

## Estudo de implementação do conversor BUCK-BOOST CC-CC bidirecional com comutação ZVS

### Implementation study of the bidirectional BUCK-BOOST DC-DC converter with ZVS switching

**Eduardo Pacheco Carreiro Braga**  
[eduardopcbra@gmail.com](mailto:eduardopcbra@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

**Bruno Gomes de Assis**  
[elaric\\_10@outlook.com](mailto:elaric_10@outlook.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

**Claudionor Bintencourt Nascimento**  
[claudinor@utfpr.edu.br](mailto:claudinor@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

**Eloi Agostini Jr**  
[eloialgostini@utfpr.edu.br](mailto:eloialgostini@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

#### RESUMO

Carros a combustão são os mais utilizados globalmente, responsáveis por mais de 99% dos carros em circulação atualmente, estes carros consomem toneladas de barris de petróleo por dia. Carros elétricos vêm como alternativa para veículos a combustão para países onde a matriz energética se baseia em fontes renováveis como a hidráulica e nuclear, pois nesse caso os carros elétricos gerariam menos gases poluentes. Estima-se que se *plug-in electric vehicles*, veículos elétricos que recebem energia de fonte externa e armazena em baterias (PEV), forem fortemente inseridos no mercado mundial deixaríamos de consumir aproximadamente 2.75 quadrilhões de Btu de combustíveis fósseis (Lynes, 2017). Para que isso ocorra são necessárias tecnologias para o gerenciamento de energia em PEVs. Baterias são geralmente utilizadas para armazenar essa energia porém devido as suas limitações de entrega de grandes fluxos de energia de maneira imediata também são utilizados supercapacitores (SC) em paralelo, formando um sistema híbrido de armazenamento de energia (SHAE). Para gerenciar o fluxo de energia entre essas duas fontes de armazenamento um conversor CC-CC bidirecional é necessário, com isso neste trabalho é apresentado um conversor CC-CC bidirecional com ZVS que já foi estudado em Bidirectional DC-DC Converters for Hybrid Energy Storage Systems in Electric Vehicle Applications (BRODAY, 2016) e envolve a análise matemática em regime permanente, uma topologia de projeto e com as seguintes especificações: Fonte 1 de 100 V, fonte 2 de 160 V, frequência de comutação em 100 kHz e potência nominal de 1000 W.

**PALAVRAS-CHAVE:** Conversores CC-CC Bidirecionais. Baterias. SC. PEVs. SHAE.

#### ABSTRACT

Fuel cars are the most used globally, accounting for more than 99% of the cars in circulation today, these cars consume tons of barrels of oil a day. Electric cars come as an alternative to fuel vehicles for countries where the energy matrix is based on renewable sources such as hydro and nuclear, in this case electric cars generate less pollutants. It is estimated that if plug-in electric vehicles (PEV), which receive external source energy and store in batteries, are strongly inserted in the world market we would not consume approximately 2.75 quadrillion Btu of fossil fuels (Lynes, 2017). For this to occur, technologies for power management in PEVs are needed. Batteries are usually used to store this energy but due to their limitations for delivery large energy flows, they are also used supercapacitors (SC) in parallel, forming a hybrid energy storage system (HES). In order to manage the energy flow between these two storage sources a bidirectional DC-DC converter is required, in this work we present a bidirectional DC-DC converter with ZVS that has already been studied in Bidirectional DC-DC Converters for Hybrid Energy Storage Systems in Electrical Vehicle Applications (BRODAY, 2016) and involves the steady-state mathematical analysis, a design topology with the following specifications: Source 1 of 100 V, source 2 of 160 V, switching frequency at 100 kHz and rated power of 1000 W.

**Recebido:** 31 out 2018  
**Aprovado:** 04 set 2018

#### Direito autorial:

Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.





**KEYWORDS:** DC-DC converter. Battery. SC. HESS.

## 1. INTRODUÇÃO

Sistemas que apresentam SHAE com bancos de baterias e banco de SC obtém-se dos pontos fortes das duas formas de armazenamento de energia. O emprego de SC aumenta a vida útil da bateria pois as altas derivadas de correntes seriam supridas pelo SC, a autonomia é suprida pela bateria, maior aproveitamento de regeneração de energia e redução do tamanho e por consequência o custo de bacos de baterias.

