



**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XX Seminário de Iniciação Científica

## CONVERSOR CC-CC BIDIRECIONAL DE TRÊS NÍVEIS APLICADO A VEÍCULOS DE TRAÇÃO ELÉTRICA<sup>1</sup>

**Julian Cezar Giacomini<sup>2</sup>, Tiago Kommers Jappe<sup>3</sup>.**

<sup>1</sup> Trabalho de conclusão de curso

<sup>2</sup> Aluno do curso de Engenharia Elétrica da UNIJUI

<sup>3</sup> Professor do curso de Engenharia Elétrica da UNIJUI

**Resumo:** Este trabalho apresenta a modelagem e o controle de um conversor CC-CC bidirecional de três níveis aplicado a veículos de tração elétrica. Inicialmente é feita uma análise teórica do conversor, explicitando suas características e vantagens em relação à topologia de dois níveis. A técnica de controle por realimentação de estados é proposta visando obter as especificações de desempenho requeridas. Os resultados experimentais foram satisfatórios, sendo demonstrados em um conversor de 140 Watts controlado digitalmente.

**Palavras-Chave:** Regeneração de energia; Modelagem em espaço de estados; Realimentação de estados.

### Introdução

Os apelos e as preocupações relacionadas ao meio ambiente e a fontes renováveis de energia faz com que a utilização dos veículos elétricos se torne interessante, tanto para as empresas automotivas quanto para os consumidores. A tendência é que os veículos elétricos ganhem mercado, se tornando futuramente uma alternativa mais eficiente, econômica e sustentável de se locomover.

Frente às oportunidades e desafios que este novo meio de locomoção proporciona, este trabalho objetiva estudar o desenvolvimento de um conversor CC-CC (Corrente Contínua - Corrente Contínua) bidirecional de três níveis aplicado a veículos elétricos. Tal conversor objetiva essencialmente efetuar o gerenciamento do fluxo de potência do banco de baterias utilizado no veículo elétrico, permitindo a possibilidade de regeneração de energia.

### Metodologia

A metodologia utilizada é embasada na análise teórica do conversor proposto, visando entender seu comportamento tanto em regime permanente como em regime transitório. Para a validação dos conceitos apresentados foi desenvolvido um protótipo em pequena escala, o qual também permite testar a técnica de controle digital proposta. Todas as etapas do projeto compreendem processos de levantamento bibliográfico, estudo e pesquisa de conceitos, fenômenos, implementação, modelagem matemática, simulação, construção de placas de circuitos impressos e programação em linguagem alto nível.





**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XX Seminário de Iniciação Científica

## Resultados e discussão

Na Figura 1(a) é demonstrada a topologia do conversor CC-CC bidirecional de três níveis. Sua célula de comutação é composta por quatro interruptores associados de tal forma que a tensão de bloqueio nos mesmos não ultrapasse metade da maior tensão envolvida no processo de conversão de energia, caracterizando assim o conversor de três níveis. Juntamente com estes interruptores existem quatro diodos de roda livre que permitem que haja a possibilidade de duplo sentido do fluxo de corrente através da fonte ( $V_i$ ) se houver algum excedente de potência na carga ( $R_o$ ).

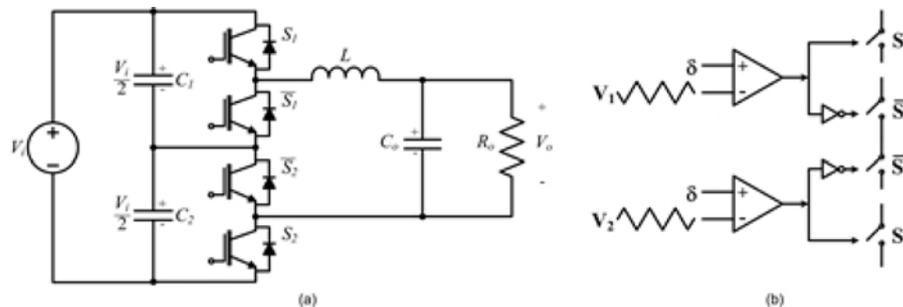


Figura 1: Topologia do conversor (a) e esquema de modulação (b).

