

# OS SUPERCAPACITORES E SUA APLICAÇÃO EM MICRO REDES E VEÍCULOS ELÉTRICOS ATRAVÉS DE CONVERSOR C.C.-C.C. BOOST BIDIRECIONAL ENTRELACADO

Rodnei Regis de Melo – rodnei.melo@ifce.edu.br  
Fernando Luiz Marcelo Antunes – fantunes@dee.ufc.br  
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

**Resumo.** Este artigo tem como objetivo principal apresentar uma revisão bibliográfica sobre os Supercapacitores e sua aplicação como fonte de suprimento de energia em Micro Redes e Veículos Elétricos. É abordada também a identificação de topologias dos conversores c.c.-c.c. que vêm sendo empregado para processar de modo eficiente o fluxo de energia elétrica nestes dispositivos. Finalmente é apresentado o projeto de um conversor c.c.-c.c. bidirecional de 2 kW para conectar o Módulo de Supercapacitores de 165 F e 48 V a um barramento c.c. de distribuição de energia elétrica de 96 V, comum em sistemas de alimentação de veículos elétricos. O projeto do conversor é validado por simulação.

**Palavras-chave:** Supercapacitores, Micro Redes, Veículos Elétricos, conversores c.c.-c.c.

## 1. INTRODUÇÃO

Os capacitores, dispositivos elétricos que há décadas estão disponíveis no mercado, são responsáveis por armazenamento de energia em pequena quantidade e podem ser descarregados e recarregados centenas de milhares de vezes. A nanotecnologia permitiu o surgimento de capacitores que armazenam centenas de vezes mais energia por unidade de volume ou de massa do que os capacitores tradicionais. Esta nova geração de armazenamento de energia, chamada de Supercapacitores, é uma versão de alta energia dos capacitores comuns, ou seja, são dispositivos armazenadores de energia elétrica capazes de oferecer alta potência e alta energia quando comparados aos capacitores comuns e baterias. Os Supercapacitores recebem este nome por apresentar capacitâncias da ordem de milhares de faradays, algo impossível para capacitores convencionais (Ferreira e Pomílio, 2005).

Esta caracterização tem sido cada vez mais explorada, aliada com a eletrônica de potência, na melhoria do desempenho de sistemas como as Micro Redes (MRs) e os Veículos Elétricos (VEs) (Bingbing et al., 2010), (Ehsani et al., 2004), (Ferreira e Pomílio, 2005), (Lukic et al., 2008), (Sathishkumar, et al., 2012). Em tais sistemas os Supercapacitores (SCs) têm se tornados fundamentais para a manutenção do equilíbrio dos seus respectivos barramentos c.c. Nesta perspectiva é feita uma avaliação de estruturas topológicas e apresentado o projeto de um conversor c.c.-c.c. bidirecional de 2 kW para conectar o Módulo de Supercapacitores de 165 F e 48 V a um barramento c.c. de distribuição de energia elétrica de 96 V, comum em sistemas de alimentação de veículos elétricos. Sua validação é feita por simulação.

## 2. ASPECTOS BÁSICOS

Nos últimos anos os Supercapacitores vêm apresentando grandes evoluções. Estes dispositivos são caracterizados por sua resistência interna (ESR) muito baixa, permitindo-lhes fornecer corrente de pico na demanda e capazes de armazenar grandes quantidades de carga em curto intervalo de tempo. Utilizando alta tecnologia no processo de fabricação foi criado um sistema de armazenamento de energia de estado sólido e recarregável feito à base de nanotubos de carbono. Assim, desenvolveu-se um material à base de óxidos que substitui totalmente o eletrólito líquido. E isto foi constituído em nanoescala, disponibilizando grande área de superfície para o acúmulo dos elétrons e o excepcional aumento da capacitância - e poucas estruturas conhecidas disponibilizam tanta área superficial em um espaço extremamente reduzido quanto os nanotubos de carbono (Halper e Ellenbogen, 2006), (Maxwell, 2009).

Os Supercapacitores ou Capacitores Elétricos de Dupla Camada (EDLCs) são componentes que mantêm centenas de vezes mais energia do que um capacitor padrão, como uma bateria, mantendo a capacidade de carga e descarga rápidas (LS, 2013), (Lukic et al., 2008), (Maxwell, 2009), (Nesscap, 2013).

O armazenamento de um capacitor padrão é feito através do material dielétrico entre suas placas que podem ser polarizadas sobre a aplicação de um campo elétrico. À medida que os dipolos internos se alinham dentro do dielétrico, um campo elétrico é estabelecido. Quanto maior as placas de carga contida maior a capacitância, e a energia armazenada (em Joules) é igual a (Halper e Ellenbogen, 2006), (Maxwell, 2009):

$$E = \frac{1}{2} \times C \times V^2 \quad (1)$$

em que C é a capacitância (em Farads) e V é a tensão (em Volts).

Supercapacitores atingem o mesmo resultado, mas por separação em massa e movimento de cargas, em vez de alinhamento dielétrico de dipolo. O mecanismo para mover cargas opostas para diferentes lados de um separador é de natureza eletroquímica e muito semelhante à tecnologia de bateria, porém não é uma reação química. A Fig. 1 mostra um esquema da estrutura de um Supercapacitor (LS, 2013).

A rapidez com que a energia armazenada pode ser libertada depende da resistência interna do dispositivo. A evolução de novos materiais tem permitido o desenvolvimento de dispositivos de baixa ESR, ideais para aplicações de descargas rápidas (Halper e Ellenbogen, 2006).

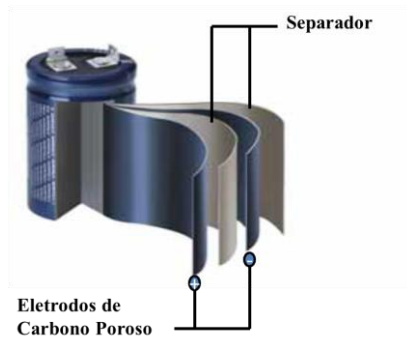


Figura 1 - Esquemático mostrando a estrutura de um Supercapacitor.