Para gerencias o fluxo de energia entre as duas fontes do SHAE utiliza-se um conversor CC-CC bidirecional, pois topologias desse tipo mostram-se mais eficientes. Conversores bidirecionais permitem o fluxo de energia em ambos os sentidos. O conversor proposto por esse trabalho apresenta um abaixador/elevador em ambos sentidos, assim ele atua como buck/boost nos dois sentidos do fluxo de energia.

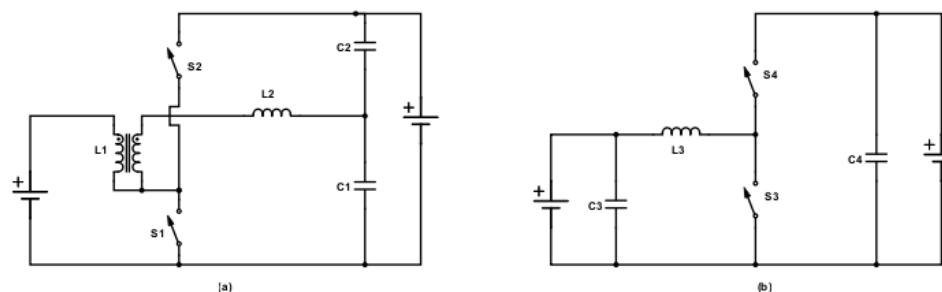
## 2. METODOLOGIA

Para o começar o desenvolvimento do projeto estudou-se os conversores CC-CC unidirecionais clássicos para compreender o funcionamento de conversores de energia CC-CC. Após a análise quantitativa do conversor proposto são feitas simulações para validar o modelo matemático.

## 3. RESULTADO E DISCUSSÃO

O conversor estudado por Broday (2016) é uma modificação de um conversor apresentado por Hyun-Lark Do (2011) que por sua vez é uma adaptação da topologia da topologia Boost/Buck. O conversor tradicional, Boost/Buck, apresenta algumas desvantagens como os diodos antiparalelos e com a eficiência dessa topologia. Já a proposta de Hyun-Lark Do (2011) adicionando um indutor acoplado no lugar do indutor original dá à essa topologia, junto com um indutor adicional, comutação suave ZVS.

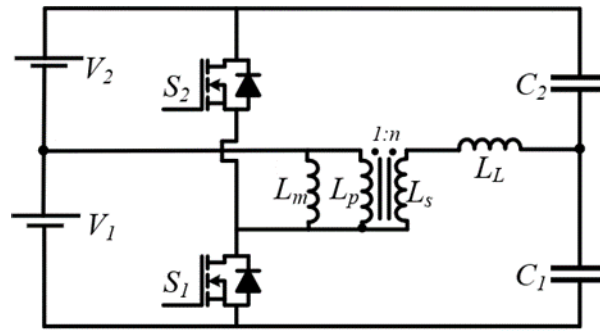
Figura 1 (a) Conversor Proposto por Hyan-Lark (b) Boost/Buck



Fonte: Autoria própria

Porém para aplicações em sistemas híbridos de armazenamento de energia os dois conversores apresentados acima têm dificuldades, pois trabalham apenas como boost em um sentido e como buck no sentido oposto. A solução apresentada por Broday (2016) trata de mudar a fonte de tensão mais a esquerda. Dessa forma o conversor pode operar com as duas características nos dois sentidos.

Figura 2 Conversor Buck-Boost CC-CC ZVS.



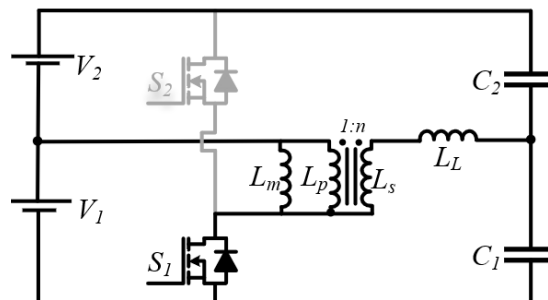
Fonte: Autoria própria.

