

CONVERSOR CC-CC MULTIFÁSICO BIDIRECIONAL EM CORRENTE NÃO ISOLADO APLICADO A SISTEMAS ELÉTRICOS DE TRACÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS

Robson Mayer¹, Adriano Péres², Sérgio Vidal Garcia Oliveira^{1,2}

¹Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville - SC, Brasil

²Universidade Regional de Blumenau, Blumenau - SC, Brasil

e-mails: mayerrobson@gmail.com; aperes.furb@gmail.com; sergio_vidal@ieee.org

Resumo – Este artigo revisa as principais características de veículos elétricos (EV) e veículos elétricos híbridos (HEV), as arquiteturas do sistema elétrico de tração que os compõem, e algumas topologias de conversores CC-CC bidirecionais aplicados aos sistemas de tração. Entre as contribuições deste artigo, destaca-se o estudo das diversas possibilidades tecnológicas de armazenamento de energia e das principais características dos sistemas de tração de EVs e HEVs atualmente comercializados, objetivando servir de referencial conceitual aos interessados. Bem como, estuda, projeta e apresenta os testes em malha aberta de um protótipo de um conversor multifásico bidirecional em corrente de três braços com potência de 6 kW. O conversor opera como elevador e abaixador de tensão, apresenta como principais características: reduzida ondulação de corrente e reduzido volume dos capacitores de filtro. Os resultados experimentais obtidos comprovam as especificações, limitações e funcionamento teóricos previstos.

Palavras-Chave - Conversor CC-CC Bidirecional multifásico, Veículo Elétrico, Veículo Elétrico Híbrido.

MULTIPHASE BIDIRECTIONAL DC/DC NON-ISOLATED CONVERTER FOR ELECTRIC DRIVE SYSTEM IN ELECTRIC VEHICLE AND HYBRID ELECTRIC VEHICLE

Abstract – In this paper the main characteristics of electric vehicles (EV) and hybrid electric vehicles (HEV), drive train configurations and, dc-dc converter topologies applied are revised. Among the main contributions of this tutorial, the energy storage systems and a benchmarking of the main characteristics inside EVs and HEVs actually manufactured are highlighted. As well as, study, design and experimental results are included for an open loop prototype of a 6 kW interleaved 3-phase bidirectional current converter. The converter operates as a step-up or step-down voltage, with reduced current ripple, and reduced volume of the filters' capacitors. The obtained practical results have been confirmed the specifications and limitations of the designed prototype.

Artigo submetido em 25/08/2014. Primeira revisão em 06/01/2015, segunda revisão em 22/05/2015. Aceito para publicação em 20/07/2015, por recomendação do Editor Cassiano Rech.

Keywords - Electric Vehicle, Hybrid Electric Vehicle, Multiphase Bidirectional Dc/dc Converter.

I. INTRODUÇÃO

Grande parte dos meios de transporte que circulam atualmente no mundo utilizam o combustível fóssil como principal fonte de energia. A crescente emissão de gases poluentes que são lançados para a atmosfera terrestre, como o dióxido de carbono (CO₂), originado da queima de combustíveis fósseis pelos veículos e indústrias, tem contribuído significativamente nas últimas décadas para a aceleração do efeito estufa. Este efeito é provocado, principalmente, pela ação humana, que realiza a queima de grandes quantidades de carvão e petróleo, e pelo desmatamento, sendo estes processos apontados como os causadores, sobretudo, da elevação média da temperatura do planeta. As mudanças climáticas refletem o impacto de processos socioeconômicos e culturais, como o crescimento populacional, a urbanização, a industrialização e o aumento do consumo de recursos naturais e da demanda sobre os ciclos biogeoquímicos [1].

Os benefícios ambientais e econômicos a médio e longo prazos obtidos com o desenvolvimento e produção de EVs e HEVs têm estimulado o interesse comercial global da indústria e do meio científico há alguns anos, cujo objetivo é substituir, ao longo dos anos, os veículos convencionais, dependentes dos combustíveis fósseis, por veículos mais eficientes e que não emitam gases nocivos para a atmosfera, e buscar alternativas de fontes energéticas renováveis. Assim, a eletrônica de potência assume um papel fundamental no desenvolvimento e inovação dos sistemas elétricos destes veículos [1]–[3].

Neste sentido, o presente trabalho se propôs a realizar um estudo e revisão das principais topologias de EVs e HEVs, assim como, as arquiteturas do sistema elétrico de tração que os compõem, sua demanda energética e os conversores CC-CC bidirecionais aplicados ao sistema de tração destes veículos, com a finalidade de realização de um projeto e testes experimentais de um conversor com características para a aplicação em HEVs.

II. VEÍCULO ELÉTRICO E VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO

Um veículo elétrico (EV) possui como principal característica um ou mais motores elétricos que movimentam seus eixos de tração, transformando energia elétrica em energia mecânica para acionar as rodas do veículo. Possui

uma fonte acumuladora de energia elétrica a bordo, normalmente baterias eletroquímicas combinadas com supercapacitores.

Os EVs ainda são classificados como automóveis *plug-in*, também denominados de *plug-in electric vehicles* (PEV) conforme ilustrado na Figura 1, os quais se diferem unicamente pelo fato das baterias do sistema de tração serem carregadas completamente por meio de uma tomada elétrica externa (normalmente conectada a rede elétrica) quando o veículo estiver estacionado. Geralmente estes veículos dispõem de um carregador de baterias a bordo de baixa capacidade [2], [3]. As setas na figura ilustram o sentido do fluxo de energia entre os elementos do sistema do EV/PEV.

O sistema apresenta como principais vantagens a emissão nula de poluentes, elevada eficiência do sistema de tração, e a vida útil do motor elétrico é muito mais longa do que o motor à combustão interna (*Internal Combustion Engine* - ICE) [1].

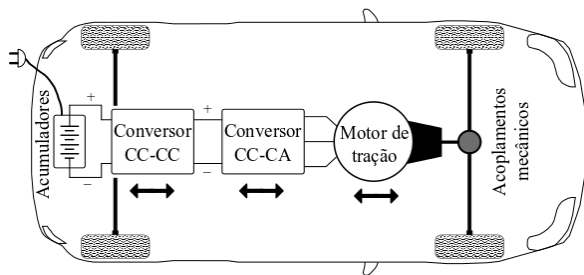


Fig. 1. Configuração de um PEV.

Como acumuladores de energia, são utilizadas baterias químicas de diferentes tecnologias, tais como: baterias de chumbo-ácido, baterias de hidreto metálico de níquel (Ni-MH), baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd), e tecnologias mais avançadas como, polímero de íons de lítio (*polymer* Li-ion), de íons de lítio (Li-ion), de ferro fosfato de lítio (LiFePO₄), e de óxido de nano lítio-titanato (nLTO) [4].

Sistemas PEVs apresentam como principais desvantagens a reduzida autonomia do veículo, pois as baterias apresentam baixas densidades de energia em relação aos combustíveis fósseis, conforme apresentado na Tabela I. Possuem elevado custo de manutenção, sendo necessária a substituição das baterias ao final de sua vida útil, e necessita de infraestruturas adaptadas para o seu reabastecimento [5], [6]. O tempo de recarga das baterias é elevado quando comparamos ao tempo de reabastecimento de um veículo convencional, que se situa entre 2 à 5 minutos [7], [8].

Os HEVs possuem uma configuração em que são utilizados motores elétricos para movimentar os eixos de tração, combinados a duas ou mais fontes de energia para o acionamento do mesmo e de seus periféricos embarcados no veículo. Eles possuem diversas configurações onde as principais são: a série que é ilustrada na Figura 2, a paralelo que é ilustrada na Figura 3, e a configuração série-paralelo ou mista que é uma combinação de ambas e está ilustrada na Figura 4, onde aliam o baixo consumo de combustível com a elevada eficiência do sistema de tração elétrico [2], [7]–[16].

Na configuração série do HEV, é o conversor CC-CA bidirecional que processa toda a potência do sistema de tração, onde fornece energia ao motor elétrico proveniente

das baterias e do gerador, e efetua o carregamento das baterias quando ocorre frenagem regenerativa.