O conversor apresentado opera no modo abaixador de tensão, resultando em uma tensão na carga ( $V_o$ ) menor que a tensão de entrada. Os capacitores  $C_1$  e  $C_2$  dividem igualmente a tensão do barramento de entrada, sendo o seu ponto comum conectado ao ponto central da célula de comutação. Cada par de interruptores ( $S_1$  e  $S_2$ ) é controlado de maneira complementar através da modulação PWM (Pulse Width Modulation), sendo o sinal de controle gerado a partir da comparação de uma onda triangular com o sinal de referência (razão cíclica). A estratégia de modulação utilizada é por portadoras defasadas (Phase Shifted Modulation), na qual as portadoras triangulares ( $V_1$  e  $V_2$ ) são defasadas no tempo por um ângulo de  $180^\circ$ , como pode ser analisado na Figura 1(b).

O conversor de três níveis é adequado a operar com elevada tensão de entrada e frequência de comutação, uma vez que em comparação com os conversores tradicionais de dois níveis apresenta menores perdas de comutação devido à reduzida tensão sobre os interruptores, o que resulta em uma maior eficiência (GRBOVI&#263;, 2010). Em comparação com um conversor Buck tradicional de dois níveis a indutância deste conversor chega a ser quatro vezes menor, considerando a mesma frequência de comutação, ondulação de corrente e tensão de entrada. Este tipo de conversor possui aplicações em drive's controlados, fontes ininterruptas de energia e outros processos que necessitem bidirecionalidade no fluxo de potência.

Para projetar o sistema de controle do conversor é necessário obter um modelo matemático que descreva o seu comportamento transitório. Sabe-se que os conversores estáticos de potência são sistemas variantes no tempo e conseqüentemente não lineares. Logo, deve ser realizada a linearização do conversor para a obtenção de um modelo médio em um período de comutação. Tal técnica desconsidera as variações causadas pelo efeito da comutação e representa apenas a evolução do valor

# SALÃO DO CONHECIMENTO

XX Seminário de Iniciação Científica  
XVII Jornada de Pesquisa  
XIII Jornada de Extensão

II Mostra de Iniciação Científica Júnior  
II Seminário de Inovação e Tecnologia

2012



**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XX Seminário de Iniciação Científica

médio das variáveis. Esta linearização é feita em torno de um ponto de operação em regime permanente, permitindo assim obter o chamado modelo de pequenos sinais (ERICKSON, 2001).

A técnica utilizada neste trabalho para o conversor CC-CC bidirecional de três níveis foi a modelagem por espaço de estados médio, conhecida também como “Space State Averaging Modeling” (MIDDLEBROOK, 1977). As variáveis de estado foram associadas aos elementos armazenadores de energia, neste caso, a corrente no indutor ( $i_L(t)$ ) e a tensão no capacitor de saída ( $V_o(t)$ ).

O modelo médio em espaço de estados é obtido pela média das equações de estado em um período de comutação. Posteriormente é realizada a perturbação e linearização num determinado ponto de operação em regime para a obtenção do modelo de pequenos sinais, sendo o mesmo representado pela seguinte equação:

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{x}(t)}{dt} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C_o} & -\frac{1}{R_o \cdot C_o} \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{i}_L(t) \\ \tilde{V}_o(t) \end{bmatrix}}_{\tilde{x}(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{V_i}{L} \\ 0 \end{bmatrix}}_B \cdot \underbrace{\tilde{u}(t)}_{\tilde{u}(t)} \\ \underbrace{\tilde{y}(t)}_{\tilde{y}(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}}_C \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{i}_L(t) \\ \tilde{V}_o(t) \end{bmatrix}}_{\tilde{x}(t)} \end{cases}$$

O projeto do sistema de controle do conversor foi realizado utilizando-se a técnica de controle integral com realimentação de estados, representada em diagrama de blocos na Figura 2. As grandezas A, B e C representadas no diagrama referem-se as matrizes e vetores obtidos no modelo de pequenos sinais descrito anteriormente.

