

## Análise Experimental de Equalizador Híbrido

### Experimental Analysis of Hybrid Equalizer

Rafael De Andrade Maffezoli\*, José Rodolfo Galvão†, Fernanda Cristina Corrêa‡

#### RESUMO

Este estudo propõe a análise de funcionamento de uma topologia de equalização de tensão que é presente em sistemas de gerenciamento de baterias (*Battery Management System* - BMS). O BMS tem a função de monitorar a tensão, corrente e temperatura das células de baterias que formam um pack e controlar estes parâmetros para garantir a segurança, vida útil e autonomia das baterias. Dentre as diversas funções do BMS, a equalização de tensão é fundamental para garantir o correto funcionamento de todas as células. Para isso, existem duas principais técnicas, a passiva, ativa e a combinação destas. Na literatura existem diferentes trabalhos que relatam esta técnica, mas nenhum apresenta dados experimentais. Desta forma, para investigar o princípio de operação, uma topologia híbrida ativa e passiva foi construída utilizando quatro células modelo 18650, divididas em dois módulos. Cada módulo possui duas células. O gerenciamento de cada módulo é feito por meio de um ESP32 e a equalização é passiva. A diferença de tensão entre módulos é ajustada por meio de uma equalização ativa. Os resultados apresentam os desafios para a construção desta topologia e apresenta o que precisa ser melhorado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Equalização Passivo; Equalização Ativo; Sistema de Gerenciamento de Baterias.

#### ABSTRACT



This study proposes the analysis of the functioning of a voltage equalization topology that is present in systems battery management system (BMS). The BMS monitors the voltage, current, and temperature of the battery cells that form a pack and controls these parameters to guarantee the safety, useful life, and autonomy of the batteries. Among the various functions of the BMS, voltage equalization is essential to ensure the correct functioning of all cells. For this, there are two main techniques, passive, active, and a combination of these. In the literature, there are different works that report this technique, but none present experimental data. Thus, to investigate the operating principle, an active and passive hybrid topology was built using four model 18650 cells, divided into two modules. Each module has two cells. Management of each module is done via an ESP32 and equalization is passive. The voltage difference between modules is adjusted using active equalization. The results present the challenges for building this topology and what needs improvement.



**KEYWORDS:** Passive Equalization; Active Equalization; Battery Management System.

## INTRODUÇÃO

Na atualidade, as células de bateria de íons de lítio desempenham um papel fundamental nas mais recentes tecnologias. Com a constante busca por fontes de energia limpa e a promoção da mobilidade sustentável, as demandas em relação às baterias teve um crescimento exponencial. Aspectos cruciais como eficiência, durabilidade e confiabilidade precisam ser cuidadosamente considerados para assegurar um desempenho otimizado e a integridade das baterias.

\* Bolsista Iniciação Científica - FA.  Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. ✉ maffezoli@alunos.utfpr.edu.br.

† Bolsista de Pós-Doutorado - FUNDEP.  Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. ✉ jgalvao@alunos.utfpr.edu.br. ☎ 3927277046492765.  0000-0001-6826-4676.

‡ Docente do Departamento Engenharia Elétrica e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.  Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. ✉ fernandacorrea@utfpr.edu.br. ☎ 1495216809511536.  0000-0003-4907-0395.

O sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS), desempenha um papel fundamental para garantir a excelência no funcionamento das baterias. Além de ser o principal sistemas de proteção, o BMS desempenha um papel além do balanceamento de tensão das baterias, como no monitoramento de corrente, estado de carga, vida útil e ao mesmo tempo supervisiona o funcionamento do *hardware* e do *software* do sistema (RAMKUMAR *et al.*, 2022).