TABELA I
Características de Alguns Acumuladores e Combustíveis

Elemento	Tensão por célula (V)	Densidade de energia (Wh/kg)	Densidade potência (kW/kg)	Ciclo de vida
Supercapacitor	2,5/2,7	2-30	4-10	Superior a 1000000
Bateria chumbo-ácido	2	30-40	0,18	até 800
Ni-Cd	1,2	40-60	0,15	até 2000
Ni-MH	1,2	55-80	0,4-1,2	até 1000
Li-ion	3,6	80-170	0,8-2	até 1200
LiFePO ₄	3,2/3,3	80-115	1,3-3,5	até 2000
Li-Polymer	3,7	130/200	1-2,8	até 1000
Etanol	-	7850	-	-
Gás natural liquefeito	-	12100	-	-
Gasolina	-	12200	-	-
Diesel	-	12700	-	-
Hidrogênio líquido (H ₂)	-	39000	-	-

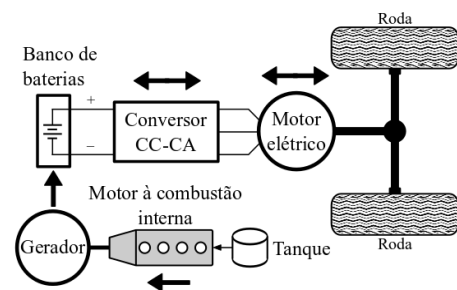


Fig. 2. Configuração série do HEV.

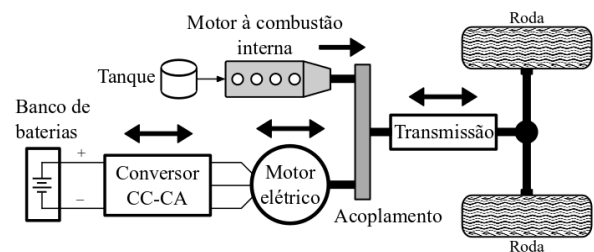


Fig. 3. Configuração paralelo do HEV.

A configuração paralelo pode operar somente com o motor elétrico, somente o ICE, ou com os dois simultaneamente por meio de um acoplamento mecânico que aciona a transmissão. E na configuração série-paralelo, o veículo opera com os dois sistemas simultaneamente ou mesmo de forma complementar para obter o máximo de autonomia e rendimento. Em todos os sistemas, o conversor CC-CA pode ainda estar segmentado em dois outros conversores, um conversor CC-CC conectado ao banco de baterias, e outro conversor CC-CA conectado ao motor elétrico, como ilustrado na Figura 1 [7]–[16].

A configuração com célula a combustível (*Fuel Cell Vehicle* - FCV) é ilustrada na Figura 5, e apresenta maior eficiência e reduzida emissão de poluentes para a atmosfera em relação a um HEV que possui o ICE como fonte de energia primária. Outra característica do FCV é que ele não possui qualquer tipo de conexão ou acoplamento mecânico com as rodas do veículo ou componentes móveis do mesmo

para seu funcionamento, sendo seu sistema de tração muito similar à configuração série [7]–[9].

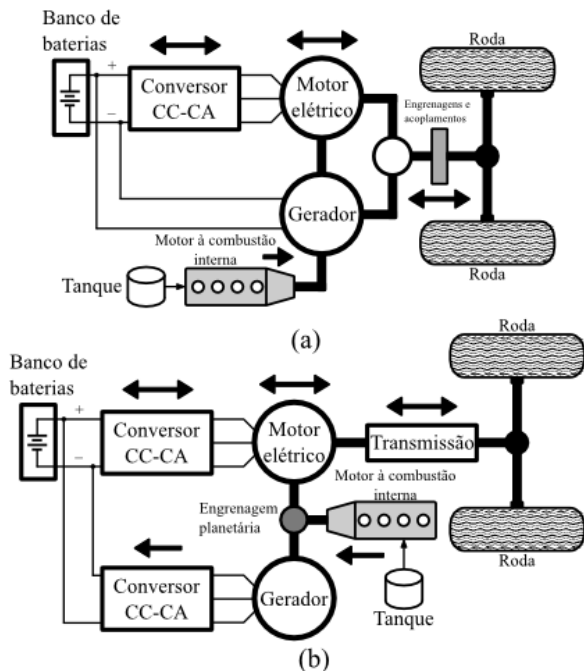


Fig. 4. (a) Configuração série-paralelo ou mista do HEV, e (b) série-paralelo com transmissão.

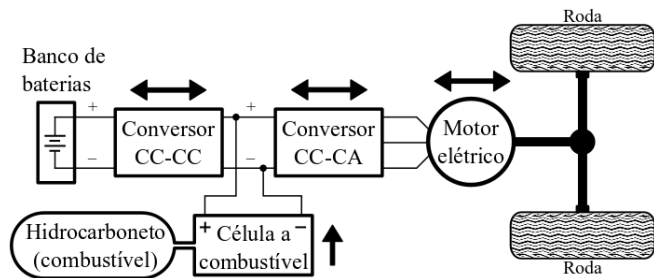


Fig. 5. Configuração do sistema de tração de um FCV.

As células a combustível são classificadas em função do eletrólito que utilizam e também segundo a sua temperatura de operação. Assim, comercialmente, existem diversos tipos de tecnologias disponíveis, onde a mais aplicada em FCVs é a tecnologia de membrana de troca de prótons (*Proton Exchange Membrane* - PEM), que não necessita de altas temperaturas para operar, funcionando à cerca de 80 °C e com partida rápida [12], [13], [17]–[19].

Os HEVs também podem ser denominados de *plug-in hybrid electric vehicle* (PHEV), pois dispõem de uma conexão ou carregador para fazer o carregamento completo das baterias de tração a bordo do mesmo [7], [11]–[13].

As perdas energéticas no ICE quando utiliza os combustíveis fósseis mais comuns citados na Tabela I, é elevada, e pode variar um pouco dependendo do hidrocarboneto utilizado, da eficiência do sistema de transmissão e acoplamentos mecânicos. Contudo, aproximadamente 40 % da energia já é perdida na exaustão dos gases de escape, cerca de 30 % é perdida na refrigeração do motor e, uma pequena parcela são perdas mecânicas por fricção, resultando em uma eficiência

aproximada de 20 % [20]. No entanto, o ICE ainda é largamente utilizado em função de sua elevada autonomia em relação aos EVs, da disponibilidade de petróleo e, de estações de reabastecimento em diversos locais [6].

O sistema híbrido apresenta como vantagens, grande flexibilidade e versatilidade, aumenta a autonomia do veículo, reduz o consumo de combustível, pode ser aplicado a diferentes tipos, portes e modelos de veículos, em geral, no transporte ferroviário e de passageiros, por exemplo.

Apresenta como desvantagem, componentes mecânicos, eletroeletrônicos e sistemas de controle e gerenciamento de energia mais complexos, os quais tornam o custo de fabricação e manutenção dos veículos mais elevado.

Os EVs e HEVs em sua totalidade, independentemente da sua aplicação, podem utilizar para a tração motores elétricos do tipo corrente contínua, motor de indução, motor síncrono de ímãs permanentes e motor de relutância variável, sendo os dois últimos, os mais empregados atualmente [21]–[25].

Na pesquisa, verificou-se os principais EVs e HEVs comercializados mundialmente, e através das informações divulgadas nos websites oficiais das montadoras de automóveis, foi possível montar a Tabela II, que ilustra a capacidade do sistema de tração de alguns veículos. Por meio destas informações, é possível identificar os níveis de potência e tensão de operação de cada sistema de tração e obter os dados para o dimensionamento de conversores que podem ser aplicados a estes sistemas.

TABELA II
Sistema de Tração de Alguns EVs e HEVs
Comercializados

Sistema de tração	Motorização	Baterias para tração	Motor elétrico
Toyota Prius 3ª geração	1.8L, 98hp@5200rpm, e ICE + motor elétrico=134hp	27 kWh (Ni-MH), tensão operação 201,6 V	80 hp (60 kW à 650 V) motor síncrono de ímãs permanentes
Toyota Camry 2012	2.5L, 178hp@6000rpm, e ICE + motor elétrico=200hp	30 kWh (Ni-MH), tensão operação 244,8 V	141 hp (105 kW à 650 V) motor síncrono de ímãs permanentes
Ford Fusion 2012	2.5L, 156hp@6000rpm, e ICE + motor elétrico=191hp	26 kWh (Ni-MH), tensão operação 275 V	106 hp (79 kW) motor síncrono de ímãs permanentes
Chevrolet Volt 2012	1.4L, 83hp, e ICE + motor elétrico=149hp	16 kWh (Li-ion)	74 hp (55 kW) motor de ímãs permanentes
Lexus CT200h 2013	1.8L, 98hp@5200rpm, e ICE + motor elétrico=134 hp	(Ni-MH), tensão operação 201,6 V	80 hp (60 kW à 650 V) motor síncrono de ímãs permanentes
Honda Fit EV 2013	-	20 kWh (Li-ion), tensão operação 331 V	123 hp (92 kW) motor coaxial síncrono de ímãs permanentes
Nissan Leaf 2012	-	24 kWh (Li-ion), tensão operação 360 V	107 hp (80 kW) motor síncrono
Ford Focus 2012	-	23 kWh (Li-ion)	143 hp (107 kW) motor de ímãs permanentes
Tesla Modelo S 60 kWh 2013	-	60 kWh (Li-ion)	302 hp (225 kW pico)
BMW i3 2013	-	18,8 kWh (Li-ion), tensão operação 360 V	168 hp (125 kW)

Para os conversores que são aplicados a bordo destes veículos, os fabricantes priorizam o volume e o rendimento global do sistema de tração, pois estes sistemas representam um peso extra para o veículo transportar [7], [21], [26].