A elevada densidade de potência e o baixo tempo de carga e descarga do SC devem-se ao arranjo do baixo ESR e a indutância muito baixa.

Existem vários métodos para testar, medir e calcular a capacitância e ESR, mas todos os métodos são baseados no mesmo pressuposto em que o supercapacitor pode ser representado por um simples circuito RC. A Fig. 2 mostra esta equivalência (Ehsani et al., 2004), (Kloetzel e Gerling, 2011), (Martin e Martin, 2008).

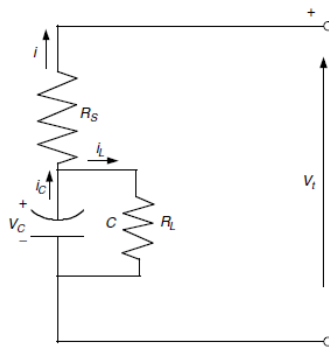


Figura 2 - Circuito equivalente de um Supercapacitor.

Tendo em vista o circuito apresentado, o SC basicamente se caracteriza pela sua capacitância através de seu potencial elétrico  $V_c$ ; a resistência série equivalente  $R_s$  (ESR) que é a responsável pelas perdas e a resistência de fuga do dielétrico  $R_L$  (Ehsani et al., 2004), (Martin e Martin, 2008). A nova versão do Matlab R2013b (MathWorks, 2013) apresenta um modelo genérico do Supercapacitor, conforme a Fig. 3, através de um bloco a ser parametrizado.

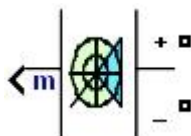


Figura 3 – Bloco Supercapacitor do Matlab versão R2013b.

Este modelo destaca alguns pressupostos tais como: resistência interna e capacitância são assumidos constantes durante a carga e os ciclos de descarga; o modelo não leva em conta efeito da temperatura; nenhum efeito de envelhecimento é tomado em consideração; redistribuição de carga é a mesma para todos os valores de tensão. A Fig. 4 apresenta as tabelas de parametrização do Bloco Supercapacitor (MathWorks, 2013).

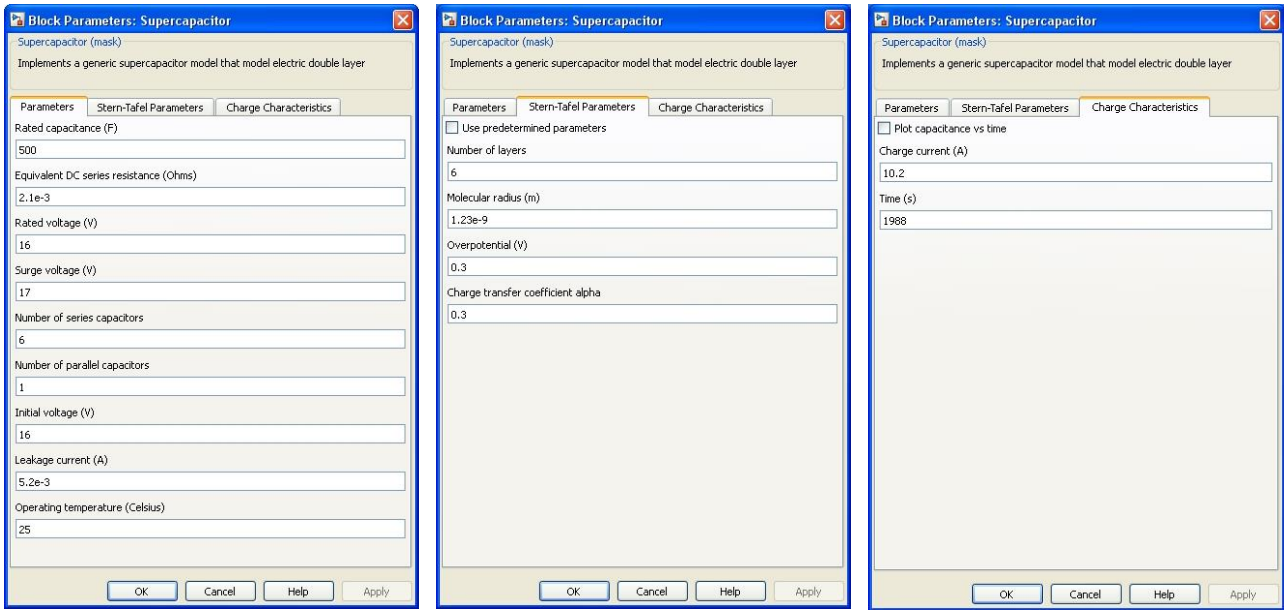


Figura 4 – Parâmetros do Bloco Supercapacitor.

Após a parametrização é possível plotar três gráficos e visualizar o comportamento do Supercapacitor. O primeiro gráfico representa a capacitância em função de tempo, o segundo gráfico representa a tensão em função do tempo e o terceiro representa a corrente em função do tempo.

A Fig. 5 mostra o comportamento gráfico adquirido após fazer a parametrização do Bloco Supercapacitor no Matlab R2013b usando os valores característicos de um Módulo de Supercapacitores de 165 F e 48 V. A tensão inicial adotada é de 24 V. A corrente de carga é fixada em 20 A.

