

## ESTUDO DE UM EQUALIZADOR ATIVO UTILIZANDO CONVERSOR CC-CC FLYBACK DE MÚLTIPLAS SAÍDAS NA TOPOLOGIA DE DUAS CHAVES PARA EQUALIZAÇÃO DE CÉLULAS DE ÍON-LÍTIO DE SEGUNDA VIDA

Matheus Grossi Zaballa Ribeiro<sup>1</sup>, Alceu André Badin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil  
(matheusr.2002@alunos.utfpr.edu.br)

<sup>2</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil

**Resumo:** A migração de baterias de íon-lítio veiculares para aplicações de segunda vida se mostra desafiadora devido à heterogeneidade de parâmetros entre células. Este trabalho avalia o conversor Flyback de duas chaves para equalização ativa, aproveitando seu auto-equilíbrio nativo, dispensando controle individual. O protótipo experimental reduziu o desbalanceamento para uma diferença máxima de tensão entre células de 20 mV, validando a eficácia e viabilidade da topologia para aplicação em sistemas BMS.

**Palavras-chave:** conversor Flyback; baterias de íon-lítio; equalização ativa.

### INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda por veículos elétricos, as baterias de íon-lítio tornaram-se a tecnologia predominante no mercado devido à sua elevada densidade energética e maior vida útil em relação a outros tipos de baterias (MURATORI et al., 2025).

No entanto, essa tecnologia apresenta um processo natural de degradação, reduzindo a capacidade total da bateria ao longo dos ciclos de carga e descarga (BARRÉ et al., 2013). Quando essa capacidade se torna inferior a 80% da original, a bateria se torna incapaz de fornecer a energia necessária para os veículos. Ao atingir esse limiar, a célula deve ser reciclada ou realocada para aplicações de menor demanda (PODIAS et al., 2018), surgindo assim o conceito de baterias de segunda vida.

O processo de reciclagem de baterias de íon-lítio é complexo, caro, e pode acarretar em danos ao meio ambiente. Além disso, estas células ainda possuem capacidade suficiente para diversas aplicações, como, por exemplo, sistemas de armazenamento para fontes renováveis (CASALS et al., 2019).

Para a maioria das aplicações, é necessária a associação de células em série para suprir os requisitos de tensão do sistema. Entretanto, baterias de segunda vida podem apresentar diferenças abruptas de capacidade. Esse fenômeno limita a capacidade útil do banco de baterias, ditada pela célula de menor carga, e possibilita a sobrecarga e degradação acelerada das células de maior potencial (DI RIENZO et al., 2023).

Para mitigar esses efeitos, os Sistemas de Gerenciamento de Baterias (*Battery Management Systems*, BMS) utilizam circuitos de equalização. Enquanto os métodos de equalização passivos dissipam o excesso de energia termicamente através de resistores, os métodos ativos promovem a redistribuição de carga entre as células, aumentando a eficiência do sistema.

Em baterias de primeira vida, os BMS operam em potências menores e normalmente utilizam métodos passivos de balanceamento pelo fato de as células apresentarem capacidades muito próximas, exigindo dissipação de uma pequena quantidade de energia para a equalização (DI RIENZO et al., 2020). Já para baterias de segunda vida, devido a discrepante diferença de capacidades, a utilização de métodos passivos de equalização ocasionaria um desperdício considerável de energia.

Desse modo, os métodos de equalização ativos mostram-se como uma solução mais eficiente para baterias de segunda vida. No entanto, para o balanceamento de células com capacidades consideravelmente distintas, exigem-se circuitos capazes de operar com maiores níveis de corrente e transferência de potência.

Este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade da aplicação do conversor CC-CC Flyback na topologia de duas chaves (Figura 1) para equalização ativa de células de íon-lítio por meio de simulações e ensaios em bancada. A escolha deste conversor deve-se à sua característica de

auto-equilíbrio, que direciona naturalmente a maior parte da energia armazenada para as células de menor potencial, sem a necessidade de controle individual em cada célula.

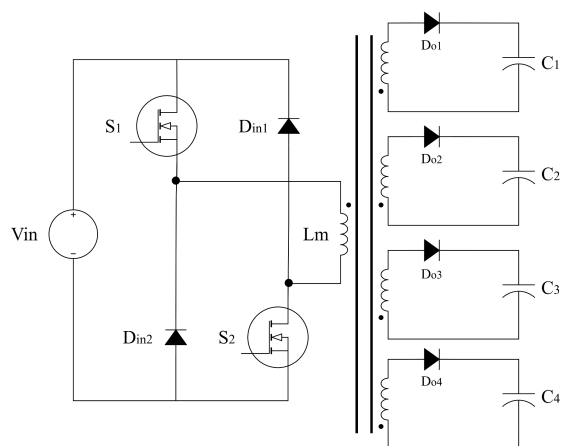


Figura 1. Conversor Flyback na topologia de duas chaves com quatro saídas.