III. CONVERSORES APLICADOS AOS EVS E HEVS

O conversor aplicado ao sistema de tração deve ter a capacidade de operar com fluxo bidirecional de energia, onde a energia pode fluir dos acumuladores de energia e/ou fontes para o motor de tração, ou ainda do motor de tração para os acumuladores durante uma frenagem regenerativa [23], [24]. Além de o conversor conduzir o fluxo de energia entre o motor de tração e o sistema elétrico do veículo, o mesmo possibilita a interconexão entre diferentes níveis de tensão e diferentes fontes de energia a bordo (*on-board*) do veículo.

As topologias de conversores bidirecionais mais utilizados para fazer a carga e descarga dos acumuladores do sistema de tração a bordo do veículo são as topologias tipo Buck, Boost, representadas pelas Figuras 6(a), 6(b) e 6(e), conversor em ponte completa (*Full-bridge*) (Figura 6(c)) e tipo multifásicos (*Multiphase Interleaved converter*) como o conversor da Figura 6(d) que possui ainda os indutores acoplados. As topologias do tipo meia ponte (*Half-bridge*) (Figura 6(f)) e *Push-pull* (Figura 6(g)), também são empregadas, mas para processar menores potências [23], [26]–[35].

O conversor bidirecional em corrente de um braço (Figura 6(e)), é um dos mais comuns e mais empregados no sistema de tração de EVs e HEVs devido ao seu arranjo simples e à sua topologia possuir poucos componentes de potência, aumentando a confiabilidade do conversor. Em HEVs comerciais como o Toyota Prius, o Camry e o Ford Fusion, este conversor é utilizado em seu sistema de tração [26]. Porém há inúmeras derivações deste conversor que podem ser aplicados ao sistema elétrico de tração, como os ilustrados nas Figuras 6(a) e 6(d) [36].

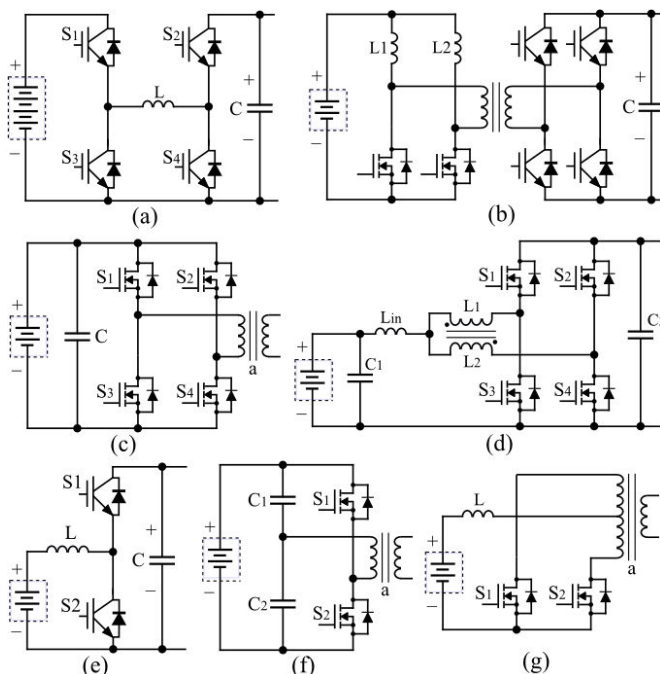


Fig. 6. Conversores CC-CC bidirecionais aplicados a bordo dos EVs e HEVs. (a) Buck-Boost. (b) Interleaved multifásico isolado. (c) Full-Bridge. (d) Interleaved multifásico. (e) Buck e Boost. (f) Half-Bridge. (g) Push-Pull, entrada em corrente.

Conversores multifásicos bidirecionais em corrente, como o protótipo ensaiado neste trabalho, também são estudados e utilizados no sistema de tração veicular por apresentar alto rendimento em elevadas potências, podendo chegar a mais de 97 %, aumentando o rendimento global do sistema e a autonomia do veículo [22], [23], [26].

O conversor ilustrado na Figura 6(b), apresenta a configuração de divisor de corrente de entrada (*Multiphase Interleaved*) ou mesmo duplo Boost (por meios dos indutores L1 e L2) com isolamento por meio de transformador entre a entrada e a saída. É possível aplicar ganho de tensão na etapa boost e também no transformador para obter elevada tensão na saída para baixa tensão na entrada, porém sempre um interruptor precisa estar conduzindo para fornecer um caminho para as correntes dos indutores e, também possui menos semicondutores que a estrutura da Figura 6(c) [23], [28].

Estes conversores, geralmente têm a função de elevar a tensão do banco de baterias para os níveis do barramento CC onde o conversor de tração e as demais cargas de maior potência estão conectadas. Podem adaptar níveis de tensão do lado do banco de baterias, variando entre 100 à 400 V, e do lado do barramento CC, variando entre 100 à 800 V, bem como processar potências médias na faixa de 10 kW à 50 kW, e devem possuir elevado rendimento (> 97 %) [22], [23], [37].

Para tornar os conversores mais eficientes, principalmente em aplicações veiculares para tração elétrica, na grande maioria dos casos, os conversores são projetados para operarem com comutação suave utilizando técnicas para comutar os semicondutores com tensão zero ou corrente zero, ou mesmo tensão e corrente zero, diminuindo assim as perdas de energia durante o funcionamento do mesmo.

Conversores não isolados geralmente são utilizados onde a tensão de saída deve ser elevada ou reduzida a uma proporção relativamente pequena, geralmente menor que 4 vezes, onde não é necessário isolamento galvânica entre a fonte e a carga, e onde a segurança elétrica não é tão exigida [26], [37]–[42].

A arquitetura básica do sistema de alimentação de um EV ou HEV possui como fonte de energia acumuladores ou um gerador central que é responsável por fornecer a energia elétrica ao veículo, tanto para o sistema de tração quanto para as demais cargas, conforme demonstrado na Figura 7 pelos elementos conectados ao barramento CC de alta tensão, onde as setas indicam o sentido do fluxo de energia. Os níveis de tensão e potência processadas pelo sistema elétrico principal são dependentes, basicamente, da tecnologia de acumuladores adotada, sua configuração, e a segurança elétrica do sistema [7].

Em virtude da crescente demanda de energia elétrica nestes veículos, que é provocada pela introdução de mais sistemas elétricos a bordo do mesmo, sua arquitetura de alimentação secundária (que alimenta cargas de baixa potência, e não o sistema de tração) vem sofrendo contínuas alterações em sua configuração, podendo ter dois ou mais barramentos distintos em corrente contínua, e que podem operar com tensões de 14 V, 42 V, ou superiores [7], [14], [15], [24]. Conversores unidirecionais de baixa potência também podem ser utilizados para suprir cargas não

essenciais ao funcionamento do veículo, como sistema de ar condicionado, direção elétrica, entre outras, conforme ilustrado na Figura 7.