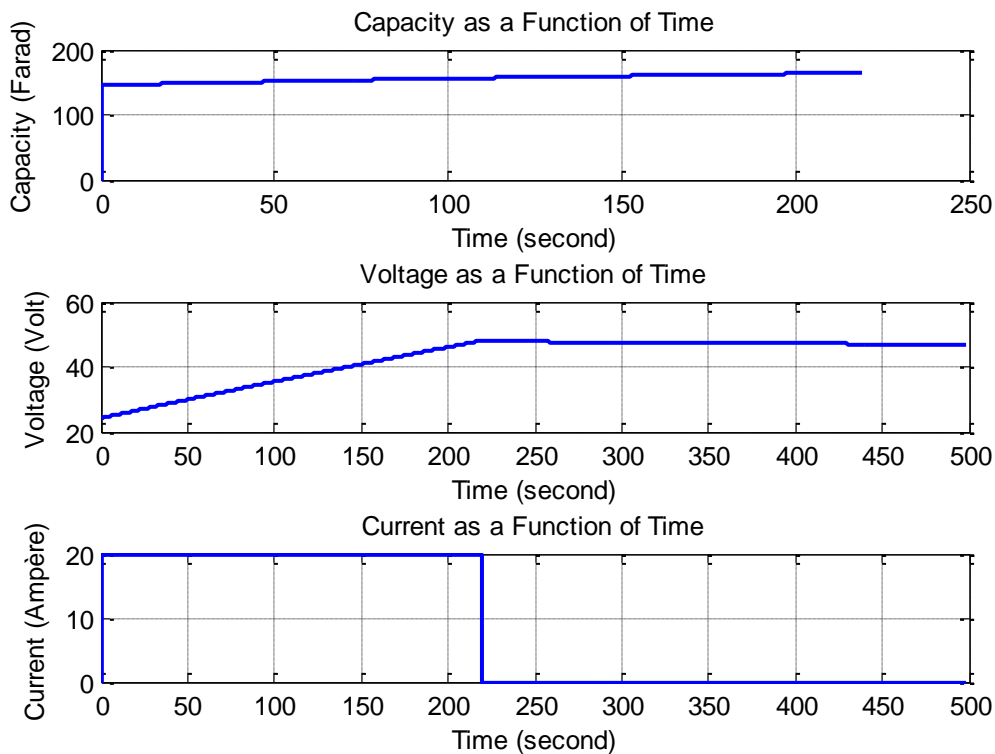


Figura 5 – Gráficos de simulação: (a) Capacitância x Tempo (b) Tensão x Tempo (c) Corrente x Tempo.

Os Supercapacitores estão se tornando cada vez mais presente nos dias atuais, tanto quanto os capacitores dielétricos. A Tab. 1 mostra um comparativo entre os componentes usados para armazenamento de energia (Maxwell, 2009), (Nesscap, 2013).

Tabela 1 - Comparativo entre tecnologias de armazenamento de energia.

Características de atuação	Bateria	Capacitor Convencional	Supercapacitor
<b>Tempo de carga</b>	1 a 5 hrs	$10^{-6}$ a $10^{-3}$ s	0.3 a 30 s
<b>Tempo de descarga</b>	0.3 a 3 hrs	$10^{-6}$ a $10^{-3}$ s	0.3 a 30 s
<b>Energia (Wh/kg)</b>	10 a 100	< 0.1	1 a 10
<b>Ciclo de vida</b>	1.000	>500.000	>500.000
<b>Potência específica (W/kg)</b>	<1000	<100.000	<10.000
<b>Eficiência de carga/descarga</b>	0.7 a 0.85	>0.95	0.85 a 0.98

Assim, após observar o desempenho do Supercapacitor, destacam-se alguns benefícios em aplicações específicas, como o seu uso em veículos elétricos (Ferreira e Pomílio, 2005), (LS, 2013), (Maxwell, 2013), (Maxwell, 2009), (Nesscap, 2013), (Vinatech, 2013):

- Rápida carga e descarga (segundos);
- Vida útil longa: EDLC (2,5V, 2,7V e 3V) > 500.000 ciclos;
- Densidade de alta Potência (10 x bateria);
- Alta eficiência (acima de 95%);
- Ampla temperatura operacional (- 25°C/ 70°C);
- Ambientalmente correto.

Há no mercado atualmente alguns fornecedores específicos de Supercapacitores, tanto em células quanto em módulos. A Tab. 2 destaca uma comparação entre diferentes fabricantes e tipos de células de Supercapacitores disponíveis no mercado (LS, 2013), (Maxwell, 2013), (Nesscap, 2013), (Vinatech, 2013).

Tabela 2 - Supercapacitores disponíveis no mercado.

Fabricante	Tensão/ Capacitância	Potência (kW/Kg)	Energia (Wh/Kg)
<b>Maxwell</b>	2.7 V/ 3000F	12	6
<b>Nesscap</b>	2.7 V/ 5000F	5.75	5.44
<b>LsMtron</b>	2.8V/ 3000F	11.2	5.02
<b>VinaThech</b>	3.0 V/ 500F	8.5	7.8

A Fig. 6 apresenta alguns modelos de módulos comercializados. Em (a) tem-se um módulo de 48V e 166F do fabricante Nesscap (Nesscap, 2013). Quanto a (b) tem-se um módulo da Maxwell de 48V e 165F (Maxwell, 2013). E (c) apresenta um módulo de 48.6V e 166F da LSMtron (LS, 2013). Todos eles foram desenvolvidos para aplicações típicas da indústria e automotiva.



(a) EMHSR-0166C0-048R0S



(b) BMOD0165 P048 BXX



(c) LSUM 050R4P 0166F EA

Figura 6 - Módulos de Supercapacitores.

### 3. CONVERSORES C.C.-C.C.

Para aplicação dos Supercapacitores como fonte de transferência rápida de energia, seja em uma Micro Rede ou em um Veículo Elétrico, é necessário um dispositivo de conversão para interligar o sistema pretendido e melhor gerenciar o fluxo de energia solicitado. Esse dispositivo controla o nível da tensão de uma fonte de energia elétrica (eleva ou reduz) que é submetido na sua saída. A Fig. 7 mostra um esboço destes dois sistemas que vêm implementando o uso dos Supercapacitores.

