,  $R$  a resistência da carga,  $d$  a entrada PWM (pulse width modulation) e  $r_L$ ,  $r_D$  e  $r_Q$  as perdas resistivas no indutor, diodo e interruptor de potência respectivamente. A dinâmica do modelo do conversor *boost* é derivada dos circuitos correspondentes dos estados de interrupção alto ( $d = 1$ ) e baixo ( $d = 0$ ) [2].

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de uma estratégia de controle em cascata da da tensão e corrente de um conversor CC *Boost* através da técnica *hardware-in-the-loop*, apresentada durante o semestre. A tensão de saída do conversor  $v_C$  deve seguir uma referência pré-determinada.

A arquitetura a ser desenvolvida é apresentada na Figura 2, nessa topologia o controlador e o modelo são separados em dois microcontroladores distintos. O PC-Host é utilizado como uma IHM (interface homem-máquina) para observar a variável de controle  $d$  e as variáveis controlados  $i_L$  e  $v_C$ .

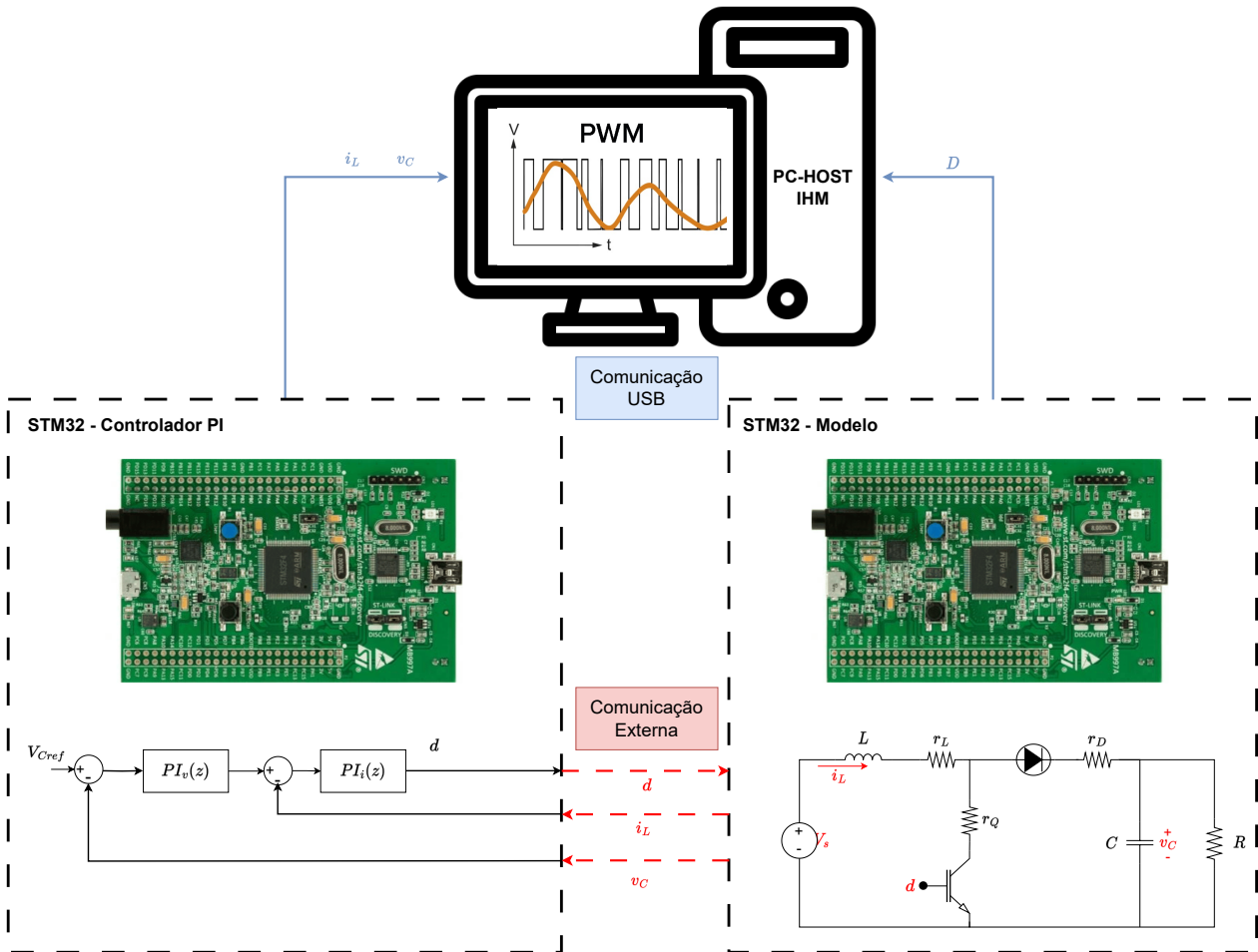


Figura 2: Arquitetura HIL

## 2 Requisitos do projeto

A seguir são apresentados alguns tópicos obrigatórios que devem ser desenvolvidos neste projeto, sendo que novos itens podem ser acrescentados. Para o desenvolvimento será necessário o uso do *software* MATLAB/SIMULINK.

- Obtenção do modelo de estados do conversor: aplicando as leis de *Kirchhoff* para os

circuitos do conversor com a chave aberta e fechada, obter a função e transferência que relaciona a tensão de saída com o *duty-cycle* aplicado à chave do conversor.