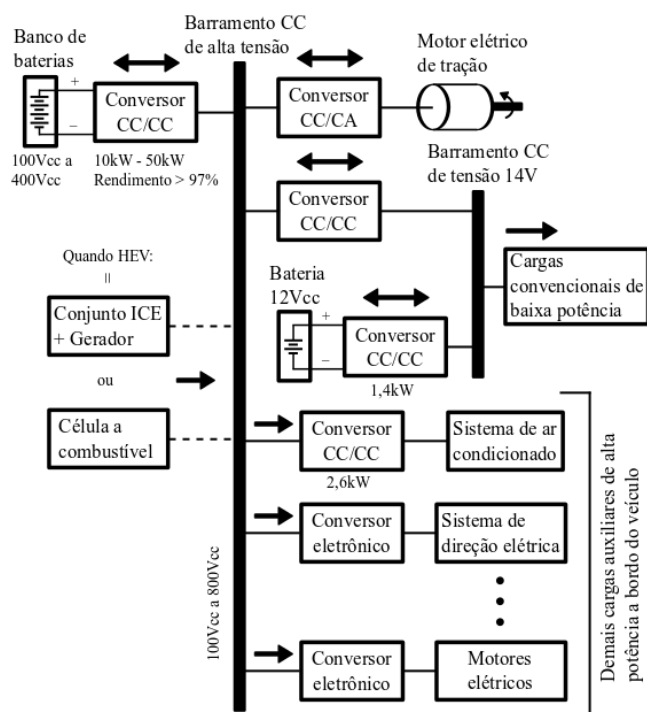


Fig. 7. Representação típica da arquitetura do sistema elétrico de alimentação de um EV ou HEV.

Na Figura 8 é ilustrado o sistema elétrico de tração do HEV utilizado pela Toyota no Camry e Prius, pela Ford no Focus, pela Chevrolet no Volt, e pela Nissan no Leaf para os modelos ano 2009 [27]. Neste sistema, o conversor CC-CC bidirecional é utilizado para conectar o banco de baterias que produz 244 V (Toyota Camry) e 201 V (Toyota Prius) ao barramento CC principal de 650 V onde o motor elétrico de tração e o gerador estão conectados.

É este sistema elétrico principal que drena a maior potência do veículo e que é responsável pela movimentação do mesmo. Os demais circuitos conectados ao barramento CC de alta tensão da Figura 7, são circuitos secundários e que não necessitam de conversores bidirecionais. No barramento CC de 14 V, apesar da representação de conversores bidirecionais, estes podem ser acionados em caso de falha no sistema elétrico principal para suprir cargas de baixa potência, ou equipamentos de segurança a bordo do veículo.

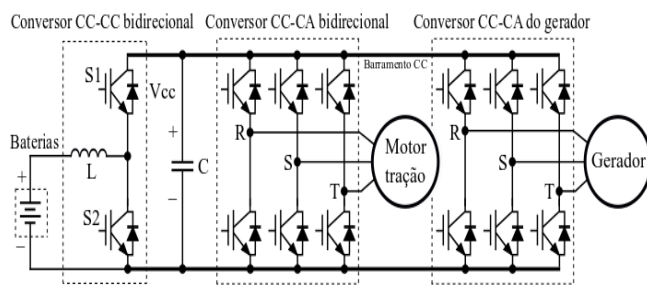


Fig. 8. Sistema elétrico de tração de um HEV.

A. Conversor CC-CC Multifásico Bidirecional em Corrente

Como a energia processada no sistema elétrico de tração dos EVs e HEVs pode ser elevada, o conversor CC-CC multifásico bidirecional em corrente abaixador e elevador de tensão ilustrado na Figura 9, apresenta características favoráveis e atende bem as necessidades da aplicação. Este conversor utiliza múltiplos braços intercalados para dividir a potência total processada entre os mesmos, e é uma alternativa para o conversor CC-CC ilustrado na Figura 8 [43]–[46]. Ele realiza a conexão e conduz o fluxo de energia de forma bidirecional entre as principais fontes de energia a bordo do veículo. Durante o processo de carga dos acumuladores (Baterias), o conversor atua como abaixador de tensão, e quando o sistema necessita da energia armazenada nos acumuladores, o conversor atua como elevador de tensão.

O conversor da Figura 9 possibilita a redução da ondulação da corrente I_{Lo} com o deslocamento de 120° entre os pulsos de comando dos interruptores, onde a potência total processada é dividida entre o número de braços N_f . Permite uma redução do volume dos seus elementos passivos de filtro, melhora a resposta transitória e, apresenta maior rendimento para o processamento de elevada potência ($> 20 \text{ kW}$) quando comparado a uma estrutura de somente um braço (Figura 6(e)) [41]–[45], [47]–[49].

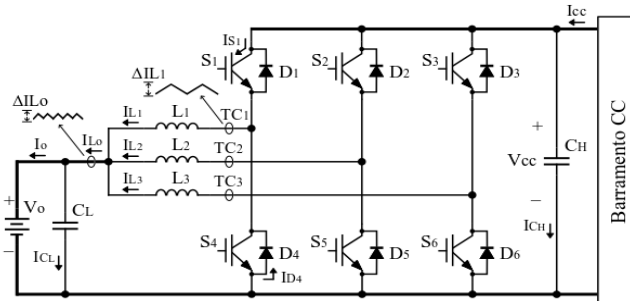


Fig. 9. Estrutura de três braços do conversor bidirecional em corrente.

B. Sentidos de Operação do Conversor

O conversor pode operar como abaixador de tensão (Buck), ou como elevador de tensão (Boost) dependendo de como os interruptores são comandados.

A Figura 10 ilustra o conversor atuando como abaixador de tensão, onde os interruptores S_1, S_2, S_3 e os diodos D_4, D_5, D_6 estão em operação. O banco de baterias é representado pela carga R_o e a fonte V_{cc} conectada ao barramento CC onde o conversor de tração está ligado fornece energia. Neste modo, o sistema de tração regenera energia e carrega as baterias.

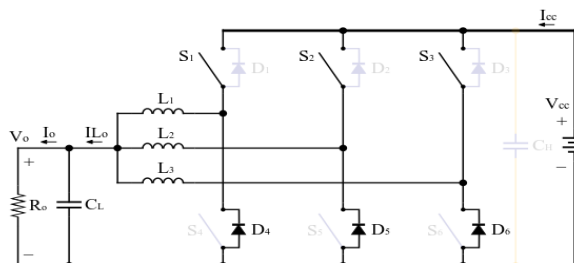


Fig. 10. Conversor atuando como abaixador de tensão.

A Figura 11 ilustra o conversor atuando como elevador de tensão, onde os interruptores S_4 , S_5 , S_6 e os diodos D_1 , D_2 , D_3 estão em operação. O banco de baterias, fonte V_o fornece a energia para o conversor de tração representado pela carga R_{cc} .

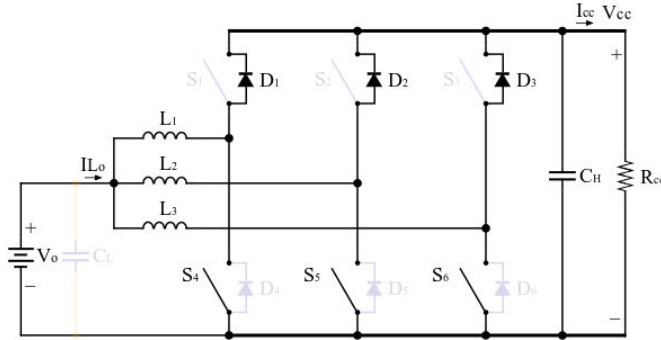


Fig. 11. Conversor atuando como elevador de tensão.

C. Operação no Modo de Condução Contínua

A frequência de ondulação da tensão de saída (V_{cc}) é multiplicada por N_f vezes a frequência de comutação dos interruptores, reduzindo assim a ondulação de tensão e a necessidade de uma maior capacitância de filtro, conforme (2) e (3).

O valor dos elementos passivos do conversor são definidos por:

$$L_{1,2,3} = \frac{V_o(1-\delta)}{N_f \Delta IL_o f_{ch}} \quad (1)$$

$$C_L = \frac{V_o(1-\delta_{buck})}{8L\Delta V_o(N_f \cdot f_{ch})^2} \quad (2)$$

$$C_H = \frac{I_{cc}(1-\delta_{boost})}{N_f \Delta V_{cc} f_{ch}} \quad (3)$$

$$\delta_{buck} = \frac{V_o}{V_{cc}}; \quad \delta_{boost} = 1 - \frac{V_o}{V_{cc}} \quad (4)$$

$$\Delta IL_1 = N_f \Delta IL_o \quad (5)$$

$$f_{ondula} = N_f f_{ch} \quad (6)$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{eq} \cdot C}} \quad (7)$$

onde L_{eq} é a indutância equivalente da associação em paralelo entre L_1 e L_2 quando há, simultaneamente, corrente circulando nas mesmas.