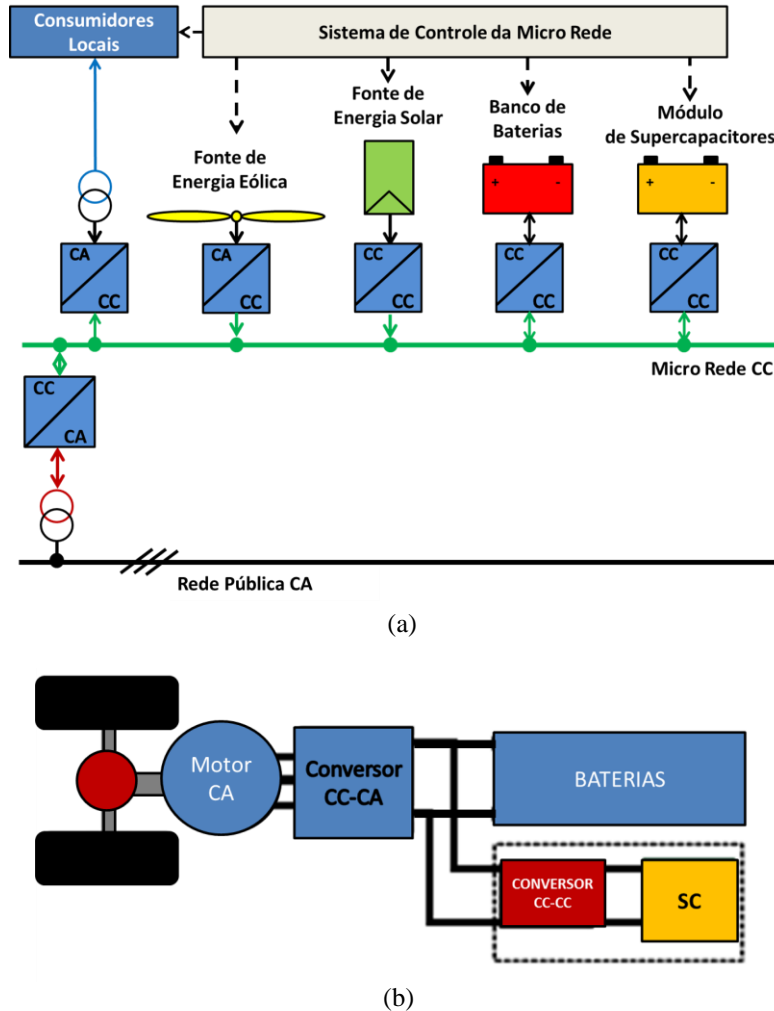


Figura 7 - (a) Micro Rede; (b) Veículo Elétrico.

Os conversores c.c.-c.c., também chamados de chopper, são projetados para controlar o fluxo de potência elétrica entre fontes de corrente contínua. Os choppers c.c. podem ser utilizados como reguladores chaveados (switching-mode regulators) para converter uma tensão c.c., em geral não regulada, em uma tensão c.c. regulada de saída. O controle comumente é obtido através da modulação por largura de pulsos (PWM) em uma frequência fixa, sendo o dispositivo de chaveamento um TBJ, MOSFET ou IGBT de potência (Ericson e Maksimovic, 2000), (Garcia, 2010), (Kazimierczuk, 2008), (Maniktala, 2006).

O conversor c.c.-c.c. aplicado a Supercapacitores tem sido objeto de vários estudos no intuito de aplicar um circuito que garanta a melhor relação custo  $\times$  benefício, aliado a um bom desempenho. Desta forma, uma das configurações mais abordadas para devida aplicação tem sido o Boost Bidirecional Interleaved ou Intrelaçado. A conversão de potência empregando estruturas entrelaçadas tem sido explorada em aplicações de elevadas potências, onde o sistema adquire a vantagem da redução do ripple e uma distribuição de potência entre as células conectadas em paralelo (Lium, 2007), (Martin e Martin, 2008), (Moshirvaziri, 2012), (Kloetzel e Gerling, 2011), (Zhang, 2008).

#### 3.1 Conversor Boost Bidirecional Entrelaçado

Dentro desta perspectiva é apresentada uma estrutura de potência para o sistema proposto com Módulo de SCs visando uma melhor análise através da aplicação prática. Trata-se de um conversor Boost Bidirecional Entrelaçado, mostrado na Fig. 8. O mesmo apresenta dois braços que operam defasados entre si em  $180^\circ$ , ou seja, o acionamento das chaves correspondentes em cada braço é realizado com uma diferença da metade do período de comutação. Ainda, as

duas chaves existentes em cada braço operam de forma complementar. Vale salientar que o número de braços pode variar neste tipo de conversor sendo o de dois, três e quatro braços os mais usuais na literatura (Garcia, 2010), (Lium, 2007), (Zhang, 2008).

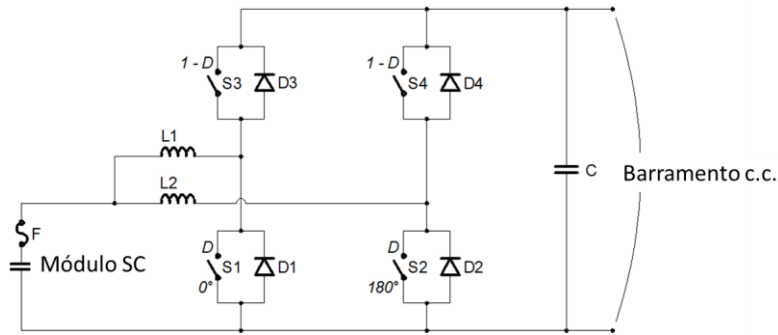


Figura 8 - Conversor Boost Bidirecional Entrelaçado de Duas Fases.

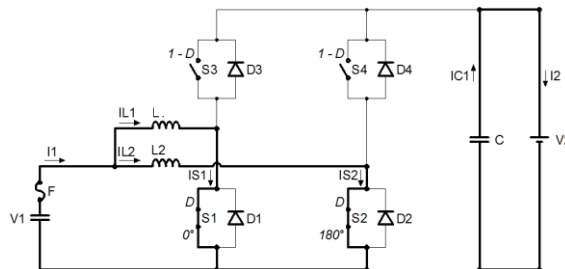
Em uma extremidade deste conversor é ligado o Módulo de Supercapacitores (V1) e a outra extremidade é ligada ao barramento c.c. (V2). Este conversor opera como boost quando a energia é transferida dos Supercapacitores para o barramento e como buck quando a energia é transferida para o módulo SC. A operacionalidade é baseada no sentido de manter a estabilidade do referido barramento.

Inicialmente, é feita uma análise qualitativa em que consiste na descrição das etapas de operação e principais formas de onda de tensão e corrente nos componentes.

