



## CONVERSOR FORWARD PARA CARGA DE BANCOS DE SUPERCAPACITORES

**João A. Vilela Jr**

Professor do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná  
vilela@eletrica.ufpr.br

**Eduardo A. de G. Fabro**

Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná  
eduardo.a.g.fabro@gmail.com

**Resumo.** *Supercapacitores vem sendo cada vez mais empregados em sistemas armazenadores de energia, ocupando aos poucos o espaço antes dominado exclusivamente por baterias, sendo várias as vantagens desse novo dispositivo como sua grande durabilidade e alta densidade de potência. Neste artigo é apresentada uma nova topologia para carga de bancos de supercapacitores, baseada no conversor CC-CC Forward, através da montagem e teste de um protótipo projetado para corrente de carga de 3 A, potência de saída de 49 W e tensão de saída máxima de 16,2 V com um banco de seis supercapacitores em série, cada um com capacitância de 50 F. Os principais resultados foram obtidos através de uma série de ensaios que comprovam o funcionamento e eficácia da topologia.*

**Palavras-chave:** *Conversor forward. Sistemas armazenadores de energia. Supercapacitor.*

### 1. INTRODUÇÃO

Sistemas armazenadores de energia são fundamentais para diversas aplicações tecnológicas como em sistemas fotovoltaicos com acumulação de energia, *nobreaks*, sistemas automotivos, dentre outros [1][2][3]. E a utilização de supercapacitores

nessas tecnologias apresenta diversas vantagens em relação ao uso de baterias.

Supercapacitores são dispositivos capazes de armazenar energia na forma de campo elétrico (sem nenhum tipo de reação química), com ciclo de utilização (carga/descarga) de centenas de milhares de vezes sem efeito significativo em sua performance, o que garante uma longa vida útil.

Sua principal diferença para com capacitores eletrolíticos comuns é seu eletrodo de material ativo de carbono com área de superfície das placas muito maior e distância entre elas muito menor, permitindo capacitâncias na ordem de milhares de Farads, diferente dos usuais valores de  $10^{-12}$  até  $10^{-3}$  Farads em capacitores convencionais.

Um supercapacitor apresenta uma alta densidade de potência (capacidade de fornecer potência instantânea por unidade de peso), sendo capaz de fornecer picos de corrente de intensidade elevada durante alguns segundos ou minutos, diferente de baterias que possuem uma alta densidade de energia (capacidade de armazenar energia por unidade de peso), que podem fornecer correntes de intensidade limitada, mas ao longo de minutos ou até mesmo horas.

Essa característica é muito desejada em aplicações de propulsão veicular, onde supercapacitores são empregados em

sistemas acumuladores mistos em paralelo com baterias e células de combustível [4][5].

A tecnologia dos supercapacitores apresenta diversas características que os tornam vantajosos para diversas aplicações, porém, é relativamente recente, carecendo de maiores estudos e aplicações [6]. É proposto nesse trabalho um novo circuito para carga de um banco de supercapacitores a partir de um conversor CC-CC Forward.

## 2. CONVERSOR PROPOSTO

Este artigo apresenta o conversor Forward como circuito de carga de tensão em um banco de supercapacitores.

Esse conversor possui múltiplos secundários no seu transformador que são utilizados para alimentar vários bancos simultaneamente. A isolação galvânica produzida pelo mesmo transformador possibilita ligar os vários bancos de supercapacitores em série formando um banco de maior tensão. Na Fig. 1 é ilustrado o conversor proposto.

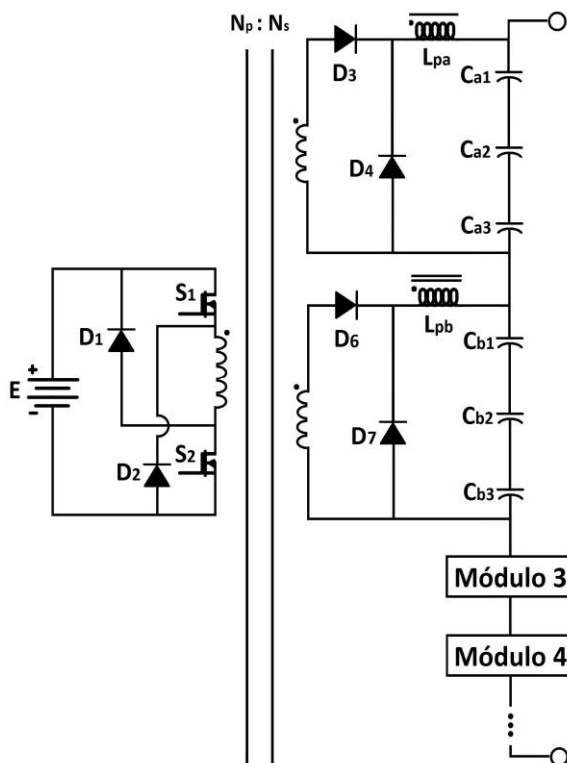


Figura 1. Circuito de carga dos supercapacitores

Cada secundário do transformador do conversor Forward alimenta um banco de supercapacitores que será denominado de módulo.

