

SEGUNDO RELATÓRIO DE ATIVIDADES PROJETO

Adailton Braga Júnior (201421170), André Luis de Souza Freitas (201511222),
e Beatriz Cristina Reis Cordeiro (201421168)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA

Projeto - Inversor de tensão monofásico de baixa potência.

Orientador: Ciro José Egoavil Montero.

Curso: Engenharia Elétrica.

Disciplina: Sistema Microprocessados

Período de Atividades: Primeira quinzena de Setembro.

I. METAS DAS ATIVIDADES

Conforme o cronograma apresentado no pré-projeto e nas atividades futuras descritas no primeiro relatório de projeto, as metas deste período de atividades foram:

- **Estudo de topologias de inversores de tensão:** nesta etapa, os discentes farão o estudo teórico das diversas topologias dos inversores de tensão.
- **Estudos sobre chaveamento PWM:** nesta etapa, os discentes farão o estudo teórico sobre chaveamento utilizando modulação por largura de pulso (PWM).
- **Estudos gerais sobre conversores estáticos:** nesta etapa, os discentes farão estudos sobre conversores estáticos, principal foco de estudo da Eletrônica de Potência.
- **Simulação:** nesta etapa, os discentes irão simular o circuito elétrico do projeto através de softwares de simulação.
- **Programação:** nesta etapa, os discentes irão desenvolver a programação do microcontrolador.
- **Levantamento de materiais:** nesta etapa, os discentes farão o levantamento da lista dos materiais necessários para a execução do projeto, assim como seus respectivos custos.

II. METAS ALCANÇADAS E RESULTADOS

Durante a primeira quinzena do mês de Setembro, foram desenvolvidas algumas das atividades propostas para o mesmo período. Os estudos sobre as topologias de inversores de tensão e sobre chaveamento PWM foram concluídos já no período do primeiro relatório de projeto. Assim, foi dada continuidade apenas no estudo geral sobre os conversores estáticos. A parte das simulações foi realizada durante o período utilizando o *software Typhoon Hil*, uma plataforma

de simulação *hardware-in-the-loop*. A programação do microcontrolador e o levantamento dos materiais ainda não foram alcançadas. A seguir será exposto os resultados alcançados.

• ESTUDOS GERAIS SOBRE CONVERSORES ESTÁTICOS: CONVERSOR BOOST.

Os conversores *boost*, ou *step-up*, são utilizados para elevar tensão CC [1]. A tensão de saída V_{out} é sempre maior ou igual a tensão de entrada V_{in} . A figura 1 mostra o circuito típico deste tipo de conversor.

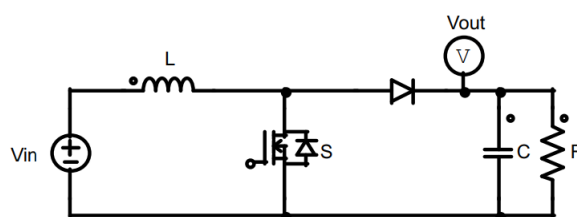


Figura 1: Boost Converter. Fonte: autor.

Este tipo de conversor possui dois modos básicos de operação, sendo eles o *Continuous Conduction Mode (CCM)* e o *Discontinuous Conduction Mode (DCM)*. Estes modos operam em frequência de chaveamento constante, e a tensão de ativação da chave entre as pernas *Gate-Source* para chave tipo MOSFET ou *Gate-Emitter* para chave tipo IGBT possui a característica mostrada na figura 2.

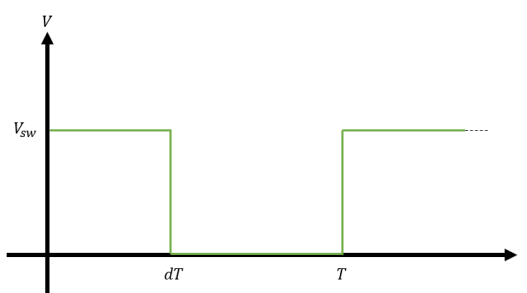


Figura 2: Tensão de ativação da chave - tensão de chaveamento V_{sw} . Fonte: autor.

Na figura 2, o período T é o inverso da frequência de chaveamento e o d é referente ao *duty*

cycle. A chave permanece conduzindo no intervalo $0 \leq t \leq dT$ e para de conduzir em $dT \leq t \leq T$.

Continuous Conduction Mode (CCM): A análise deste modo de operação possui duas etapas.