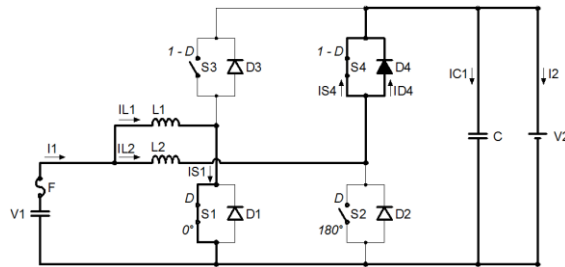
A análise é feita considerando a operação do conversor em modo de condução contínua (MCC) em uma faixa de variação de potência aplicando sinais de tensão PWM na porta dos transistores MOSFETs de potência adotados. Vale ressaltar, também, que o estudo é feito a partir do modo de elevação, onde a transferência de energia se dá do Módulo de Supercapacitores para o barramento c.c.

As etapas de operação do conversor são divididas de acordo com os sinais de controle das chaves S1 e S2 e a complementariedade das chaves S3 e S4 considerando a razão cíclica dos sinais maior que 0,5. Assim, neste modo de operação as chaves podem estar em quatro estados diferentes ( $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ). A Fig. 9 destaca estes quatro estados.

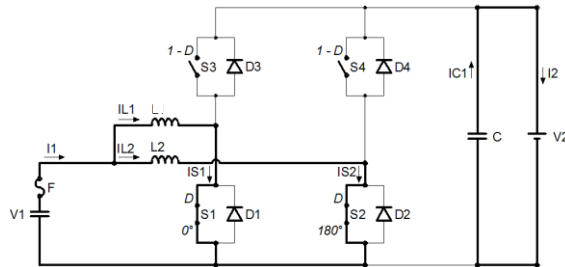
$t=t_0$



$t=t_1$



$t=t_2$



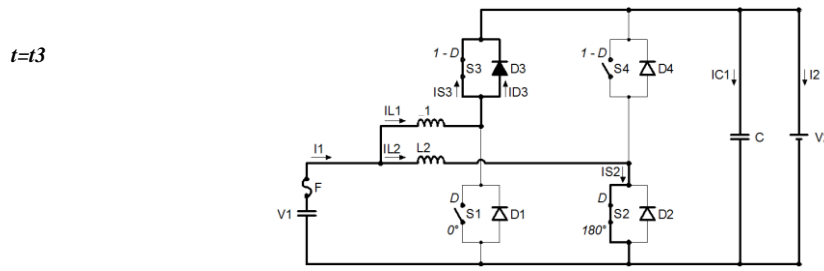


Figura 9 - Etapas de operação do conversor proposto.

As principais formas de onda de tensão e corrente nos diferentes dispositivos são mostradas na Fig. 10. Tais formas de onda desenhadas têm como referência os sinais PWM1 e PWM2 das chaves S1 e S2, respectivamente, para um período de comutação T.

Fazendo-se uso e análise destas formas de ondas determina-se o ganho estático e os esforços de corrente e tensão nos componentes constituintes do conversor.

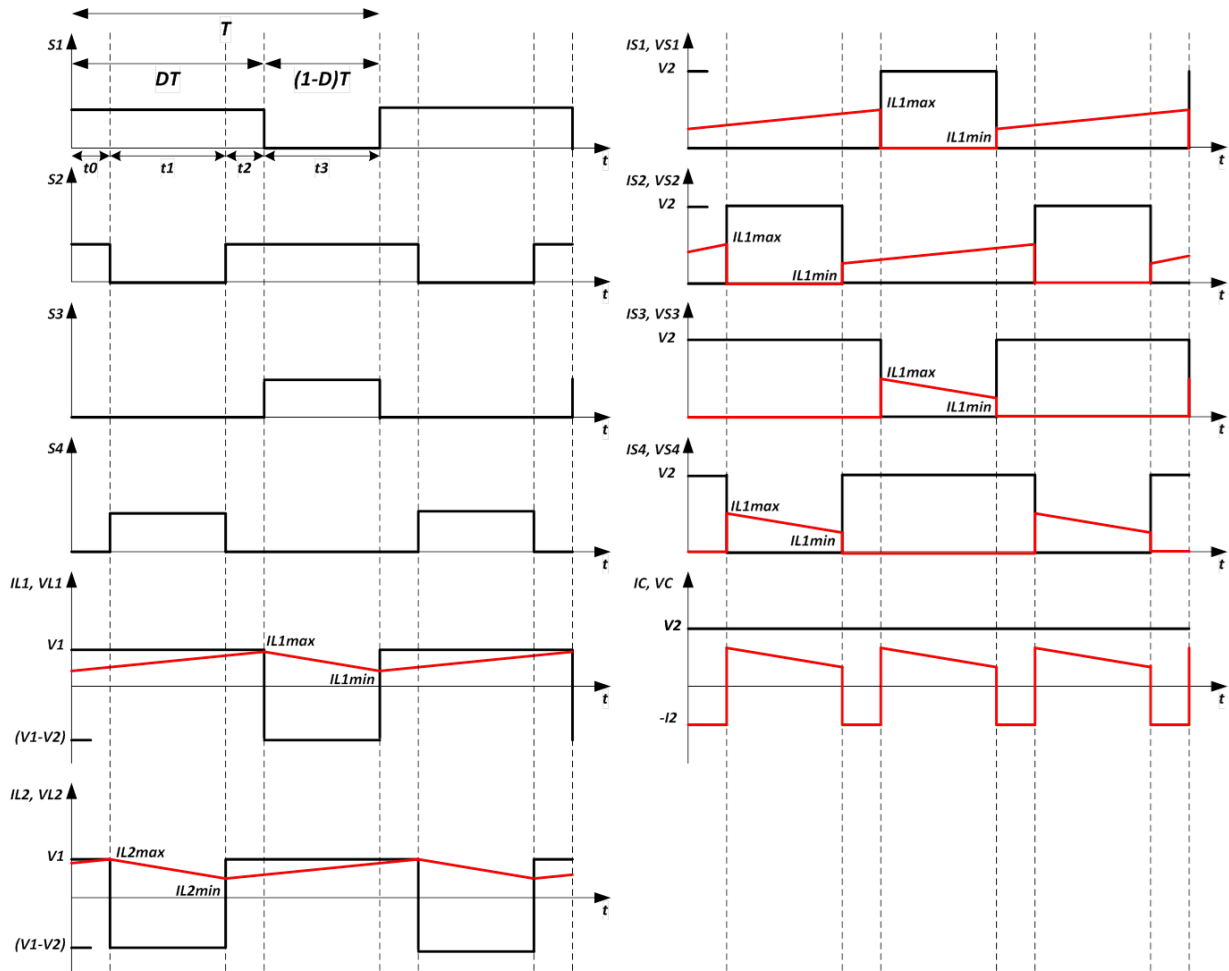


Figura 10 - Principais formas de ondas.