Adicionalmente, a topologia de duas chaves torna desnecessária a necessidade de circuitos grameadores para dissipação da energia armazenada em indutâncias de dispersão, uma vez que os diodos de roda-livre permitem a regeneração da energia para a fonte de entrada, tornando possível sua aplicação em potências maiores (PAGLIOSA, 2018).

### MATERIAL E MÉTODOS

Para atingir o objetivo proposto, a abordagem metodológica foi dividida nas seguintes etapas:

1. Análise matemática e dimensionamento: Análise do conversor Flyback visando mapear suas etapas de funcionamento e os cálculos envolvidos para determinação dos parâmetros do conversor.
2. Modelagem das células de íon-lítio: Representação elétrica das células de íon-lítio por meio do modelo equivalente de Thévenin de segunda ordem, tornando possível a simulação do comportamento das baterias.
3. Simulação do sistema: Validação do conjunto conversor-baterias utilizando o software PSIM para análise do fluxo de potência e comportamentos das tensões e correntes durante o processo de equalização.
4. Desenvolvimento do protótipo e ensaios experimentais: Construção do conversor com base nos parâmetros apresentados na Tabela 1, utilizando o circuito integrado SG3525 para a geração do sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) de chaveamento. Os ensaios em bancada foram conduzidos com o auxílio de fontes de tensão, reostatos de potência, células de íon-lítio do modelo 18650 com tensão máxima de 4,2

V e instrumentos de medição tais como multímetros e osciloscópios para a obtenção de dados.

Tabela 1. Parâmetros do conversor Flyback.

| Parâmetro                 | Valor         |
|---------------------------|---------------|
| Indutância Magnetizante   | 23,81 $\mu$ H |
| Potência Nominal          | 40 W          |
| Tensão de Entrada         | 16,8 V        |
| Tensão de Saída           | 4,2 V         |
| Frequência de Chaveamento | 30 kHz        |
| Razão Cíclica             | 0,45          |
| Relação de Transformação  | 4             |

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro ensaio consistiu na aplicação do conversor durante o carregamento de quatro células de íon-lítio associadas em série e inicialmente desequilibradas. Na Figura 2, são apresentadas as curvas de tensão ao longo dos primeiros 200 segundos do experimento, intervalo no qual observa-se a tendência de convergência das tensões.

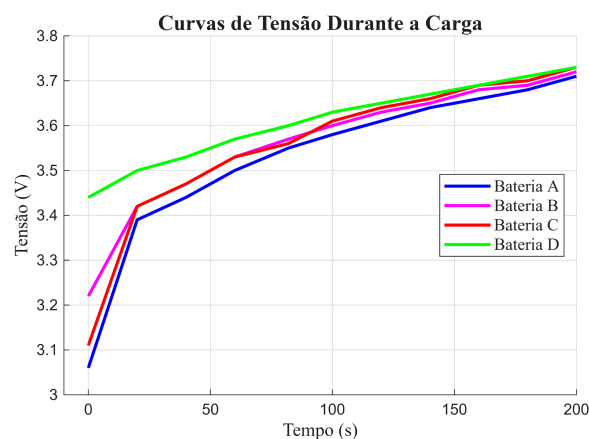


Figura 2. Curvas de potencial durante os primeiros duzentos segundos do processo de carga.

O comportamento das tensões ao longo de todo o processo de carga é ilustrado na Figura 3, onde, ao final do ensaio, a maior diferença de potencial entre células foi de 20 mV.

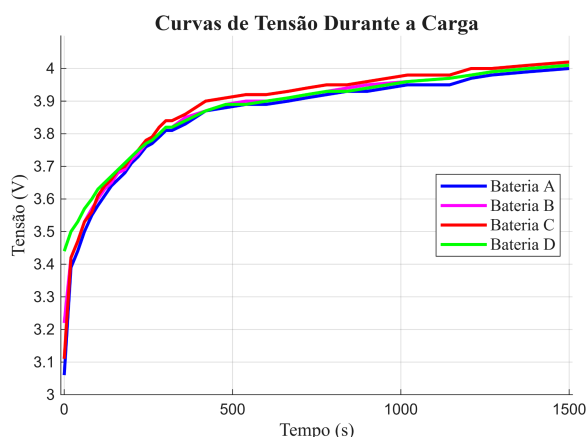


Figura 3. Curvas de potencial ao longo de todo o processo de carregamento.

Esse resultado valida experimentalmente a característica de auto-equilíbrio do conversor Flyback, visto que as células de menor potencial receberam uma parcela maior de corrente, acelerando seu carregamento e promovendo a equalização de tensão.