### 3.1 MODO DIRETO

Neste modo de operação a energia flui de  $V_1$  para  $V_2$ . O conversor estudado apresenta 6 etapas dentro de um período de comutação  $T_s$  para cada direção, 4 etapas de operação e 2 de etapas de comutação. Como as etapas de comutação são muito rápidas elas serão desconsideradas por não representarem influência considerável ao sistema (BRODAY,2016). Para as outras 4 etapas, podemos condensá-las em apenas duas, devido a característica da topologia, pois a corrente passa pela chave ou pelo diodo antiparalelo. Não será apresentada a análise do modo reverso, pois o estágio 1 do modo direto será o estágio 2 do modo reverso e o estágio 2 do modo direto será o estágio 1 do modo reverso.

Estágio 1 [ $t_0, t_1$ ]. Durante esta etapa a chave  $S_2$  estará sempre desligada, com isso  $I_{S2}$  seja zero. A corrente  $I_{S1}$  circula pela chave ou pelo diodo antiparalelo, quando a corrente está passando pelo diodo  $I_{S1}$  será negativa. Essa possibilidade de a corrente poder circular nas duas direções é o que permite que a comutação ZVS ocorra. Abaixo o circuito demonstrando este estágio.

Figura 3. Conversor Buck-Boost Modo Direto Estágio 1.



Fonte: Autoria própria.

Equações obtidas dessa etapa:

$$V_{s2} = V_1 + V_2 \tag{11}$$

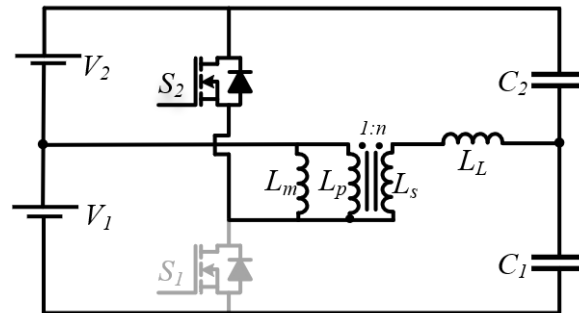
$$I_2 = \frac{-I_{LL}}{2} \tag{2}$$

$$I_1 = I_{Lm} + I_{LL} \frac{2n - 1}{2} \tag{3}$$

$$I_{S1} = I_{Lm} + I_{LL}(n - 1) \quad (4)$$

Estágio 2 [t1, t2]. Neste estágio a chave  $S_1$  ficará sempre desligada então a corrente passando por ela será zero. O tempo desse estágio por tanto será o tempo complementar ao estágio anterior. Este estágio também terá comutação suave ZVS, portanto a corrente da chave se comporta como no estágio anterior.

Figura 4. Conversor Buck-Boost Modo Direto Estágio 2.



Fonte: Autoria própria

Equações obtidas dessa etapa:

$$V_{s1} = V_1 + V_2 \quad (5)$$

$$I_1 = \frac{I_{LL}}{2} \quad (6)$$

$$I_2 = -I_{Lm} - I_{LL} \frac{2n - 1}{2} \quad (7)$$

$$I_{S2} = -I_{Lm} - I_{LL}(n - 1) \quad (8)$$

Tabela 1. Especificações do Projeto.

Especificações	Símbolo	Valor
Fonte de tensão 1	$V_1$	100 V
Fonte de tensão 2	$V_2$	160 V
Potencia	$P_c$	1000 W
Frequência de operação	$f_s$	100kHz
Ripple no indutor de magnetização	$\Delta I_m$	40%

Fonte: Autoria própria

Partindo dos parâmetros apresentados acima pode-se calcular a razão cíclica e os elementos magnéticos.

$$D_1 = \frac{V_2}{V_1 + V_2} = 0,615 \quad (9)$$

$$L_m = \frac{V_1 D_1}{I_{Lm\_AVG} \Delta I_m f_s} = 51,444 \mu H \quad (10)$$

Indutância de Dispersão Auxiliar. O projeto da indutância de dispersão auxiliar é importante pois ela está diretamente relacionada com a possibilidade de o conversor operar em ZVS.