É visto através do gráfico da Fig. 10 que  $DT$  é o tempo em que as chaves S1 e S2 permanecem fechadas e  $T$  é o período de comutação das chaves. Tem-se  $D$  como a razão cíclica do conversor.

Agora, é analisada a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada. Sabendo-se que a tensão média nos indutores é nula para um período de chaveamento, então, as áreas ou variações do fluxo magnético em cada etapa de operação são iguais. Assim, a partir da curva de tensão no indutor ( $VL1$  ou  $VL2$ ) vista no gráfico, obtém-se a expressão:

$$V1(DT) = (V2 - V1)(1 - D)T \quad (2)$$

Logo, tem-se a expressão do ganho estático do conversor dada por:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{1-D} \quad (3)$$

O que leva a confirmar que o conversor funciona como um conversor *boost* clássico. A compreensão dessa topologia operando no modo buck é similar ao *buck* clássico e sua operação é simples e complementar ao do modo boost em vários aspectos, tais como o acionamento das chaves, a razão cíclica e o ganho estático.

Através de uma análise quantitativa é feito o cálculo dos parâmetros dos componentes onde pode se destacar através da literatura a simetria entre os dois modos de operação, principalmente entre as razões cíclicas, que são complementares (Kazimierczuk, 2008), (Kloetzl e Gerling, 2011), (Zhang, 2008). Assim, para o projeto do conversor considerando os dois modos de operação é necessário apenas o desenvolvimento do projeto para um dos modos devido à semelhança dos esforços de tensão e corrente nos seus componentes.

No conversor com  $n$  braços entrelaçados a redução do ripple de entrada é inversamente proporcional ao número de células em paralelo. Logo, o período de comutação dos braços do conversor entrelaçado é  $n$  vezes menor que o período de comutação do conversor boost convencional (Garcia, 2010), (Lium, 2007), (Moshirvaziri, 2012), (Zhang, 2008).

A fim de lidar com energia total em todos os momentos, aos módulos de Supercapacitores é permitido descarregar a 50% da máxima tensão (Ferreira et al., 2007), (Martin e Martin, 2008). A Maxwell (2009) destaca que devido o mecanismo de armazenamento de energia do Supercapacitor não ser uma reação química, a carga/ descarga pode ocorrer com a mesma velocidade. Ainda enfatiza que a eficiência de carga e descarga é, em termos práticos, a mesma coisa. Uma variedade de métodos é possível para promover o gerenciamento do fluxo de energia. Assim, para tal fim é preciso implementar um sistema de controle de tensão e corrente ao conversor no intuito de garantir seu correto funcionamento e confiabilidade do processo.

### 3.2 Projeto do conversor proposto

Para o conversor proposto a ondulação nos indutores ( $L_1$  e  $L_2$ ) é função da máxima corrente de entrada. As duas fases defasadas entre si, previstas na estrutura do conversor, provoca um cancelamento parcial na ondulação da corrente na entrada.

Outro ponto que deve ser contemplado na análise de projeto para aplicação é o nível de tensão do barramento c.c. para a demanda de potência necessária. Em veículos elétricos, por exemplo, atualmente no mercado podem ser encontrados vários níveis de tensão de acordo com a concepção do fabricante destes tipos de veículos. Em modelos urbanos de pequeno porte têm sido bastante empregado níveis de tensão mais baixos. Entre a gama de produtos disponibilizados atualmente no mercado global, podem ser citados modelos chineses como o BY-E-CAR-02 da Handong Baoya New Energy Vehicle Co. Ltd. (Baoya-ev, 2013) e o modelo brasileiro SEED – GREEN CITY CARS produzido pela VEZ DO BRASIL (VEZ do Brasil, 2013). Em tais veículos é possível constatar a utilização do nível de tensão de 96 V no barramento de alimentação. Desta forma, visando o desenvolvimento e aplicação futura do projeto, optou-se em definir o nível de tensão do barramento c.c. em 96 V.

Para a máxima corrente de entrada ser calculada deve ser considerada a tensão mínima permitida no descarregamento do Módulo de Supercapacitores (165 F e 48 V). Por conseguinte, destacam-se as especificações do conversor:

$P_2 = 2 \text{ kW}$	Potência Nominal de Saída;
$V_1 = 48 \text{ V}$	Tensão Nominal Módulo de Supercapacitores;
$V_2 = 96 \text{ V}$	Tensão nominal do Barramento c.c.;
$f = 20 \text{ kHz}$	Frequência de chaveamento;
$\Delta V_2 = 2\% V_2$	Ondulação da tensão no Barramento c.c.;
$\Delta L_1 = \Delta L_2 = 10\% \cdot I_1$	Ondulação máxima da corrente nos indutores;
$V_{1\text{MIN}} = 0.5 \cdot V_1$	Descarga máxima permitida para o Módulo de Supercapacitores;
$\eta = 96\%$	Rendimento do conversor.

Observando as características técnicas do Módulo de Supercapacitores, onde a tensão em seus terminais não deve exceder a tensão nominal  $V_1$  de 48 V, destaca-se que o conversor deve operar com  $D$  entre 0,5 e 0,75.