Entre as funções de um BMS, o balanceamento de tensão é fundamental para o correto funcionamento das células. Quando a equalização das células é negligenciada, um desequilíbrio prejudicial pode emergir, o qual tem o potencial de impactar negativamente tanto a durabilidade quanto a capacidade total da bateria. Em um pack de baterias conectadas em série e ou paralelo, variações nos parâmetros das células podem levar a subsequente aceleração da degradação, com impacto negativo na potência disponível, capacidade e vida útil. O desequilíbrio pode desencadear a degradação da bateria e pode ainda aumentar o risco de falha térmica (HUA *et al.*, 2020). Importante destacar que os desequilíbrios nas células podem ter origem interna e externa, fatores internos são decorrentes dos processos de fabricação das células, que resultam em diferenças na impedância interna e na capacidade de armazenamento das células. Os fatores externos originam-se devido às condições térmicas de operação das células e aos ciclos intensos de carga e descarga. (GALVÃO *et al.*, 2022), tornando a intervenção do BMS essencial para mitigar essas disparidades. Para combater os desequilíbrios celulares, duas abordagens são empregadas: equalização ativa e passiva.

Na equalização ativa existem inúmeros tipos de topologias, como exemplo: capacitores, conversores, indutores. Essas topologias tem por objetivo redistribuir a carga das baterias. Por exemplo, uma topologia com indutores, a tensão da célula com maior carga é transferida para a de menor carga, utilizando o campo elétrico gerado pelo indutor (CASPAR; EILER; HOHMANN, 2016). Já no método passivo, o elemento central é um resistor dissipador, que gradualmente dissipa a carga da célula mais carregada, permitindo que ela se iguale à célula adjacente no circuito (ISMAIL; NUGROHO; KALEG *et al.*, 2017). Ao comparar as duas abordagens, é notável que a equalização ativa aproveita a tensão excedente da célula mais carregada, enquanto a passiva se limita a dissipar essa tensão na forma de calor. Isso implica que a equalização ativa oferece uma forma mais eficiente de gerenciar os desequilíbrios celulares, ao contrário do método passivo. Outro possível arranjo de equalização é a combinação das duas técnicas de equalização, que é o híbrido. O uso desse método de equalização diminui fatores como espaço físico e custo de componentes eletrônicos, por exemplo, para construir um circuito de topologia ativa é necessário um número maior de componentes de eletrônica de potência, o que deixa o projeto com um custo elevado quando comparado com o passivo que utiliza resistores.

Neste estudo, uma topologia de equalização híbrida ativa e passiva foi construída para análise com comportamento de equalização de tensão de baterias modelo 18650. Esta pesquisa busca compreender e comparar o desempenho dessas abordagens, contribuindo assim para o avanço do conhecimento relacionado ao campo da equalização de baterias.

## METODOLOGIA

A topologia de equalização híbrida foi construída utilizando um pack de 4 células modelo 18650, que foi dividido em dois módulos, cada módulo com duas células. Este número de células foi escolhido para facilitar a validação do circuito, sendo que para aumentar o número de células basta replicar os circuitos e algoritmos de equalização. Na Figura 1 apresenta-se um diagrama esquemático da construção da topologia híbrida. A equalização

de tensão de cada módulo é realizada através da equalização passiva, e a equalização entre módulos é realizada por meio de uma equalização ativa.

A equalização passiva utiliza um transistor modelo TIP31C, conectado a um optoacoplador 4N25. O transistor tem a função de atuar como chave semicondutora para habilitar quando necessário a equalização passiva. Um resistor de 4R7 Ohms e 5W de potência (STRINGARI *et al.*, 2020). O controle do circuito é feito por meio de um algoritmo de equalização implementado em um ESP32.

Para a implementação da equalização ativa, foi selecionado um indutor de 500uH e 5A, atendendo os requisitos do projeto (GALVÃO *et al.*, 2022). A transferência de energia entre os módulos 1 e 2 é controlada por meio de dois MOSFETs IRF530, os quais são controlados por um sinal PWM de frequência de 25 kHz. Nessa configuração com dois módulos, apenas um indutor é necessário para realizar o processo de equalização.

A comunicação e gerenciamento das topologias de equalização são realizados por microcontroladores modelo ESP32, que desempenham funções de alimentação e software. O protocolo ESP-NOW da Espressif é utilizado para transmitir com segurança valores de tensão entre os ESP32s em cada módulo. Cada ESP32 nos módulos escravos envia valores lidos por um conversor analógico-digital (ADS) para o endereço do dispositivo mestre, que os exibe no monitor serial para análise. Essa comunicação é essencial para monitorar o comportamento das baterias durante a equalização. Em aplicações comerciais, a escolha desse protocolo pode ser reavaliada, pois, embora funcional, não é amplamente utilizado comercialmente.