Ao dimensionar os capacitores de filtro, é necessário verificar a frequência de corte formada pelo filtro $L_{eq}C$ de ambos os modos de operação, conforme equação (7), pois seu valor deve ser inferior à frequência de comutação adotada no projeto $f_o < f_{ch}$. A relação de grandeza pode ser de 10 vezes para um projeto conservador, onde a frequência de corte do filtro deve ser, aproximadamente, dez vezes menor do que a frequência de comutação para evitar ressonâncias [50].

IV. EXPERIMENTAÇÃO E DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO

Os resultados experimentais foram obtidos para as especificações descritas na Tabela III.

TABELA III
Parâmetros Utilizados no Dimensionamento do Protótipo

Potência de saída bidirecional	$P = 6 \text{ kW}$
Número de braços	$N_f = 3$
Frequência de comutação	$f_{ch} = 20 \text{ kHz}$
Tensão da bateria	$V_o = 250 \text{ V} \pm 20\%$
Ondulação de tensão da bateria	$\Delta V_o = 5\%$
Tensão do barramento CC	$V_{cc} = 600 \text{ V} \pm 20\%$
Ondulação do barramento CC	$\Delta V_{cc} = 5\%$
Ondulação de corrente da bateria	$\Delta IL_o = 10\%$

A montagem do circuito de potência e disparo dos interruptores foi realizada sobre um dissipador de alumínio único com ventilação forçada tipo axial, conforme Figura 12.

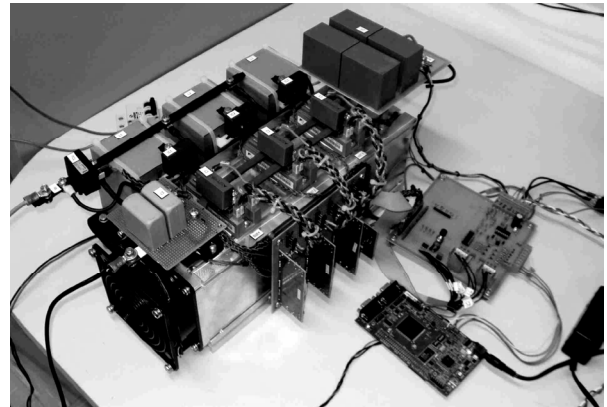


Fig. 12. Foto do circuito de potência e circuitos auxiliares do protótipo ensaiado.

O conversor ensaiado foi montado com os componentes listados na Tabela IV.

TABELA IV
Lista dos Principais Componentes do Conversor

Elemento	Valor	Quantidade	Modelo
C_L	22 μF / 450 V	2	P1848622454P4
C_H	35 μF / 450 V	4	B32678G4356K
L	1,14 mH, 11 A	3	NEE76 / 50 / 76, IP12R
IGBT	100 A / 1200 V	3	2MB1100U4A-120
C	Snubber	3	B32656S7224K564
Driver	-	3	DRO100D25A
TC	Sensor corrente	3	LA55 - P / SP1
Dissipador	-	350 mm	KM20

Como carga, foram utilizados resistores de fio de potência, e a fonte de tensão utilizada é modelo TCY 500-40LA1A da TECTROL. Todos os ensaios elétricos foram realizados em malha aberta. A geração e deslocamento dos pulsos de comando foram realizados utilizando a plataforma micro processada modelo eZdsp TMS320F28335 da Texas Instruments.

A. Resultados do Conversor Atuando como Elevador de Tensão

Na Figura 13, apresenta-se a tensão de comando no interruptor S_4 e as três correntes elétricas nos indutores L_1 , L_2 e L_3 . É possível observar o deslocamento de 120° entre as correntes dos indutores, e que operam em condução contínua com $V_o = 250$ V e $V_{cc} = 600$ V. A corrente dos indutores não se divide igualmente em função do conversor estar operando em malha aberta. Este desequilíbrio ocorre em função das pequenas variações e atrasos entre as razões cíclicas que acionam os interruptores, em função dos desvios e diferenças na impedância e indutância dos indutores, e da diferença de energia armazenada em cada indutor durante o intervalo de condução dos respectivos interruptores.

Os valores de corrente registradas na Figura 13 são: Indutor L_1 com $I_M = 11,3$ A, $I_m = 4$ A e, $\Delta I_{L1} = 7,3$ A; Indutor L_2 com $I_M = 15,6$ A, $I_m = 8,3$ A e, $\Delta I_{L2} = 7,3$ A; Indutor L_3 com $I_M = 9,6$ A, $I_m = 2,3$ A e, $\Delta I_{L3} = 7,3$ A.

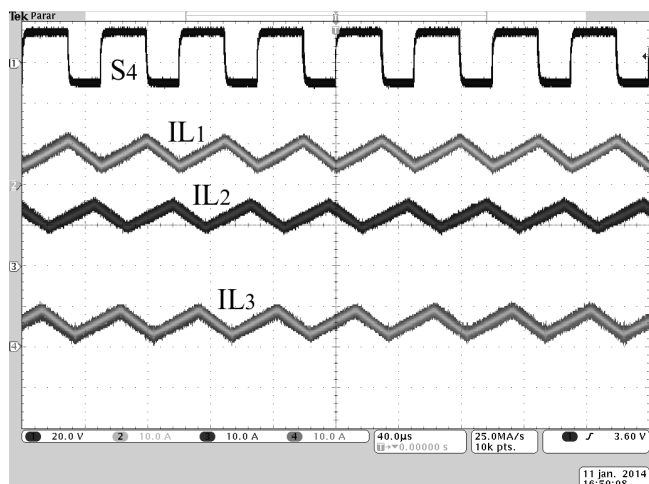


Fig. 13. Tensão de comando de S_4 e correntes através dos indutores L_1 , L_2 e L_3 , respectivamente.

Na Figura 14, apresenta-se a tensão V_{cc} e a corrente I_{cc} na carga, a tensão da fonte V_o e, a corrente I_{L_o} quando o conversor opera com potência média de 6,5 kW. O valor médio de corrente elétrica I_{L_o} é de 24,5 A, onde o valor máximo é $I_M = 25,6$ A e o valor mínimo é $I_m = 23,3$ A, resultando em uma ondulação de $\Delta I_{L_o} = 2,3$ A, portanto, esse valor de ondulação permaneceu dentro da faixa dos 10 % predeterminados no projeto para I_o . A corrente I_{L_o} apresenta uma frequência de ondulação (f_{ondula}) de três vezes a frequência de comutação dos interruptores.

A Figura 15 ilustra a tensão de comando, a tensão de coletor-emissor e a corrente em S_4 . O pico de corrente de 26,8A registrado no interruptor, é ocasionado pela

recuperação reversa do diodo D_1 . A máxima tensão de bloqueio do interruptor é de 620 V.

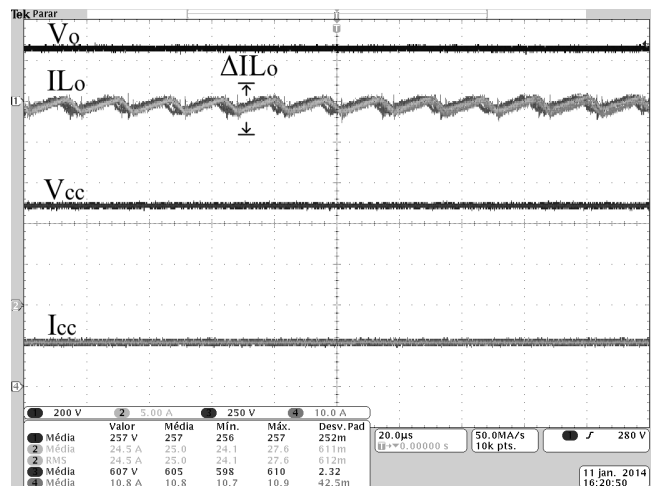


Fig. 14. Tensão de entrada V_o , corrente I_{L_o} tensão V_{cc} , e corrente na carga I_{cc} .

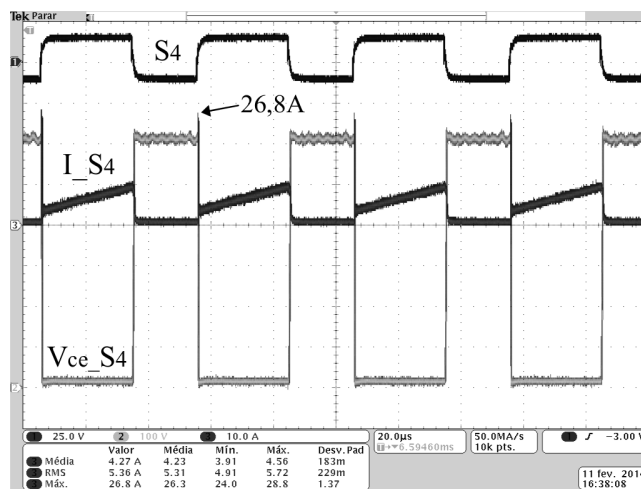


Fig. 15. Formas de onda em S_4 : tensão de comando, tensão de bloqueio e corrente em S_4 .