Em cada módulo existe um determinado número de supercapacitores em série, que por sua vez, estão conectados a um indutor de filtro  $L_{px}$ .

O transformador de múltiplos enrolamentos ( $N_p:N_{sx}$ ), os interruptores  $S_1$  e  $S_2$ , os indutores  $L_{px}$  e os diodos  $D_3$ ,  $D_4$ ,  $D_6$  e  $D_7$ , compõe o conversor Forward, que transfere a energia da fonte E para o banco de supercapacitores. Os diodos  $D_1$  e  $D_2$  formam um circuito simples para desmagnetização do transformador. Para equalizar a tensão entre os capacitores de um módulo, foi utilizado um circuito de equalização simples.

### 2.1 Princípio de funcionamento

Quando os interruptores  $S_1$  e  $S_2$  estão conduzindo, a tensão E é aplicada no enrolamento primário do transformador, que transfere potência para seus enrolamentos secundários, de forma que cada indutor  $L_{px}$  fica submetido à diferença entre a tensão do enrolamento secundário do transformador e a tensão total do banco de supercapacitores do seu próprio módulo, conforme é apresentado no circuito simplificado com apenas dois módulos na Fig. 2.

Durante esse período a fonte de alimentação E transfere energia para os indutores  $L_{px}$  e para os supercapacitores, através do transformador.

Quando os interruptores  $S_1$  e  $S_2$  são abertos, a fonte é desconectada do circuito, de forma que o circuito de desmagnetização formado pelos dois diodos no lado do primário do transformador atua, criando um caminho para a corrente magnetizante retornar até a fonte, permitindo a desmagnetização do transformador.

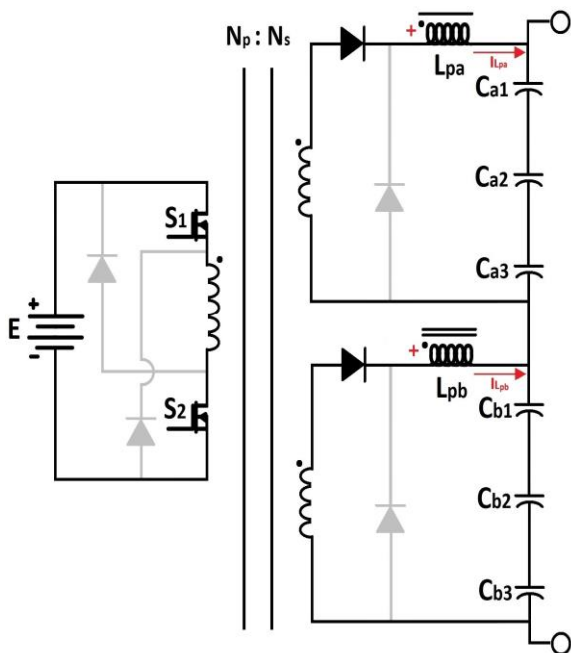


Figura 2. Operação do circuito de carga em um circuito com dois módulos

A tensão nos indutores  $L_{px}$  inverte de polaridade e é igual à soma das tensões dos supercapacitores mais a queda da tensão no diodo conectado a eles, conforme é ilustrado na Fig. 3.

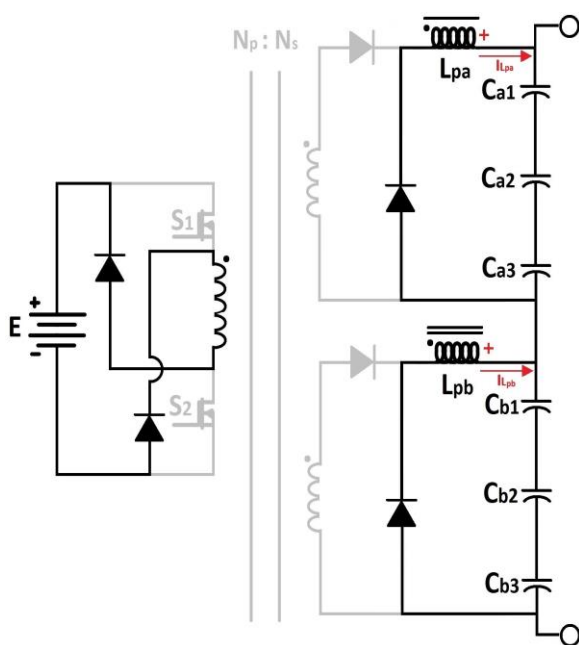


Figura 3. Operação do circuito de carga em circuito com dois módulos

### 3. IMPLEMENTAÇÃO DO CIRCUITO

Para validar a topologia proposta, foi implementado um protótipo do circuito contendo dois módulos, utilizando um banco com seis supercapacitores em série, com capacitância de 50 F por supercapacitor e tensão máxima de 8,1 V por módulo, conforme é apresentado na Fig. 4.