A leitura de tensão de cada célula foi realizada utilizando um conversor analógico para digital modelo ADS1015 com resolução de leitura de 12 bits.

A Figura 1 mostra a replicação crucial do circuito montado para validar a teoria do equalizador híbrido. A reorganização dos componentes e circuitos ao longo do projeto apresentou desafios, exigindo vários testes para a melhor abordagem. Inicialmente, os equalizadores passivos e ativos operavam separadamente, mas com a interligação, comportamentos individuais tiveram que ser reajustados para operar como um circuito unificado.

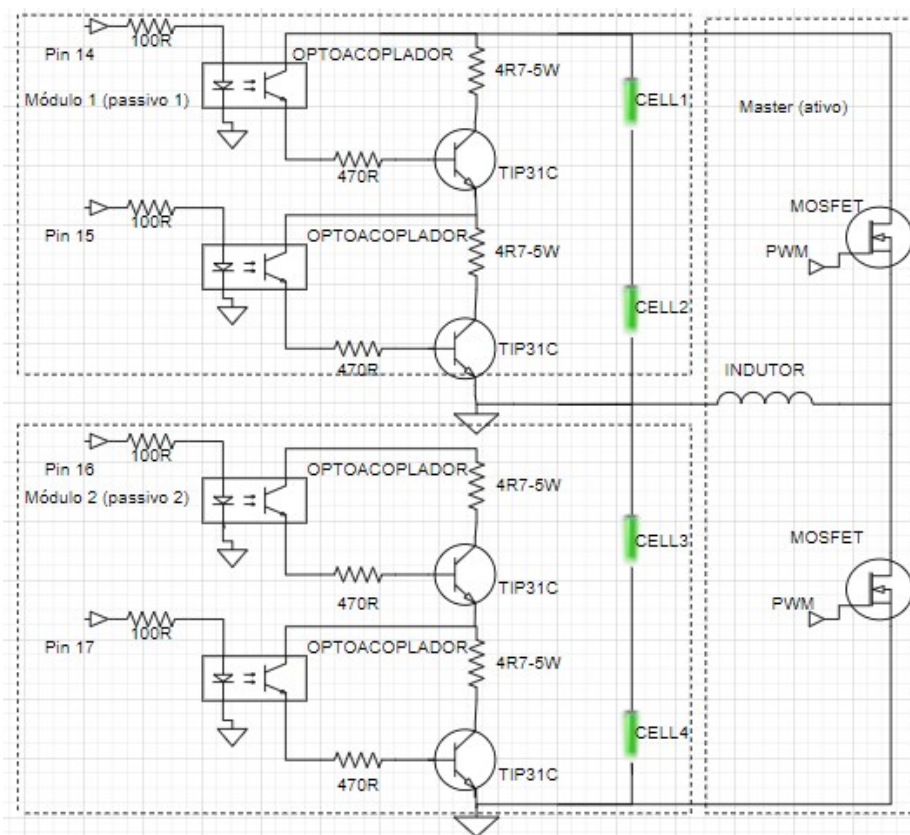
Na Figura 2, apresenta-se a configuração física resultante do circuito híbrido. Para referência, os sistemas de equalização passivo estão instalados nas placas de fenolite, enquanto o equalizador ativo permanece por enquanto na protoboard até algumas decisões sobre o circuito serem definitivas. Também é mostrado na figura que cada circuito tem seu devido microcontrolador, que faz a comunicação do circuito citado anteriormente. Com a conclusão da montagem física, estamos prontos para avançar nos testes relacionados a análise detalhada.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A montagem da configuração híbrida foi iniciada e diversos desafios foram apresentados, problemas além do simples remanejamento do circuito. Após a conclusão da montagem física e o início dos testes, as topologias que antes estavam programadas para operar de maneira individual apresentaram comportamentos que não eram condizentes com o esperado, apresentando falhas na interação entre elas e problemas nas funcionalidades que anteriormente estavam operacionais, por conta disso, os circuitos tiveram que ser todos remanejados desde a parte física até a parte do *software*.