- ETAPA 1: $0 \leq t \leq dT$

Nesta etapa, a chave está conduzindo. Assim, dada uma tensão de entrada V_{in} , tensão de saída V_{out} , período T e duty cycle d , a equação diferencial do circuito equivalente mostrado em 3 será dado por 1.

$$V_{in} = L \frac{di_L}{dt} \quad (1)$$

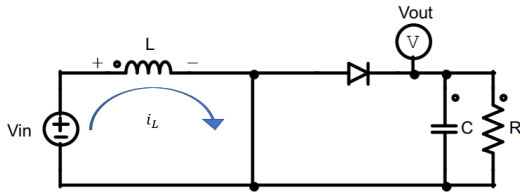


Figura 3: Circuito equivalente para o período $0 \leq t \leq dT$. Fonte: autor.

A solução da equação 1 é dada por:

$$i_L(t) = i_L(0) + \frac{V_{in}}{L}(t) \quad (2)$$

Para $t = 0$, a corrente $i_L(t)$ do indutor atinge seu valor mínimo I_{Lmin} , enquanto que no tempo $t = dT$ atinge seu valor máximo I_{Lmax} . Assim, temos que:

$$I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{V_{in}}{L}dT \quad (3)$$

Ainda, a tensão em cima da chave durante este período é zero, assim como a corrente no diodo.

- ETAPA 2: $dT \leq t \leq T$

Nesta etapa, a chave não está conduzindo. Assim, o diodo fica diretamente polarizado e começa a conduzir. O circuito equivalente é mostrado na figura 4. A equação que descreve o circuito é dado por 4.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} \quad (4)$$

A solução da equação 4 é dada por:

$$i_L(t) = i_L(dT) + \frac{V_{in} - V_{out}}{L}(t - dT) \quad (5)$$

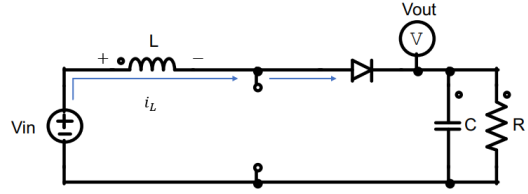


Figura 4: Circuito equivalente para o período $dT \leq t \leq T$. Fonte: autor.

Para $t = dT$, a corrente no indutor atinge seu valor máximo I_{Lmax} e para $t = T$, atinge novamente seu valor mínimo I_{Lmin} . Assim, temos que:

$$I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{V_{in} - V_{out}}{L}(1 - d)T \quad (6)$$

Igualando as equações 3 e 8, achamos a seguinte relação (válida somente para o modo CCM em regime permanente):

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 - d} \quad (7)$$

Para um caso em que não haja perdas - potência de saída é igual a de entrada -, então a relação entre a corrente média de saída I_{out} com a corrente média de entrada I_{in} é dada por:

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = (1 - d) \quad (8)$$

A figura 5 mostra o comportamento da corrente do indutor no modo CCM em um ciclo.

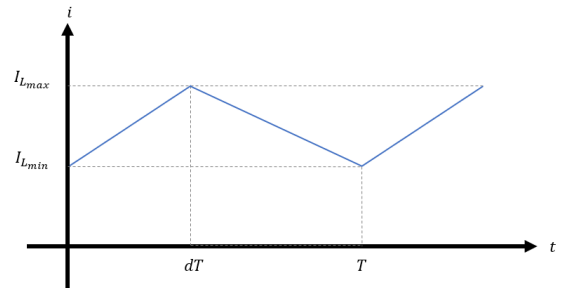


Figura 5: Corrente no indutor no modo CCM. Fonte: autor.

No período da etapa 2, a tensão em cima da chave é igual a V_{out} e a corrente que passa no diodo é equivalente ao mostrado na figura 5 para $dT \leq t \leq T$.

Discontinuous Conduction Mode (DCM):

A análise deste modo de operação possui três etapas.

- ETAPA 1: $0 \leq t \leq dT$

Esta etapa é exatamente igual a Etapa 1 do modo CMM, porém o valor mínimo da corrente do indutor $I_{L_{min}}$ no tempo $t = 0$ é igual a zero. Em $t = dT$, a corrente no indutor atinge seu valor máximo $I_{L_{max}}$. Assim:

$$i_L(t) = 0 + \frac{V_{in}}{L}(t) \quad (9)$$

$$I_{L_{max}} = i_L(dT) = 0 + \frac{V_{in}}{L}dT \quad (10)$$

O circuito da figura 5 foi utilizado para fazer a análise da etapa 1 no modo DCM.