Para determinar a indutância adequada arbitra-se um valor de  $I_{LL}$  e encontra-se um valor máximo para  $N$  que possibilite a comutação ZVS.

$$L_{LL} = 10\mu H \tag{11}$$

$$N_{max} = 1 - \sqrt{L_{LL} \left( \frac{2P \cdot fs \cdot L_m - V_1^2 \cdot D_1^2}{V_1^2 \cdot D_1^2 \cdot L_m} \right)} = 0,35 \tag{12}$$

Tabela 2. Valores dos Componentes Passivos.

Especificações	Símbolo	Valor
Indutor de Dispersão	$I_{LL}$	10 $\mu H$
Capacitores	$C_1$ e $C_2$	10 $\mu F$
Relação enrolamento	$N$	0.308
Indutor de magnetização	$L_m$	51.44 $\mu H$

Fonte: Autoria própria

### 3.2 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Na tabela 3 apresenta os resultados obtidos através da simulação da topologia proposta com o software PSIM®. Afim de demonstrar que o modelo matemático encontrado descreve o funcionamento do conversor compara-se os valores estimados pelas equações com os valores encontrados na simulação.

Tabela 3 Resultados Simulados Modo Direto.

Símbolos	Teórico	Simulado	Erro (%)
$V_2$	160	160	-
$V_{Lp\_to}$	100	100	-
$V_{Lp\_t1}$	-160	-160.588	0.367
$V_{Ls\_to}$	30.8	30.8	-
$V_{Ls\_t1}$	-49.28	-49.461	0.367
$V_{Lm\_to}$	160	160	-
$V_{Lm\_t1}$	-160	-160.588	0.367
$I_{Lm\_min}$	10.269	10.263	0.06
$I_{Lm\_max}$	22.231	22.12	0.5
$I_{Lm\_AVG}$	16.25	16.23	0.12
$V_{LL\_to}$	-69.2	-70.737	2.2
$V_{LL\_t1}$	110.72	112.137	1.28
$I_{LL\_max}$	21.292	21.553	1.226
$V_{S1\_max}$	260	260.588	0.226
$I_{S1\_min}$	-4.465	-4.652	4.2
$I_{S1\_max}$	36.965	36,74	0,61
$I_{S1\_AVG}$	10	10.8	8
$I_{S1\_RMS}$	15.828	15.591	1.5
$V_{S2\_max}$	260	260.782	0,3
$I_{S2\_min}$	-36.965	-36.535	1,54
$I_{S2\_max}$	4.465	4.539	1.657
$I_{S2\_AVG}$	-6.26	-6.48	3,51
$I_{S2\_RMS}$	12.513	12,07	3,54

$I_{1\_AVG}$	10	10	-
$I_{2\_AVG}$	-6.25	-6.22	0,48

Fonte: Autoria própria

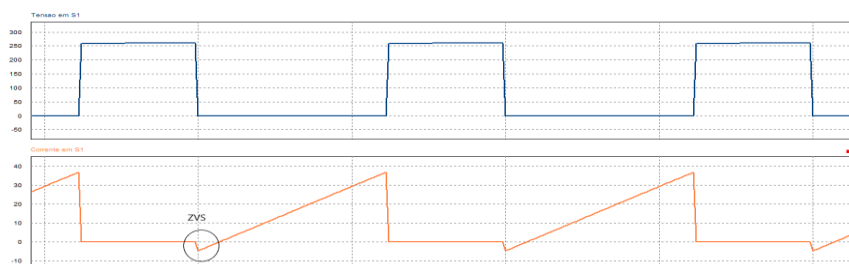
Tabela 1. Resultados da Simulação em Modo Reverso.