- Simulação do conversor em malha aberta: construir o circuito do conversor em SIMULINK. Plotar, em uma mesma figura, a resposta do circuito chaveado e do modelo desenvolvido no item anterior e analisar os resultados. Discutir a influência do valor da frequência de chaveamento escolhida para o PWM. Compare os resultados para frequências de chaveamento do modelo de 50 kHz, 100 kHz e 200 kHz para frequências de PWM de 10 kHz, 1 kHz e 100 KHz. Use os parâmetros da Tabela 2, frequência de chaveamento de 200 kHz e de 10 KHz para o PWM.

Variável	Descrição	Parâmetro
$V_S$	Tensão de entrada	100 V
$R$	Carga	10 $\Omega$
$C$	Capacitância	400 $\mu\text{F}$
$L$	Indutância	10 mH
$r_L$	Resistência do Indutor	0.1
$r_D$	Resistência do Diodo	0.1
$r_Q$	Resistência do interruptor	0.1

- Desenvolver um controle em cascata utilizando dois controladores PI's, um dedicado para a o controle de tensão  $v_C$  e outro para a corrente  $i_L$ . A partir da tensão inicial, nos instante  $t = 6\text{s}$ ,  $t = 8\text{s}$  e  $t = 10\text{s}$  aumentar em 50% o valor de referência em relação ao valor anterior. No instante  $t = 12\text{s}$ ,  $t = 14\text{s}$   $t = 16\text{s}$ , diminuir a referência em 25% em relação ao valor anterior. Comentar o processo de sintonia do controlador e os resultados da simulação
- Implementar o controlador desenvolvido e o modelo testado no microcontrolador STM32F07-Discovery. Explique o processo de pinagem e de parametrização do *clock* para a rotina de interrupção. Utilizar a rotina de interrupção apresentada na Figura 3.

*Dica: Utilizar o interface CubeIDE para programação C#.*

- Realizar uma análise comparativa entre os resultados do ensaio no simulink e do experimento HIL. Adotar o mesmo padrão de referência e de sintonia.
- Plotar os seguintes sinais: tensão de saída e sua referência, corrente do indutor e sua referência, erro e duty-cycle do sinal de controle.

*Dica: Utilizar o interface CubeMonitor para análise gráfica do HIL e para salvar os dados do HIL.*

### 3 Considerações Finais

As atividades serão desenvolvidas no decorrer do semestre, durante o qual os conceitos e teorias necessários serão apresentados em sala de aula. É necessário a constante busca por

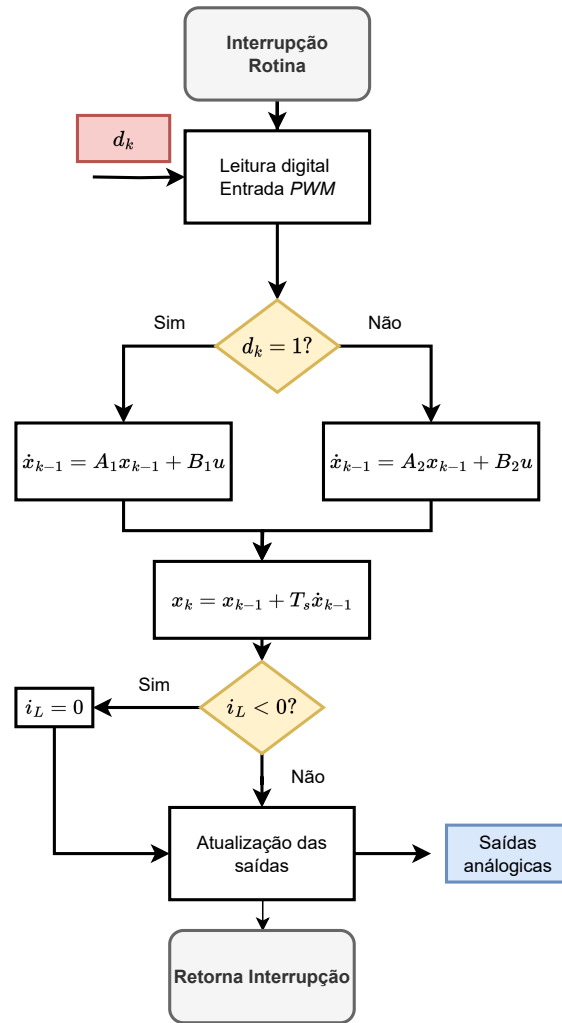


Figura 3: Rotina de interrupção. Adaptado de [2].

parte dos alunos na solução da simulação e ferramentas computacionais necessárias. Ao final do semestre, em data a ser definida, o projeto deverá ser apresentado para avaliação.

## Referências

- [1] J. A. Ledin, “Hardware-in-the-loop simulation,” *Embedded Systems Programming*, vol. 12, pp. 42–62, 1999.
- [2] D. S. Castro, R. F. Magossi, R. F. Bastos, V. A. Oliveira, and R. Q. Machado, “Low-cost hardware in the loop implementation of a boost converter,” in *2019 18th European Control Conference (ECC)*. IEEE, 2019, pp. 423–428.
- [3] S.-C. Tan, Y.-M. Lai, and C. K. Tse, “A unified approach to the design of pwm-based sliding-mode voltage controllers for basic dc-dc converters in continuous conduction mode,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 53, no. 8, pp. 1816–1827, 2006.

- [4] X. Dominguez, O. Camacho, P. Leica, and A. Rosales, “A fixed-frequency sliding-mode control in a cascade scheme for the half-bridge bidirectional dc-dc converter,” in *2016 IEEE Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*. IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [5] S.-C. Tan, Y. Lai, C. K. Tse, and M. K. Cheung, “A fixed-frequency pulsewidth modulation based quasi-sliding-mode controller for buck converters,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 6, pp. 1379–1392, 2005.