Na Figura 16, são ilustradas a tensão de comando no interruptor S_4 e a tensão e a corrente em D_1 . O pico de corrente de aproximadamente -20 A registrado é ocasionada pela recuperação reversa do diodo e a máxima tensão reversa de bloqueio sobre ele é de -610 V.

Pode-se prever o rendimento instantâneo do conversor em condições nominais na Figura 17. A potência média de entrada está em 6,32 kW e a de saída em 6,0 kW, resultando em um rendimento aproximado de 94,9 %.

B. Resultados do Conversor Atuando como Abaixador de Tensão

Todas as formas de onda apresentadas neste item, onde o conversor atuou como abaixador de tensão, foram obtidas com a tensão de alimentação em seu valor mínimo, ou seja, $V_{cc} = 480$ V.

Na Figura 18, são apresentadas a tensão de comando no interruptor S_1 e as três correntes nos indutores L_1 , L_2 e L_3 . As correntes dos indutores também apresentam deslocamento

de 120° entre si e operam em condução contínua com tensão de saída $V_o = 250$ V. Os valores de corrente são: Indutor L_1 com $I_M = 9,6$ A, $I_m = 4$ A e, $\Delta I_{L1} = 5,6$ A; Indutor L_2 com $I_M = 10$ A, $I_m = 4,5$ A e, $\Delta I_{L2} = 5,5$ A; Indutor L_3 com $I_M = 13$ A, $I_m = 7$ A e, $\Delta I_{L3} = 6$ A.

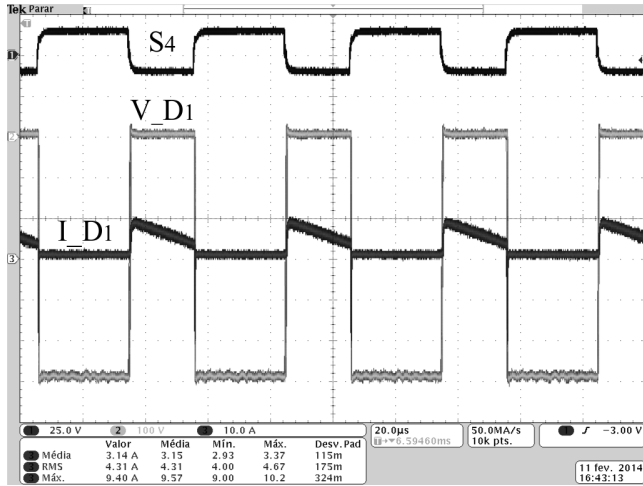


Fig. 16. Tensão de comando em S_4 , tensão e corrente em D_1 .

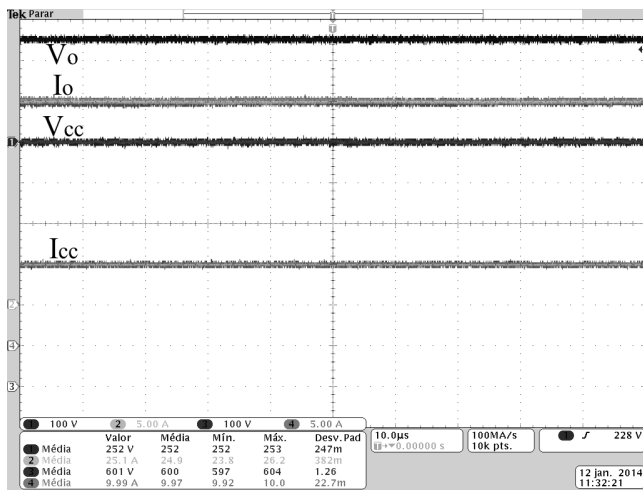


Fig. 17. Potências instantâneas de entrada e de saída do conversor.

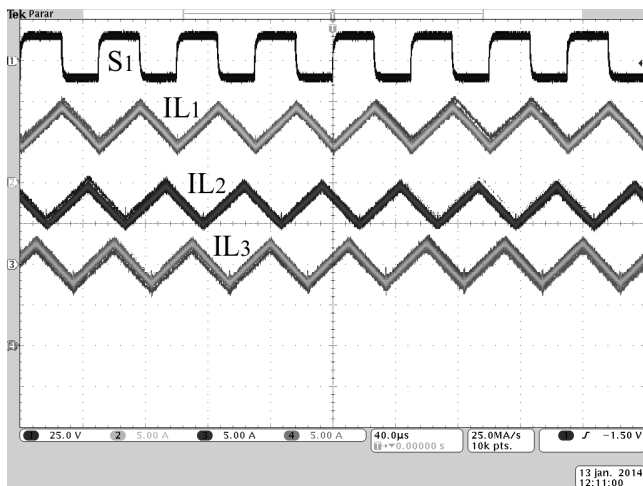


Fig. 18. Tensão de comando de S_1 e correntes através dos indutores L_1 , L_2 e L_3 .

Na Figura 19, são apresentados os três sinais de comando dos interruptores S_1 , S_2 , S_3 e a corrente I_{L_o} quando o conversor opera com potência média de 6 kW. O valor médio de corrente elétrica I_{L_o} é de 23,8 A, onde o valor máximo é $I_M = 25,1$ A e o valor mínimo é $I_m = 22,5$ A, resultando em uma ondulação de $\Delta I_{L_o} = 2,6$ A, ou cerca de 10,9 %, portanto, esse valor de ondulação ficou pouco acima da faixa especificada para I_o por estar operando com tensão mínima de entrada. A corrente I_{L_o} também apresenta uma frequência de ondulação de três vezes a frequência de comutação dos interruptores.

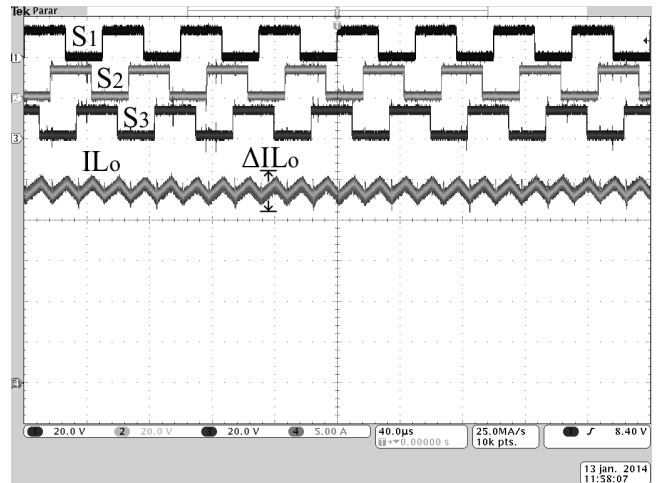


Fig. 19. Tensões de comando de S_1 , de S_2 e de S_3 e corrente da carga.

A Figura 20 ilustra a tensão de comando, a tensão de coletor-emissor e a corrente em S_1 . O pico de corrente de 41,4A registrado no interruptor é ocasionado pela recuperação reversa do diodo D_4 e a máxima tensão de bloqueio do interruptor é de 520 V.

Na Figura 21 são ilustradas a tensão de comando no interruptor S_1 e a tensão e a corrente em D_4 . O pico de corrente de aproximadamente -28 A registrado é ocasionado pela recuperação reversa do diodo e a máxima tensão reversa de bloqueio sobre ele é de -500 V.

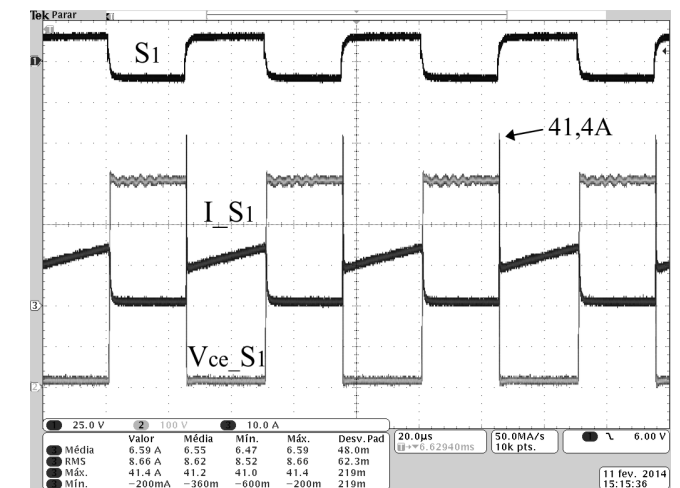


Fig. 20. Formas de onda em S_1 : tensão de comando, tensão de bloqueio e corrente em S_1 .