No segundo experimento, o conversor atuou durante a descarga das células, cujas curvas de tensão são exibidas na Figura 4, utilizando um reostato de potência como carga.

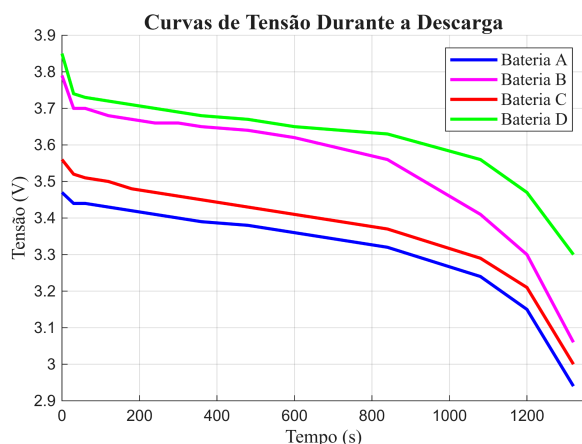


Figura 4. Curvas de potencial durante o ensaio de descarga.

Neste cenário, observou-se ao final do ensaio uma redução do desbalanceamento entre as células A, B e C. A diferença máxima de tensão entre células, que inicialmente era de 320 mV, foi reduzida para 120 mV ao término do ensaio. Por outro lado, a célula D mostrou uma taxa de queda de tensão mais lenta, comportamento atribuído à característica físico-química das células de íon-lítio, que apresentam a maior parte de sua capacidade útil concentrada no entorno de sua tensão nominal, sendo este intervalo entre 4,0 V e 3,6 V para células do modelo 18650 (MASOUDINEJAD, 2020). Desse modo, células operando dentro deste intervalo

apresentam uma taxa de decaimento de tensão menor quando comparadas às que operam abaixo desta faixa.

## CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a aplicação do Conversor CC-CC Flyback de múltiplas saídas na topologia de duas chaves para equalização de células de íon-lítio é válida e se mostra uma solução eficiente para ser utilizada em sistemas de gerenciamento de baterias.

A aplicação do equalizador durante o regime de carga promoveu uma diferença máxima de tensão entre células de 20 mV, garantindo uma operação segura do banco de baterias.

No processo de descarga, apesar de mitigar o desbalanceamento, o comportamento da célula D evidenciou a influência do estado de carga na dinâmica do balanceamento, um fator que deve ser considerado em projetos de BMS.

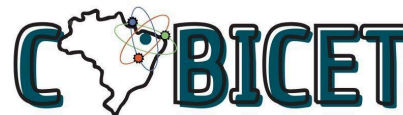
Por se tratar de um protótipo, há espaço para melhorias, como a implementação de estratégias de controle em malha fechada e a otimização do layout e componentes magnéticos do circuito, visando reduzir perdas e, conseqüentemente, aumentar sua eficiência.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC).

## REFERÊNCIAS

- BARRÉ, Anthony et al. A review on lithium-ion battery ageing mechanism and estimations for automotive applications. *Journal of Power Sources*, [s. l.], v. 241, p. 680-689, 2013.
- CASALS, Lluc Canals et al. Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis. *Journal of Environmental Management*, [s. l.], v. 232, p. 354-363, 2019.
- DI RIENZO, Roberto et al. A novel methodology to study and compare active energy-balance architectures with dynamic equalization for second-life battery applications. *Journal of Energy Storage*, [s. l.], v. 73, e108772, 2023.
- DI RIENZO, R.; ZENI, M.; BARONTI, F.; RONCELLA, R.; SALETTI, R. Passive balancing algorithm for charge equalization of series connected battery cells. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELECTRONICS FOR SUSTAINABLE ENERGY SYSTEMS, Cagliari: IEEE, 2020. p. 73-79. 2020.



MASOUDINEJAD, Mojtaba. Open-Loop Dynamic Modeling of Low-Budget Batteries with Low-Power Loads. *Batteries*, v. 6, n. 4, art. 50, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries6040050>.

MURATORI, Matteo; ARENT, Douglas; BAZILIAN, Morgan D. et al. Trends and 2025 insights on the rise of electric vehicles in the USA. **Nature Reviews Clean Technology**, [s. l.], v. 1, p. 827–845, 2025.

PAGLIOSA, Mauro André. Conexão série de conversores modulares: metodologia para análise do auto-equilíbrio das tensões e estudo do conversor Flyback a duas chaves. 2018. 201 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

PODIAS, Andreas et al. Sustainability Assessment of Second Use Applications of Automotive Batteries: Ageing of Li-Ion Battery Cells in Automotive and Grid-Scale Applications. *World Electric Vehicle Journal*, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 24, 2018.