Os cálculos do dimensionamento dos componentes são realizados considerando a faixa de variação da razão cíclica e a máxima corrente de entrada no intuito de submeter tais componentes aos maiores esforços de corrente e tensão. Inicialmente, a partir das considerações feitas, calcula-se a potência de entrada através da Eq. (4):

$$P_1 = P_2 / \eta = 2000 / 0,96 = 2,083 \text{ kW} \quad (4)$$

A máxima corrente média de entrada é dada pela Eq. (5):

$$I_1 = P_1 / V_{1\text{min}} = 2083 / 24 = 86,8 \text{ A} \quad (5)$$



Logo, a ondulação máxima para os indutores L1 e L2 em função da máxima corrente de entrada é dada pela Eq. (6):

$$\Delta IL1 = \Delta IL2 = \Delta IL = 0,1 \cdot I1 = 0,1 \cdot 86,8 = 8,68 \text{ A} \quad (6)$$

Aplicando a Eq. (7) tem-se o valor da indutância para L1 e L2:

$$L1 = L2 = L = V2 / 4 \cdot f \cdot \Delta IL = 138,24 \mu\text{H} \quad (7)$$

A corrente média nos indutores pode ser encontrada usando a expressão (8):

$$IL1_{med} = IL2_{med} = I_{med} = I1 / 2 = 43,4 \text{ A} \quad (8)$$

A máxima corrente de pico nos indutores é dada pela Eq. (9):

$$IL_{max} = I_{med} + 0,5 \cdot \Delta IL = 47,74 \text{ A} \quad (9)$$

A tensão máxima sobre as chaves S1, S2, S3 e S4, sem considerar as sobre tensões causadas por elementos parasitas, é dada por (10):

$$VS1 = VS2 = VS3 = VS4 = V2 = 96 \text{ V} \quad (10)$$

A corrente máxima que passa pelas chaves é determinada pela Eq. (11):

$$IS_{max} = IL_{max} = 47,74 \text{ A} \quad (11)$$

A corrente I2 no barramento c.c. é vista na Eq. (12):

$$I2 = P2 / V2 = 2000 / 96 = 20,83 \text{ A} \quad (12)$$

Uma vez assumido o valor da ondulação de saída calcula-se a capacitância de filtro pela expressão (13):

$$C = I2 \cdot D / 2 \cdot f \cdot \Delta VC = 203,38 \mu\text{F} \quad (13)$$

A tensão máxima sobre o capacitor C é dada pela tensão do barramento c.c. de 96 V.

Dada às condições iniciais, através de simulação usando o programa Psim, mostrado na Fig. 11, são obtidos os gráficos de correntes e tensão do conversor proposto.

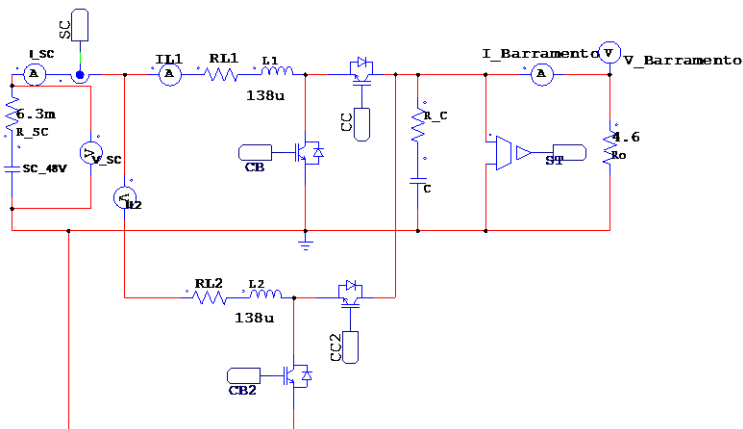


Figura 11 – Simulação do conversor c.c.-c.c. proposto no Psim.

A Fig. 12 mostra o comportamento das correntes do circuito.

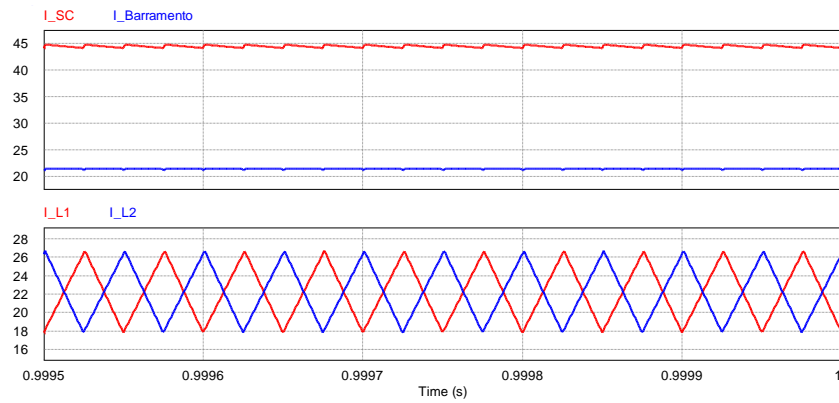


Figura 12 - Gráficos de correntes no conversor cc.-cc.

Na Fig. 13 são observados os níveis de tensão.

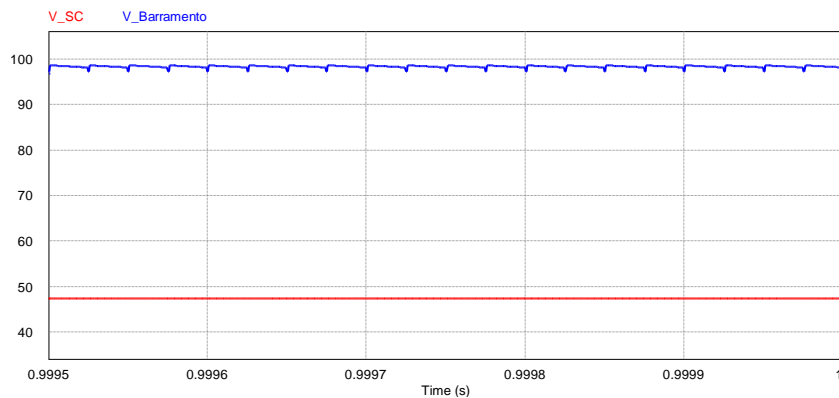


Figura 13 - Gráficos de tensão no conversor c.c.-c.c.

#### 4. CONCLUSÃO

O uso de Supercapacitores é relativamente novo, e sua tecnologia encontra-se em progresso contínuo, com resultados cada vez mais promissores. Através da revisão bibliográfica sobre os Supercapacitores proposta pelo artigo foi possível constatar sua crescente aplicação como fonte de suprimento rápido de energia em sistemas como as Micro Redes e os Veículos Elétricos. Assim, fica evidente que os SCs vêm ganhando cada vez mais espaço nas diversas formas de gerenciamento de energia aplicada. Fato perceptível pela gama de produtos disponibilizados atualmente no mercado como mostrado aqui neste trabalho.