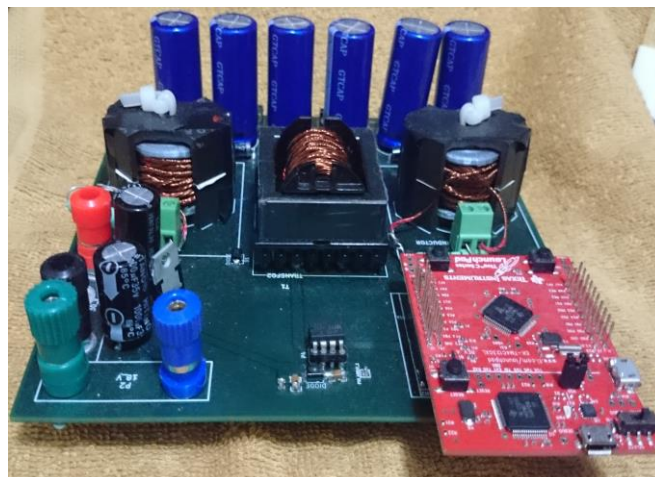


Figura 4. Protótipo montado do circuito proposto

O protótipo foi projetado para operar com uma tensão máxima de 30 V na entrada, uma corrente média no secundário do transformador de 3 A e uma potência de saída de 49 W.

O controle da corrente de saída do conversor é realizado de forma digital utilizando o microcontrolador Tiva C Series TM4C123G. Os interruptores de potência do circuito operam com modulação por largura de pulso (PWM), com frequência de chaveamento de 80 kHz.

### 3.1 Resultados Experimentais

Para análise do comportamento do protótipo, foi realizado um ensaio do comportamento da tensão de cada módulo (em volts) em relação ao tempo (em segundos) pode ser visualizado na Fig.5. O ensaio em questão foi realizado com cada módulo carregado com uma tensão inicial de 1,6 V, corrente de alimentação fixa em 650 mA e razão cíclica fixa em 50%.

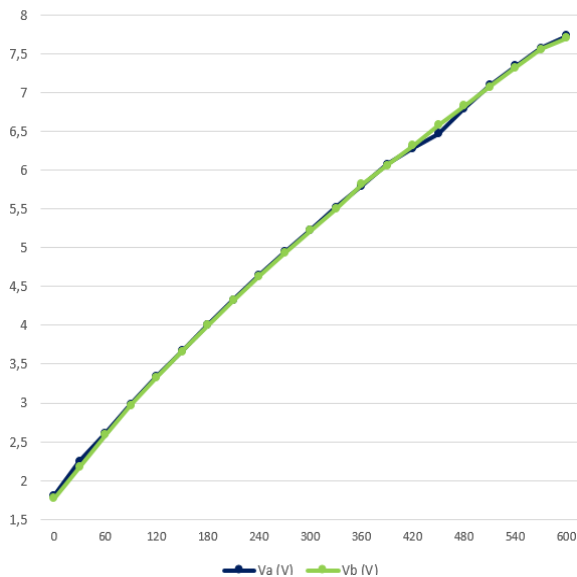


Figura 5. Comportamento da tensão dos supercapacitores em cada módulo

O protótipo comprova ser capaz de carregar o banco de supercapacitores, conforme o gráfico acima, que apresenta o carregamento de cada módulo (cada um contendo 3 supercapacitores) de forma efetiva.

#### 4. CONCLUSÃO

Este artigo apresenta uma visão geral a respeito dos supercapacitores e suas vantagens e aplicações para diversas tecnologias que necessitam de sistemas armazenadores de energia.

A tecnologia é relativamente recente e carece de maiores estudos e aplicações, logo, é apresentado um novo circuito para a carga de bancos de supercapacitores conectados em série integrada a um conversor CC-CC Forward.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados com o protótipo comprovam o funcionamento e eficácia da nova topologia como circuito de carga de um banco de supercapacitores.

#### 5. REFERÊNCIAS

[1] S. Saggini, F. Ongaro, C. Galperti, P. Mattavelli, “Supercapacitor-based Hybrid Storage Systems for Energy

Harvesting in Wireless Sensor Networks”. 2010, p. 2281–2287.

[2] J. Zhang, J. Wang, X. Wu, “Research on Supercapacitor Charging Efficiency of Photovoltaic System”, 2012 IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2012, p.1–5.

[3] P. Kreczanik, P. Venet, A. Hijazi, G. Clerc, “Study of Supercapacitor Aging and Lifetime Estimation According to Voltage, Temperature, and RMS Current”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, nº 9, September 2014, pp. 4895-4902.

[4] A. A. Ferreira, J. A. Pomilio, “Estado da Arte sobre Aplicação de Supercapacitores em Eletrônica de Potência”, *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 10, nº 2, Novembro 2005, pp. 25-32.

[5] C. Zhu, R. Lu, L. Tian, Q. Wang, “The Development of an Electric Bus with Super-Capacitors as Unique Energy Storage”, 2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2006, p. 1–5.

[6] M. Ryndack, “Projeto e Implementação de Conversores CC-CC Para Carga de Supercapacitores”, 24º EVINCI - Evento de Iniciação Científica, SIEPE - Semana Integrada de Ensino Pesquisa e Extensão. 2016, p.391.