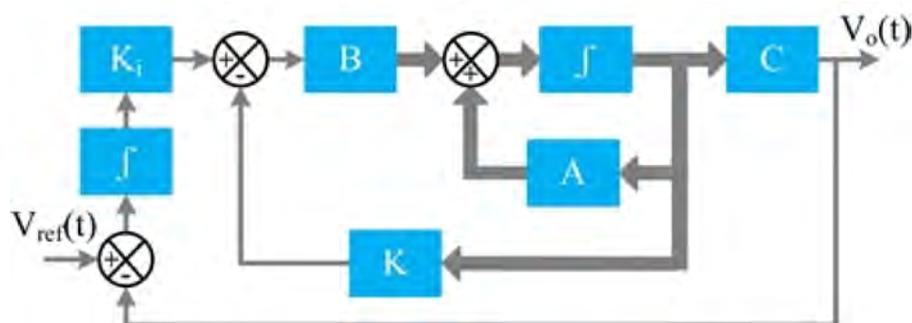


Figura 2: Técnica de controle integral com realimentação de estados.

Esta técnica apresenta a vantagem da possibilidade da alocação de todos os polos de malha fechada do sistema, utilizando para isto um vetor de ganhos de retroação K (OGATA, 2003). Entretanto, esta



**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XX Seminário de Iniciação Científica

estratégia de controle requer que todos os estados do sistema possam ser medidos ou observados. Salienta-se que nesta aplicação ambos os estados são devidamente medidos com sensores apropriados. Um integrador é colocado logo após o comparador de erro da tensão de saída de modo a aumentar a ordem do sistema e proporcionar erro nulo em regime permanente. Devido a este aumento na ordem do sistema o projeto dos ganhos de retroação requer a alocação de mais um polo, sendo este localizado sobre o eixo real no plano 's' e alocado dez vezes distante dos polos de malha fechada dominantes desejados.

Desta forma, na Tabela 1 encontra-se o resumo do projeto do sistema de controle. Os polos dominantes desejados de malha fechada foram arbitrados de acordo com as especificações de coeficiente de amortecimento e frequência natural. Estes parâmetros implicam numa ultrapassagem percentual de 4,6 % e num tempo de assentamento de 5 ms (critério de 2 %) para uma entrada degrau.

Simbologia	Descrição	Valor
$\zeta$	Coeficiente de amortecimento	0,7
$\omega_n$	Frequência natural	1142,85 rad/s
$S_d$	Polos dominantes	$-800 \pm 816,16j$
$S_{ad}$	Polo adicional	-8000
$K_i$	Ganho integral	31,34
$K=[K, K_i]$	Ganhos de retroação	[0,1418 0,0282]

Tabela 1: Alocação dos polos e ganhos de retroação obtidos.

Na Figura 3 é representada a resposta ao degrau do sistema não compensado e do sistema compensado utilizando os ganhos encontrados. Percebe-se a melhora significativa no comportamento da tensão de saída, sendo os requisitos de resposta transitória alcançados.

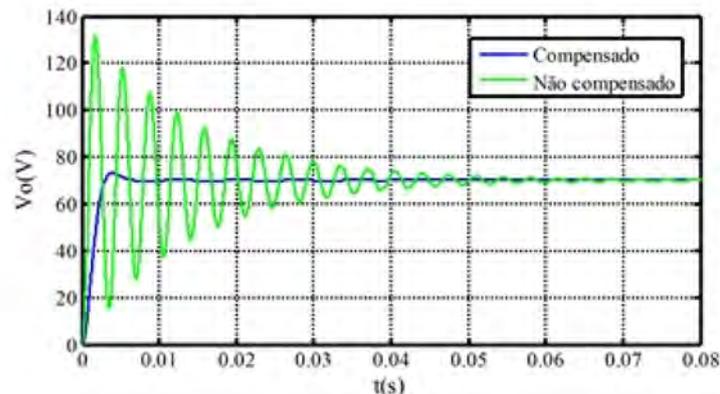


Figura 3: Resposta ao degrau dos sistemas compensado e não compensado.