Também através do estudo realizado foi verificado que o conversor Boost Bidirecional Interleaved ou Entrelaçado vem sendo usualmente utilizado na implementação de SCs em sistemas de energia. Através do conversor proposto com esta estrutura foi possível observar por meio dos sinais de correntes adquiridos por simulação (Fig. 11) a redução do ripple na corrente do Módulo e uma distribuição de potência entre os dois braços conectados em paralelo evidenciando, assim, seu bom desempenho aliado a sua estrutura simples. Assim, o conversor DC-DC 2 kW bidirecional para conectar um módulo de Supercapacitor de 165 F e 48 V para a distribuição de energia em um barramento c.c. de 96 V aqui proposto, foi validado por simulação.

#### REFERÊNCIAS

- Baoya-ev. BY-E-CAR-02. Disponível em: <<http://www.baoya-ev.com/enbaoya/index.aspx>>. Acesso em: 01/09/13.
- Bingbing, W., Zhongdong, Y. e Xiangning, X., 2010. Super-capacitors energy storage system applied in the microgrid, published in the 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Taichung, pp. 1002-1005.
- Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S. E. e Emadi, A., 2004. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design, Boca Raton, FL: CRC Press, ISBN: 0-8493-3154-4.
- Ericson, R. W. e Maksimovic, D., 2000. Fundamentals of Power Eletrônica, second edition, Kluwer Academic Publishers. NJ, USA.
- Ferreira, A. A. e Pomilio, J. A., 2005. Estado da arte sobre a aplicação de Supercapacitores em Eletrônica de Potência, Eletrônica de Potência, Vol. 10, nº 2.

- Ferreira, A. A. e Pomilio, J. A., Silva, E. P. e Cambra, D. V. P., 2007. Metodologia para dimensionar múltiplas fontes de suprimento de energia de veículos elétricos. VE 2007 - 5º Seminário e Exposição de Veículos Elétricos.
- Garcia, F. S., 2010. Conversores CC-CC elevadores de tensão, não isolados, com ganhos estáticos elevados, dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas.
- Halper, M. S. e Ellenbogen, J. C., 2006. Supercapacitors: A Brief Overview, MITRE McLean, Virginia.
- Kazimierczuk, M. K., 2008. Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters, Wiley, Ohio, USA.
- Kloetzel, J. e Gerling, D., 2011. An Interleaved Buck-Boost-Converter Combined with a Supercapacitor-Storage for the Stabilization of Automotive Power Nets, Werner Heisenberg-Weg 39 Neubiberg, Germany.
- Lium, F., 2007. 30 kW Power Boost System for Drive Trains for Electric Vehicles Based on Supercapacitor Technologies, Master of Science in Energy and Environment. Norwegian University of Science and Technology.
- LS Ultracapacitor, 2013 [Online]. Disponível em: <<http://www.lsmtron.com>>. Acesso em: 13/10/13.
- Lukic, S. M., Cao, J., Bansal, R. C., Rodriguez, F. e Emadi, A., 2008. Energy Storage Systems for Automotive Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 55, NO. 6.
- Martin, H. e Martin, J., 2008. Battery-Supercapacitor Energy Storage, Master of Science Thesis in Electrical Engineering. Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden.
- Maniktala, S., 2006. Switching Power Supplies A to Z, USA, Newnes.
- MathWorks, 2013. Documentation Center [Online]. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/supercapacitor.html>>. Acesso em: 05/11/2013.
- Maxwell Technologies, 2013 [Online]. Disponível em: <<http://www.maxwell.com/ultracapacitors>>. Acesso em 18/08/2013.
- Maxwell Technologies, 2009. Product Guide – Maxwell Technologies BOOSTCAP Ultracapacitors, Doc. No. 1014627.1 © 2009 Maxwell Technologies®, Inc [Online]. Disponível em: <[http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/1014627\\_boostcap\\_product\\_guide.pdf](http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/1014627_boostcap_product_guide.pdf)>. Acesso em: 18/08/2013.
- Moshirvaziri, M., 2012. Ultracapacitor/Battery Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicles, a thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Master of Applied Science Graduate Department of Electrical and Computer Engineering University of Toronto.
- Nesscap Ultracapacitors, 2013 [Online]. Disponível em: <<http://www.nesscap.com/product/overview.jsp>>. Acesso em: 13/10/2013.
- Sathishkumar, R., Kollimalla, S. K. e Mishra, M. K., 2012. Dynamic energy management of micro grids using battery supercapacitor combined storage, published in India Conference (INDICON), Annual IEEE, pp. 1078 – 1083.
- VEZ do Brasil. SEED – GREEN CITY CARS. Disponível em: <http://www.vezdobrasil.com.br/sobre-o-carro-eletrico/modelo-seed-green-city-cars/>. Acesso em: 29/08/13.
- Vinatech, 2013 [Online]. Disponível em: <<http://www.supercapacitorvina.com/product/edlc.html>>. Acesso em: 13/10/2013.
- Zhang, J., 2008. Bidirectional DC-DC Power Converter Design Optimization, Modeling and Control, dissertation submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering.

## SUPERCAPACITORS AND ITS APPLICATION IN MICRO GRIDS AND ELECTRIC VEHICLES THROUGH DC-DC CONVERTER BOOST BIDIRECTIONAL INTERLEAVED

**Abstract.** *This article main objective is to present a review on Supercapacitors and their increasing use as a source of energy supply in Micro Grids and Electric Vehicles. It also addresses the identification of topologies of dc-dc converters that have been employed to process efficiently the flow of electricity in these devices. Finally we present the design of a bidirectional dc-dc converter 2kW to connect the module Supercapacitors of 165F and 48V a bus dc power distribution of 96V common in power systems of electric vehicles. The converter design is validated by simulation.*

**Key words:** Supercapacitors, Micro Grids, Electric Vehicles, dc-dc converters.