- ETAPA 2: $dT \leq t \leq t_1$

Nesta etapa, a corrente no indutor atinge seu valor mínimo novamente no tempo $t = t_1$, onde $t_1 < T$. Para esta análise, considera-se o circuito apresentado na figura 4. Assim, temos que:

$$\begin{aligned} i_L(t_1) &= 0 \\ &= i_L(dT) + \frac{V_{in} - V_{out}}{L}(t_1 - dT) \end{aligned} \quad (11)$$

Comparando as equações 10 e 11, podemos obter a relação entre V_{out} e V_{in} e o instante t_1 que a corrente no indutor é zero.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{t_1}{t_1 - dT} \quad (12)$$

$$t_1 = \frac{V_{out}}{V_{out} - V_{in}}dT \quad (13)$$

Como $t_1 < T$, temos que

$$\frac{V_{out}}{V_{out} - V_{in}}dT < T \quad (14)$$

$$d < \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}} \quad (15)$$

A equação 15 é a condição para que o circuito trabalhe em DCM.

- ETAPA 3: $t_1 \leq t \leq T$

Nesta etapa, a chave não está conduzindo e a corrente no indutor já atingiu o seu valor mínimo. O circuito mostrado na figura 6 é referente ao circuito equivalente desta etapa.

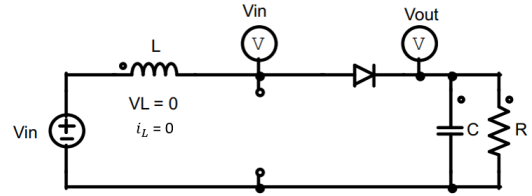


Figura 6: Circuito equivalente para o período $t_1 \leq t \leq T$ para modo DCM. Fonte: autor.

A tensão em cima da chave é equivalente a V_{in} , enquanto que a tensão no diodo é equivalente a $V_{in} - V_{out}$. A figura RR mostra o comportamento da corrente no indutor no modo DCM em um ciclo.

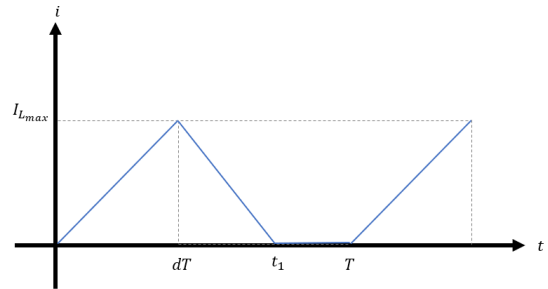


Figura 7: Corrente no indutor no modo DCM. Fonte: autor.

Borda de operação entre os modos CCM e DCM

Por definição, a corrente no indutor chega a zero no tempo $t = T$ [1]. Assim, neste modo, a corrente no indutor se comporta como mostrado na figura 8.

• Simulações - Typhoon HIL

As simulações foram feitas no *software* Typhoon HIL. Foi simulado em um inversor monofásico o SPWM e o PSPWM.

A figura 9 mostra o esquemático do inversor no *software* de simulação. A figura 10 mostra o painel para o usuário.

A figura 12 mostra o esquemático do inversor para a modulação PSPWM simples, enquanto que a figura dd mostra o seu respectivo painel.

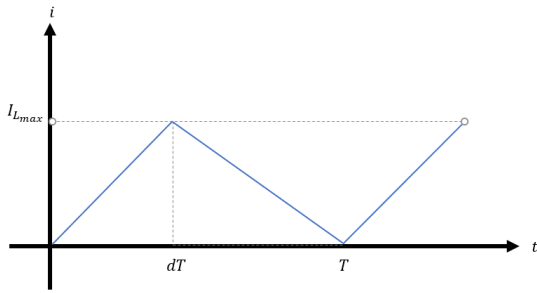


Figura 8: Corrente no indutor na borda de operação entre CCM e DCM. Fonte: autor.

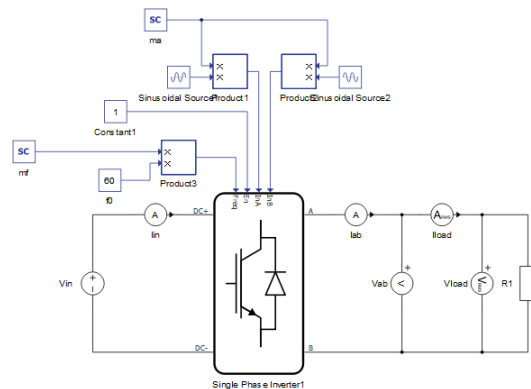


Figura 9: Circuito esquemático de um inversor no Typhoon HIL utilizando modulação SPWM. Fonte: autor.