Símbolos	Teórico	Simulado	Erro (%)
$V_1$	100	100	-
$V_{Lp\_to}$	-160	-160	-
$V_{Lp\_t1}$	100	100	-
$V_{Ls\_to}$	-49.28	-49.28	-
$V_{Ls\_t1}$	30.8	31	0.64
$V_{Lm\_to}$	-160	-160	-
$V_{Lm\_t1}$	100	100	-
$I_{Lm\_max}$	-10.269	-10.364	0.925
$I_{Lm\_min}$	-22.231	-22.241	0.045
$I_{Lm\_AVG}$	-16.25	-16.30	0.308
$V_{LL\_to}$	110.72	112.141	1.283
$V_{LL\_t1}$	-69.2	-70.557	1.961
$I_{LL\_max}$	21.292	21.305	0.061
$V_{S1\_max}$	260	260.746	0.287
$I_{S1\_min}$	4.465	4.539	1.657
$I_{S1\_max}$	-36.965	-37,103	0.373
$I_{S1\_AVG}$	-10	-10	-
$I_{S1\_RMS}$	15.828	15.875	0.3
$V_{S2\_max}$	260	260.903	0.347
$I_{S2\_max}$	36.965	37.099	0.36
$I_{S2\_min}$	-4.465	-4.539	1.657
$I_{S2\_AVG}$	-6.26	-6.26	-
$I_{S2\_RMS}$	12.513	12,48	0.264
$I_{1\_AVG}$	10	10	-
$I_{2\_AVG}$	-6.25	-6.22	0,48

Fonte: Autoria própria

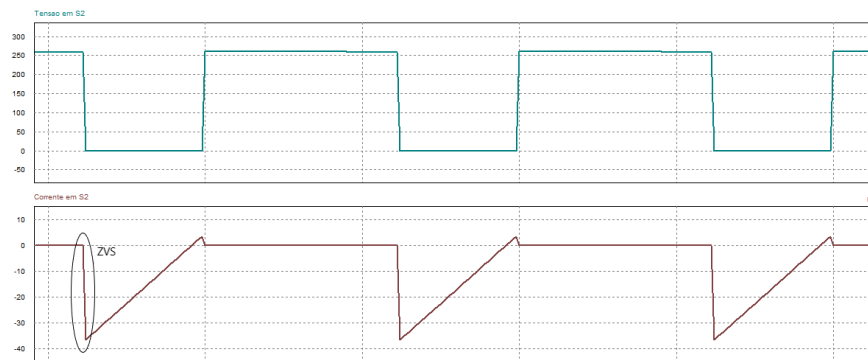
Para observar a operação em ZVS analisa-se a tensão e a corrente sobre as chaves.

Figura 5. Comutação ZVS em S1



Fonte: Autoria própria

Figura 6. Comutação ZVS em S2



Fonte: Autoria própria

#### 4. CONCLUSÃO

Para sistemas híbridos de armazenamento de energia mostra-se indispensável o emprego de conversores bidirecionais e com o crescimento de veículos elétricos a pesquisa em tecnologias que permitem esse fluxo de energia se faz necessária. O conversor proposto se mostra interessante pelo emprego de poucos elementos e suas etapas de operação simples

#### REFERENCIAS

BRODAY, Gabriel Renan. **BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTERS FOR HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEMS IN ELECTRIC VEHICLE APPLICATIONS**. 2016. 268 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2016. Cap. 4.

DO, Hyun-lark. Nonisolated Bidirectional Zero-Voltage-Switching DC–DC Converter. **Ieee Transactions On Power Electronics**, [s.l.], v. 26, n. 9, p.2563-2569, set. 2011. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tpel.2011.2111387>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5708181/>>. Acesso em: 31 ago. 2018.

LYNES, Melissa. **Growth in plug-in electric vehicles depends on future market conditions**. 2017. Disponível em: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=33612>>. Acesso em: 31 ago. 2018.

#### AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Universidade Tecnológica Federal do Paraná/Brasil. Deixo meus agradecimentos para meu orientador Claudinor Bitencourt Nascimento, para o professor Elói Algostini Jr e para meu companheiro de pesquisa Bruno Gomes de Assis, pelo trabalhar com empenho e persistência durante todo o processo.