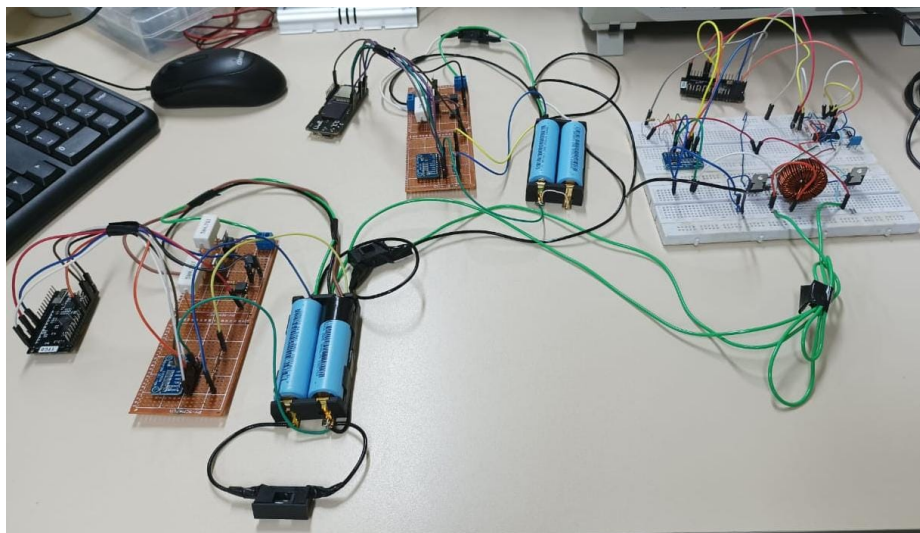
Para validar o desempenho do equalizador passivo, apresenta-se na Figura 3 um processo de equalização para validar somente a topologia passiva entre as células. As

Figura 1 – Topologia Híbrida



Fonte: autoria própria (2023)

Figura 2 – Montagem Física



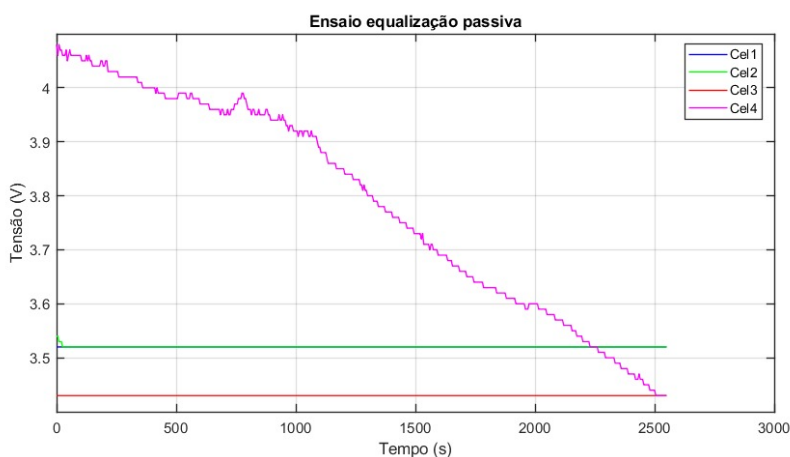
Fonte: autoria própria (2023)

células 1 e 2 pertencem ao módulo 1, enquanto as células 3 e 4 pertencem ao módulo 2. O módulo 1 possui as células equilibradas com uma tensão de 3,52V, enquanto as células 3 e 4 apresentam uma diferença de tensão de aproximadamente 0,65V. Observa-se nos resultados, a tensão da célula 4 é gradualmente dissipada até se igualar à tensão da célula 3. Nesse



momento, as células de cada módulo estão equalizadas. Com os dados obtidos no gráfico é possível ver que após a equalização do módulo 2, passa a existir uma diferença de tensão entre o módulo 1 e 2, esse desequilíbrio deverá ser corrigido pelo circuito ativo. A topologia passiva tem uma peculiaridade, experimentalmente, a sua operação pode ser testada através do tato, o resistor de 5W que se remete aos retângulos grandes nos circuitos passivos da figura 2, que dissipa a tensão da bateria através do efeito Joule. Portanto, se o resistor estiver quente, pode-se saber que a equalização está acontecendo.