V. CONCLUSÃO

O rendimento instantâneo do conversor atuando como abaixador de tensão é ilustrado na Figura 22. A potência média de entrada está em 6,51 kW e a de saída em 6,24 kW, resultando em um rendimento aproximado de 95,7 %.

Neste artigo foram revisados os conceitos envolvendo os sistemas de processamento de energia em EVs e HEVs. Com o principal objetivo de servir como um tutorial sobre o tema no âmbito da SOBRAEP, destacando-se os relacionados à implementação de um conversor CC-CC multifásico, bidirecional em corrente, operando em malha aberta.

De acordo com os resultados experimentais obtidos, o conversor CC-CC desenvolvido apresenta grande potencial para o processamento de elevada energia no sistema elétrico de EVs e HEVs onde, possibilita a redução da ondulação de corrente drenada/fornecida dos/aos acumuladores e requer capacitores de filtro de menor valor, permitindo melhorar a resposta dinâmica do conversor e a redução do volume dos mesmos. No entanto, observou-se a presença de desequilíbrio nas corrente dos indutores, que pode ser eliminado com a aplicação de malha de controle de corrente para uma igual divisão e ajuste das correntes dos indutores. Com a utilização de outras tecnologias mais modernas de materiais magnéticos, semicondutores e técnicas de comutação suave, é possível elevar a frequência de comutação para se obter a redução dos elementos passivos do conversor e otimizar seu volume e peso.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos programas de pós-graduação em engenharia elétrica da FURB e da UDESC e a FITEJ pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] B. M. da Saúde, “Mudanças climáticas e ambientais e seus efeitos na saúde: cenário e incertezas para o brasil”, *Organização Pan-Americana da Saúde*, 2008.
- [2] A. Emadi, K. Rajashekara, S. Williamson, S. Lukic, “Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 54, no. 3, pp. 763-770, May 2005.
- [3] M. Yilmaz, P. T. Krein, “Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 5, pp. 2151-2169, May 2013.
- [4] J. Cao, A. Emadi, “Batteries need electronics”, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 5, no. 1, pp. 27-35, March 2011.
- [5] J. Cao, A. Emadi, “A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid and plug-in hybrid electric vehicles”, *IEEE Transactions on Power Electronics* vol. 27, no. 1, pp. 122-132, January 2012.
- [6] S. Wirasingha, R. Gremban, A. Emadi, “Source-to-wheel (stw) analysis of plug-in hybrid electric vehicles”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 316-331, March 2012.
- [7] A. Emadi, S. Williamson, A. Khaligh, “Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric,

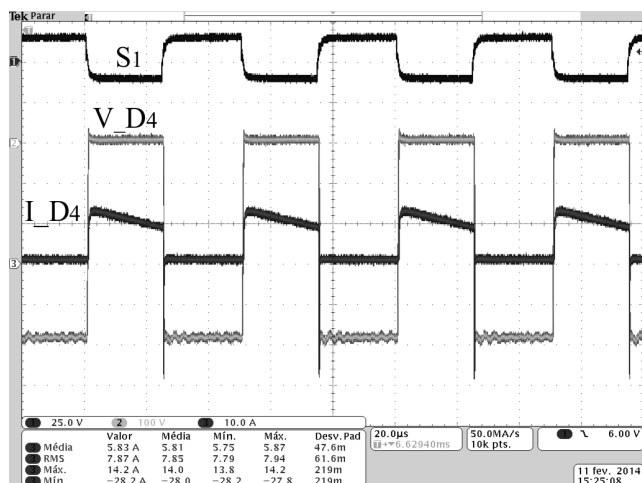
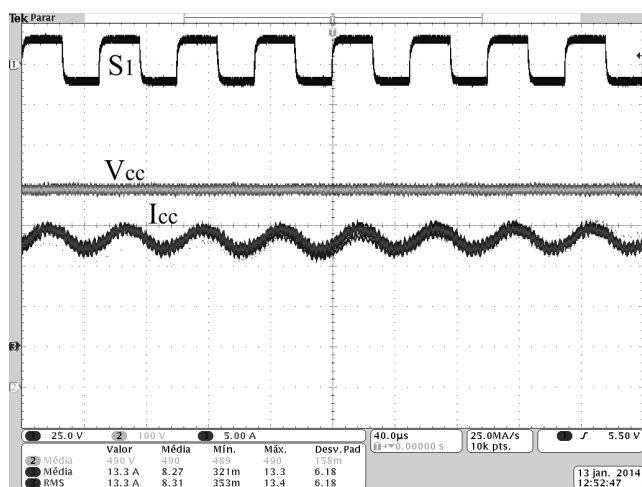
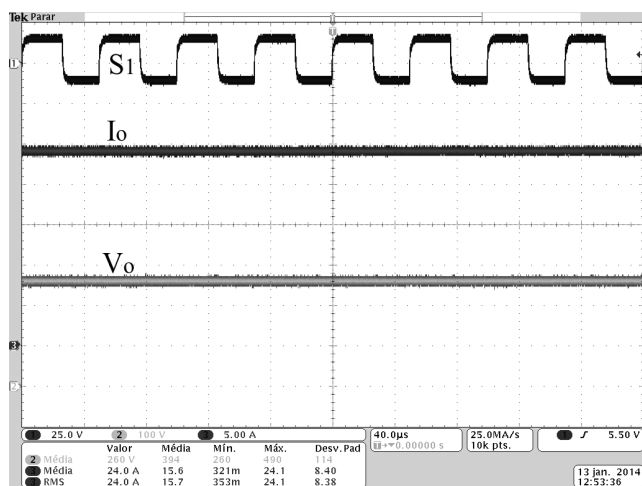


Fig. 21. Tensão de comando em S1, tensão e corrente em D4.



(a)



(b)

Fig. 22. (a) Potência instantânea de entrada, e (b) de saída.