**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XX Seminário de Iniciação Científica

Para a implementação digital foi realizada a discretização do controlador utilizando o método de Euler, também denominado “Forward Euler Integration” (BUSO, 2006). A equação recursiva obtida para o controlador considerando um dado período de amostragem  $T_s$  é a seguinte:

$$\delta(k) = \delta(k-1) + (V_{ref}(k-1) - V_o(k-1))K_1 T_s + (I_L(k-1) - I_L(k))K_1 + (V_o(k-1) - V_o(k))K_2$$

A razão cíclica é atualizada a cada período de comutação considerando os valores atuais e passados da tensão de saída e da corrente no indutor, além da tensão de referência e da razão cíclica passada. A frequência de amostragem estabelecida foi de 100 kHz, o que significa que duas amostras de tensão e corrente são extraídas do conversor a cada período de comutação.

Um protótipo de 140 W do conversor foi implementado na prática para sua respectiva validação. A tensão nominal de entrada e a tensão nominal de saída são 100 V e 70 V, respectivamente. A ondulação de corrente admitida no indutor foi de 5%, considerando que a frequência de comutação empregada foi de 50 kHz. A técnica de controle digital foi implementada no DSP (Digital Signal Processor) de ponto flutuante TMS320F28335, da Texas Instruments.

Podem ser visualizados na Figura 4(a) os resultados obtidos para carga nominal. Verificou-se que a tensão de bloqueio sobre o interruptor não ultrapassa 50 V, ou seja, a metade da tensão de entrada. A tensão de saída da célula de comutação apresenta o dobro da frequência de comutação, sendo isto uma característica deste conversor. O valor médio da tensão de saída da célula de comutação é a própria tensão na carga, como pode ser observado na Figura 4(a). Na Figura 4(b) é demonstrado o resultado para um degrau de carga (1 A &#8594; 2 A), onde percebe-se a atuação do controlador, fazendo com que a tensão de saída estabilize após 6 ms.

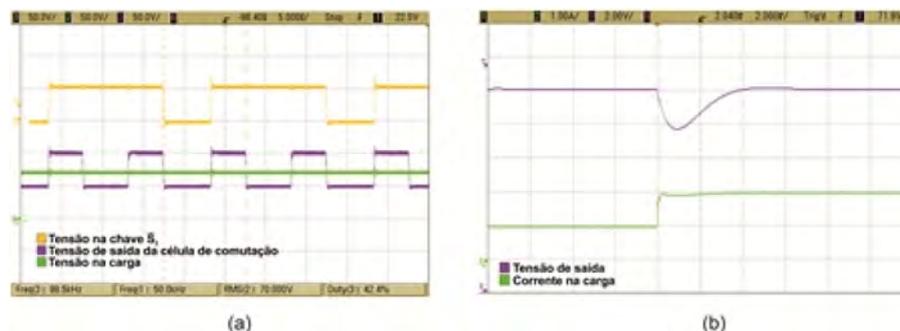


Figura 4: Resultados para carga nominal (a) e para incremento de carga (b).

Outra característica evidenciada foi a frequência da corrente no indutor, a qual também apresenta o dobro da frequência de comutação. Este fato contribui para que a indutância deste conversor seja reduzida em relação à indutância do conversor Buck de dois níveis, considerando as mesmas características de projeto.



**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XX Seminário de Iniciação Científica

### Conclusões

Este trabalho abordou o estudo de um conversor CC-CC bidirecional de três níveis operando como abaixador de tensão. Foram detalhadas suas características de funcionamento e aspectos de modelagem e controle. Os resultados experimentais foram satisfatórios e condizem com a teoria. A técnica de controle integral com realimentação de estados se mostrou eficiente e atrativa, pois permite a alocação de todos os polos de malha fechada do sistema.

### Agradecimentos

Aos colegas do Grupo de Automação Industrial e Controle (GAIC) da UNIJUI.

### Referências Bibliográficas

- BUSO, S.; MATTAVELLI, P. Digital Control in Power Electronics. Morgan & Claypool, 2006.
- ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVICH, D. Fundamentals of Power Electronics. 2<sup>a</sup> ed. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- GRBOVIC, P. J. et al. A Bidirectional Three-Level DC-DC Converter for the Ultracapacitor Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, October 2010. pp. 3415-3430.
- MIDDLEBROOK, R. D.; CUK, S. A General Unified Approach to Modeling Switch-Converter Power stages. International Journal of Electronics, Vol. 42, June 1977. 521-550.
- OGATA, K. Engenharia de controle moderno. 4<sup>a</sup> ed. São. Paulo: Prentice Hall. 2003.