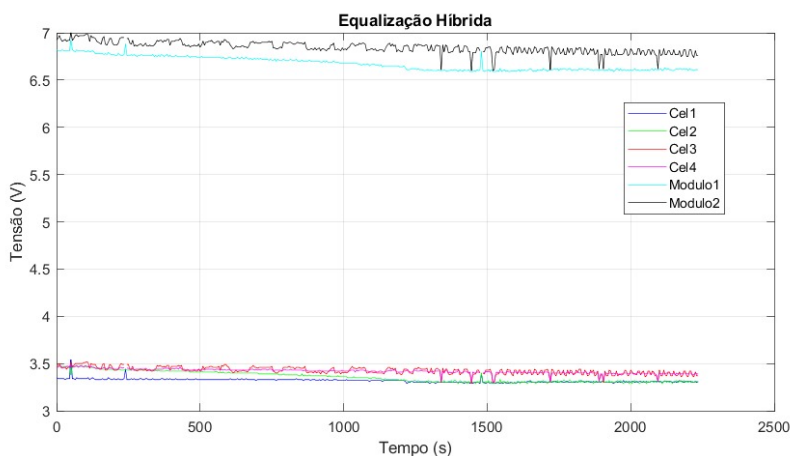
**Figura 3 – Resultado Equalização Passiva**



Fonte: autoria própria (2023)

Na Figura 4, apresenta-se o resultado da equalização híbrida. Esta topologia tem a função de ajustar a diferença de tensão entre os módulos 1 e 2 através da equalização ativa. Nota-se no gráfico que o módulo 2 possui uma tensão próxima de 7 Volts, e apresenta consideráveis ruídos na leitura de tensão, o mesmo ocorre com as Células 3 e 4 que formam o módulo 2. Esses ruídos são caracterizados por oscilações nos valores de leitura de tensão, o que impacta diretamente o funcionamento dos algoritmos de equalização e prejudica o desempenho dos circuitos.

**Figura 4 – Resultado Equalização Híbrida**



Fonte: autoria própria (2023)

## CONCLUSÃO

Este trabalho possibilitou a validação do equalizador híbrido em bancada e suas topologias adjacentes, como a passiva e a ativa. A partir dos dados coletados, constatamos que a equalização passiva é eficaz, onde as diferenças de tensão entre as células foram corrigidas pela topologia. No entanto, apesar de a equalização híbrida ter sido implementada e testada de forma inovadora, ainda apresenta ruídos que interferem no funcionamento do circuito e que deverão ser corrigidos em um futuro próximo, para que a topologia já validada em simulação, esteja operacional também em bancada. Inicialmente, o conceito do equalizador híbrido era meramente teórico, mas através deste projeto foi possível validar a ideologia de maneira prática.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à FUNDEP pelo financiamento desse projeto junto ao Programa Rota 2030 que permitiu essa pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- CASPAR, Maurice; EILER, Torsten; HOHMANN, Soeren. Systematic comparison of active balancing: A model-based quantitative analysis. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, IEEE, v. 67, n. 2, p. 920–934, 2016.
- GALVÃO, José Rodolfo *et al.* Hybrid Equalization Topology for Battery Management Systems Applied to an Electric Vehicle Model. **Batteries**, v. 8, n. 10, 2022. ISSN 2313-0105. DOI: 10.3390/batteries8100178. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2313-0105/8/10/178>.
- HUA, Yang *et al.* A comprehensive review on inconsistency and equalization technology of lithium-ion battery for electric vehicles. **International Journal of Energy Research**, Wiley Online Library, v. 44, n. 14, p. 11059–11087, 2020.
- ISMAIL, Kristian; NUGROHO, Asep; KALEG, Sunarto *et al.* Passive balancing battery management system using MOSFET internal resistance as balancing resistor. *In*: IEEE. 2017 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA). [S. l.: s. n.], 2017. P. 151–155.
- RAMKUMAR, M Siva *et al.* Review on Li-Ion Battery with Battery Management System in Electrical Vehicle. **Advances in Materials Science and Engineering**, Hindawi, v. 2022, 2022.
- STRINGARI, Daniel *et al.* Estudo e desenvolvimento de um BMS para baterias de ion-lítio. Joinville, SC, 2020.