- and fuel cell vehicular power systems”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 3, pp. 567-577, May 2006.
- [8] C. Chan, A. Bouscayrol, K. Chen, “Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 2, pp. 589-598, February 2010.
- [9] S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodrigues, A. Emadi, “Energy storage systems for automotive applications”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 6, pp. 2258-2267, June 2008.
- [10] S. Dusmez, A. Cook, A. Khaligh, “Comprehensive analysis of high quality power converters for level 3 off-board chargers”, in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pp. 1-10, 2011.
- [11] J. Bauman, M. Kazerani, “A comparative study of full-cell-battery, full-cell-ultracapacitor, and full-cell-battery-ultracapacitor vehicles”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 2, pp. 760-769, March 2008.
- [12] P. Thounthong, V. Chunkag, P. Sethakul, B. Davat, M. Hinaje, “Comparative study of fuel-cell vehicle hybridization with battery or supercapacitor storage device”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 8, pp. 3892-3904, October 2009.
- [13] R. Ghorbani, E. Bibeau, S. Filizadeh, “On conversion of hybrid electric vehicles to plug-in”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 4, pp. 2016-2020, May 2010.
- [14] A. Kawahashi, “A new-generation hybrid electric vehicle and its supporting power semiconductor devices”, in *Proc. of International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, pp. 23-29, 2004.
- [15] A. Emadi, Y. Lee, K. Rajashekara. “Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 6, pp. 2237-2245, June 2008.
- [16] M. Ehsani, Y. Gao, J. Miller, “Hybrid electric vehicles: Architecture and motor drives”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 719-728, 2007.
- [17] S. Williamson, M. Lukic, A. Emadi, “Comprehensive drive train efficiency analysis of hybrid electric and fuel cell vehicles based on motor-controller efficiency modeling”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 3, pp. 730-740, May 2006.
- [18] A. Rathore, U. Prasanna, “Comparison of softswitching voltage-fed and current-fed bi-directional isolated dc/dc converters for fuel cell vehicles”, in *Proc. of International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 252-257, 2012.
- [19] G. Preetham, W. Shirren, “Photovoltaic charging station for plug-in hybrid electric vehicles in a smart grid environment”, in *Proc. of Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, pp. 1-8, 2012.
- [20] K. T. Chau, C. C. Chan, “Emerging energy-efficient technologies for hybrid electric vehicles”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 821-835, 2007.
- [21] M. Zandi, A. Payman, J. Martin, S. Pierfederici, B. Davat, and F. Meibody-Tabar, “Energy management of a fuel cell/supercapacitor/battery power source for electric vehicular applications”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 2, pp. 433-443, February 2011.
- [22] J. Estima, A. J. Marques Cardoso, “Efficiency analysis of drive train topologies applied to electric/hybrid vehicles”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 3, pp. 1021-1031, March 2012.
- [23] J. Lai and D. Nelson, “Energy management power converters in hybrid electric and fuel cell vehicles”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 766-777, 2007.
- [24] M. Kumari, P. Thakura, D. Badodkar, “Role of high power semiconductor devices in hybrid electric vehicles”, in *Proc. of India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, pp. 1-7, 2011.
- [25] M. Zeraoulia, M. Benbouzid, D. Diallo, “Electric motor drive selection issues for hev propulsion systems: A comparative study”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, no. 6, pp. 1756-1764, November 2006.
- [26] W. Qian, H. Cha, F. Peng, L. Tolbert, “55-kw variable 3x dc-dc converter for plug-in hybrid electric vehicles”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 4, pp. 1668-1678, April 2012.
- [27] S. Chandrasekaran, L. Gokdere, “Integrated magnetics for interleaved dc-dc boost converter for fuel cell powered vehicles”, in *Proc. of Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, pp. 356-361, 2004.
- [28] S. V. G. Oliveira, I. Barbi, “A three-phase step-up dc-dc converter with a three-phase high-frequency transformer for dc renewable power sources applications”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 8, pp. 3567-3580, August 2011.
- [29] F. J. Bryan, A. J. Forsyth “A power dense dc-dc converter for a small electric vehicle”, in *Proc. of International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD)*, pp. 1-6, 2012.
- [30] M. C. B. P. Rodrigues, J. G. Oliveira, A. A. Ferreira, P. G. Barbosa, H. A. C. Braga, “Conexão De Veículos Elétricos À Rede De Energia Elétrica Para Recarga De Baterias: Uma Visão Geral”, *Revista de Eletrônica Sobreap*, Vol. 19-No.2 maio 2014.
- [31] W. Liu, J. Chen, T. Liang, R. Lin, C. Liu, “Analysis, design, and control of bidirectional cascaded configuration for a fuel cell hybrid power system”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 6, pp. 1565-1575, June 2010.
- [32] O. Laldin, M. Moshirvaziri, O. Trescases, “Predictive algorithm for optimizing power flow in hybrid ultracapacitor/battery storage systems for light electric vehicles”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 8, pp. 3882-3895, August 2013.
- [33] T. Bhattacharya, V. S. Giri, K. Mathew, L. Umanand, “Multiphase bidirectional flyback converter topology for hybrid electric vehicles”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 1, pp. 78-84, January 2009.
- [34] C. Zhao, S. Round, J. W. Kolar, “Buck and boost start-up operation of a three-port power supply for hybrid vehicle

- application”, in *Proc. of Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, pp. 1851-1857, 2005.
- [35] Y. Du, S. Lukic, B. Jacobson, A. Huang, “Review of high power isolated bi-directional dc-dc converters for phev/ev dc charging infrastructure”, in *Proc. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 553-560, 2011.
- [36] F. E. O. Barrozo, R. P. T. Bascope, R. S. T. Pontes, D. L. Ferreira, “Conversor bidirecional baseado na célula de três estados para aplicação em veículos elétricos”, in *Proc. of IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, pp. 1-6, 2010.
- [37] O. Hegazy, J. Van Mierlo, P. Lataire, “Analysis, modeling, and implementation of a multidevice interleaved dc/dc converter for fuel cell hybrid electric vehicles”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 4445-4458, November 2012.
- [38] D. Bellur, M. Kazimierczuk, “Dc-dc converter for electric vehicle applications”, in *Proc. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*, pp. 286-293, 2007.
- [39] H. Karshenas, H. Daneshpajoo, A. Safaei, A. Bakhshai, P. Jain, “Basic families of medium-power soft-switched isolated bidirectional dc-dc converters”, in *Proc. of Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*, pp. 92-97, 2011.
- [40] F. Peng, H. Li, G. Su, and J. Lawler, “A new zvs bidirectional dc-dc converter for fuel cell and battery application”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 1, pp. 54-65, January 2004.
- [41] C. Zhao, S. Round, J. Kolar, “An isolated three-port bidirectional dc-dc converter with decoupled power flow management”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 5, pp. 2443-2453, September 2008.
- [42] F. H. Khan, L. M. Tolbert, W. E. Webb, “Hybrid electric vehicle power management solutions based on isolated and nonisolated configurations of multilevel modular capacitor-clamped converter”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 8, pp. 3079-3095, August 2009.
- [43] O. García, P. Zumel, A. Castro, J. A. Cobos, “Automotive dc-dc bidirectional converter made with many interleaved buck stages”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 3, pp. 578-586, May 2006.
- [44] M. Kazimierczuk, *Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters*, Wiley and Sons, 2008.
- [45] L. Ni, J. D. Patterson, L. J. Hudgins, “High power current sensorless bidirectional 16-phase interleaved dc-dc converter for hybrid vehicle application”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 3, pp. 1141-1151, March 2012.
- [46] H. Plesko, J. Biela, J. Luomi, J. W. Kolar, “Novel concepts for integrating the electric drive and auxiliary dc-dc converter for hybrid vehicles”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 6, pp. 3025-3034, November 2008.
- [47] M. A. Sakka, J. V. Mierlo, H. Gualous, “Efficiency optimization of a 30kw interleaved 4-channels dc/dc converter with variable number of active channels”, in *Proc. of European Conference on Power Electronics and Application (EPE)*, pp. 1-8, 2011.
- [48] M. A. Sakka, J. V. Mierlo, H. Gualous, P. Lataire “Comparison of 30kw dc/dc converter topologies interfaces for fuel cell in hybrid electric vehicle”, in *Proc. of European Conference on Power Electronics and Application (EPE)*, pp. 1-10, 2009.
- [49] J. Zhang, J. Lai, R. Kim, W. Yu, “High-power density design of a soft-switching high-power bidirectional dc-dc converter”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 4, pp. 1145-1153, July 2007.
- [50] I. Barbi, D. C. Martins, *Conversores CC-CC básicos não isolados*, 2nd ed, Editora dos autores, 2006.

DADOS BIOGRÁFICOS

Robson Mayer, nascido em Saudades/SC, em 1985 é engenheiro eletricitista (2010) pelo Centro Universitário de Jaraguá do Sul e mestre em Engenharia Elétrica (2014) pela Universidade Regional de Blumenau. Suas áreas de interesse são em eletrônica de potência e compreendem: conversores cc-cc bidirecionais, conversores aplicados aos veículos elétricos e veículos elétricos híbridos. Msc. Mayer é membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP).

Adriano Péres, nasceu em Biguaçu, SC, Brasil em 1969. Obteve o diploma de engenheiro eletricitista em 1991 pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, o de mestre em 1993 e o de doutor em 2000, ambos pelo Instituto de Eletrônica de Potência da UFSC, Florianópolis, SC, Brasil. É professor do Departamento de Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Regional de Blumenau (FURB), SC, desde 1994, onde atua no Grupo de Processamento Eletrônico de Energia. É associado ao CREA/SC, gozando de plenos direitos profissionais na área de Engenharia Elétrica. É membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP), da Associação Brasileira de Educação em Engenharia e do IEEE. Suas áreas de interesse compreendem: eficiência energética, qualidade de energia, condicionadores de fator de potência, geração de energia solar fotovoltaica e educação em engenharia.

Sérgio Vidal Garcia Oliveira, nascido em Lages/SC, em 1974, Recebeu o título de engenheiro eletricitista da FURB em 1999 e os de Mestre e de Doutor da UFSC em 2001 e 2006, respectivamente. É professor da UDESC-Joinville em tempo integral e, em tempo parcial, na FURB. É pesquisador nos seguintes tópicos: conversores CA-CA e CC-CC, acionamentos elétricos, sistemas de geração distribuída de energia, qualidade e eficiência energética, conversores estáticos aplicados nos carros híbridos e sistemas embarcados. É membro da SOBRAEP, da SBA, da PELS, da IES, da IAS e da VTS.