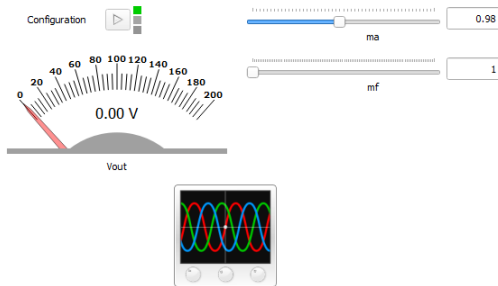


Figura 10: Painel inversor monofásico com modulação SPWM. Fonte: autor.

III. TAREFAS DESTINADAS AOS INTEGRANTES

Conforme descrito no cronograma de atividades do pré-projeto, as tarefas destinadas aos integrantes estão expostas a seguir:

Adailton Braga Júnior: 1) Estudo de topologias de inversores de tensão. 2) Simulação. 3) Programação.

André L. de S. Freitas: 1) Estudos gerais sobre conversores estáticos. 2) Simulação. 3) Programação.

Beatriz C. R. Cordeiro: 1) Estudos sobre chaveamento PWM. 2) Simulação. 3) Programação.

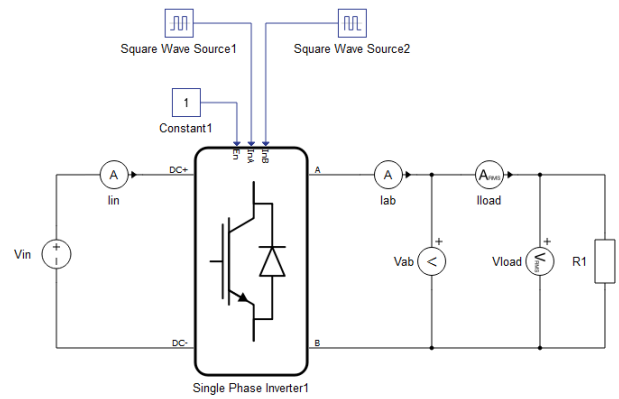


Figura 11: Circuito esquemático de um inversor no Typhoon HIL utilizando modulação PSPWM simples. Fonte: autor.

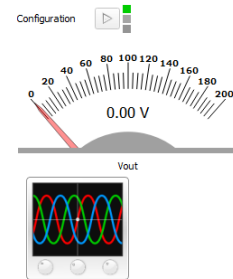


Figura 12: Painel inversor monofásico com modulação PSPWM Simples. Fonte: autor.

IV. PRÓXIMAS METAS

Segundo o cronograma de atividades, considerando as atividades já concluídas, as próximas metas serão:

- **Estudos e projetos de filtros:** nesta etapa, os discentes farão estudos para execução de projetos de filtros.
- **Simulação:** nesta etapa, os discentes irão simular o circuito elétrico do projeto através de softwares de simulação.
- **Programação:** nesta etapa, os discentes irão desenvolver a programação do microcontrolador.

Além disso, o grupo tentará fazer o levantamento dos materiais necessários e seus respectivos custos para a construção do projeto físico.

REFERÊNCIAS

- [1] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power electronics : converters, applications, and design*. Wiley India, 2007.



Adailton B. Júnior nasceu em Porto Velho, Rondônia, em 1996. Ele é graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Rondônia desde julho de 2014.

E-mail: adailtonjn68@gmail.com.

Currículo Lattes disponível em: <http://lattes.cnpq.br/5914795787360469>.



André L. de S. Freitas nasceu em Porto Velho, Rondônia, em 1993. Ele é graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Rondônia desde fevereiro de 2015.

E-mail: lsf-andre@hotmail.com.

Currículo Lattes disponível em: <http://lattes.cnpq.br/6935331423148390>.



Beatriz C. R. Cordeiro nasceu em Porto Velho, Rondônia, em 1996. Ela é graduanda em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Rondônia desde julho de 2014.

E-mail: beatriz.cristina.240@gmail.com.

Currículo Lattes disponível em: <http://lattes.cnpq.br/6109459940410639>.