

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO



DEYVID VICTOR SOUZA

CIRCUITO EQUALIZADOR DE CARGA PARA
BATERIAS

VITÓRIA-ES

JULHO/2023

Deyvid Victor Souza

CIRCUITO EQUALIZADOR DE CARGA PARA BATERIAS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Deyvid Victor Souza, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Vitória-ES

JULHO/2023

Deyvid Victor Souza

CIRCUITO EQUALIZADOR DE CARGA PARA BATERIAS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Deyvid Victor Souza, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

**Prof. Dr. Walbermark Marques dos
Santos**

Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

**Profa. Dra. Tiara Rodrigues Smarssaro
de Freitas**

Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Msc. Andre Luiz Silva Crivellari
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Vitória-ES

JULHO/2023

RESUMO

A utilização de baterias como sistema acumulador de energia remota a longas datas. Isto porque a bateria é uma das tecnologias mais simples para acúmulo e transporte de energia. Baterias de chumbo ácido, lítio, níquel etc, são empregadas em diversas funções como, por exemplo, sistema de UPS, notebook, veículos elétricos, subestações etc. Todavia, por conta da baixa tensão e capacidade de corrente que uma célula possui, geralmente recorre-se a associações série, paralela ou mista destas. Entretanto mesmo que um banco de baterias em série seja montado com células teoricamente iguais, não é garantida a divisão igualitária de tensão (carga) entre elas. Isso deve-se porque durante o processo construtivo, não é garantido que baterias do mesmo lote de fabricação possuem exatamente as mesmas especificações paramétricas. Por conta disso, há na literatura diversas propostas de sistemas (circuitos) para equalização de carga de baterias associadas em série. Estas propostas vão desde a colocação de resistores em paralelo com cada bateria da associação até a utilização de conversores eletrônicos de potência. Com base neste contexto, neste projeto é utilizado um conversor *flyback* com múltiplas saídas para realizar a equalização de um banco de baterias série. O circuito equivalente utilizado para emular a célula é um capacitor em série com um resistor. O diferencial desta proposta reside na operação do sistema equalizador que é desligado após as baterias estarem totalmente equalizadas, o que não foi encontrado nas referências consultadas. Simulações computacionais foram realizadas para avaliar a viabilidade da proposta.

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio da FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA E INOVAÇÃO DO ESPÍRITO SANTO (Fapes) – < “T.O 1068/2022, EDITAL FAPES Nº 21/2022 APOIO À INFRAESTRUTURA DE PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO EM LABORATÓRIOS INTERDISCIPLINARES

Palavras-chave: *Equalização de baterias; conversor CC-CC isolado; leitor de tensão; controle; microcontrolador.*

ABSTRACT

The use of batteries as a long-term remote energy storage system. This is because the battery is one of the simplest technologies for accumulating and transporting energy. Lead acid, lithium, nickel, etc. are employed in various functions such as UPS systems, notebooks, electric vehicles, substations, etc. However, due to the low voltage and current capacity that a battery has, series, parallel or mixed associations are generally used. However, even if a bank of batteries in series is assembled with theoretically equal batteries, the equal division of voltage (charge) between them is not guaranteed. This is because during the construction process, it is not guaranteed that batteries from the same manufacturing batch have exactly the same parametric specifications. Because of this, there are several proposals in the literature for systems (circuits) for charge equalization of batteries connected in series. These proposals range from the placement of resistors in parallel with each battery in the association to the use of power electronic converters. Based on this context, this project uses a flyback converter with multiple outputs to perform the equalization of a series battery bank. The equivalent circuit used to emulate the battery is a capacitor in series with a resistor. The differential of this proposal lies in the operation of the equalizer system, which is turned off after the batteries are fully equalized, which was not found in the consulted references. Computer simulations were performed to assess the feasibility of the proposal.

Keywords: Battery equalization; isolated DC-DC converter; voltage reader; control; microcontroller.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Equalizador resistivo.	9
Figura 2 – Equalizador capacitivo.	10
Figura 3 – Equalizador indutivo.	10
Figura 4 – Descarga de bateria em desequilíbrio de tensão $V(\text{volts}) \times t(\text{segundos})$.	13
Figura 5 – Recarga de bateria em desequilíbrio de tensão $V(\text{volts}) \times t(\text{segundos})$.	14
Figura 6 – Circuito equivalente de uma célula de lítio	15
Figura 7 – Conjunto de células em serie	16
Figura 8 – Esquema Conversor <i>flyback</i>	17
Figura 9 – Chave no primário fechada	18
Figura 10 – Chave aberta, corrente no secundário	19
Figura 11 – Chave aberta, capacitor alimentando a carga	19
Figura 12 – a) Corrente na chave e no enrolamento primário, b) Tensão no enrolamento primário, c) Fluxo magnético do núcleo, d) Tensão no enrolamento secundário, e) Corrente no diodo e no enrolamento secundário, f) Tensão sobre a chave, g) Tensão sobre o diodo	20
Figura 13 – Fluxograma da simulação	24
Figura 14 – Esquema células em série	25
Figura 15 – Dados do núcleo	28
Figura 16 – Esquema usado na simulação.	29
Figura 17 – Corrente na saída do secundário I_o , corrente no primário I_L , tensão na saída V_o , tensão no indutor V_L , V_m tensão na chave.	30
Figura 18 – Esquema com Filtro de saída.	31
Figura 19 – Corrente na saída do secundário I_o , corrente no primário I_L , tensão na saída V_o , tensão no primário V_L , tensão no <i>mosfet</i>	32
Figura 20 – Corrente na saída do secundário I_o , corrente no primário I_L , tensão na saída V_o , tensão no primário V_L , tensão no <i>mosfet</i>	34
Figura 21 – Esquema Conversor <i>flyback</i> isolado com 1 primário e 6 secundários. . .	35
Figura 22 – Filtros com chave para as células e saída de controle.	36
Figura 23 – Comparador.	36
Figura 24 – Controle.	37
Figura 25 – Tensão e corrente no primário.	38
Figura 26 – Equalização de Células.	38
Figura 27 – Equalizando a célula B4.	39
Figura 28 – Esquema das células com carga na bateria B2.	40
Figura 29 – Desequilíbrio forçado em B2.	40
Figura 30 – Desequilíbrio forçado em B2.	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	<i>Conversor analógico digital</i>
Al	<i>Densidade por espira em m^4</i>
Ae	<i>Área central do núcleo em m^2</i>
B	<i>Fluxo magnético weber</i>
CC	<i>Corrente contínua</i>
C40	<i>Descarga em 40% da corrente nominal</i>
C	<i>Capacitor em F</i>
C	<i>Capacitor em F</i>
E	<i>Energia em J</i>
f	<i>Frequência em Hz</i>
IL	<i>Corrente no indutor em A</i>
Iin	<i>Corrente de entrada em A</i>
Iout	<i>Corrente de saída em A</i>
I	<i>Corrente em A</i>
L	<i>Indutor em H</i>
Np	<i>Número de espiras no primário</i>
Ns	<i>Número de espiras no secundário</i>
P	<i>Potência em W</i>
Rc	<i>Resistência de carga em Ω</i>
Ri	<i>Resistência interna em Ω</i>
R	<i>Resistor em Ω</i>
Vout	<i>Tensão de saída em V</i>
Vin	<i>Tensão de entrada em V</i>

V_o	<i>Tensão de saída em V</i>
V_L	<i>Tensão no indutor em V</i>
V_m	<i>tensão no mosfet em V</i>
ΔV	<i>Variação de tensão em V</i>

SUMÁRIO

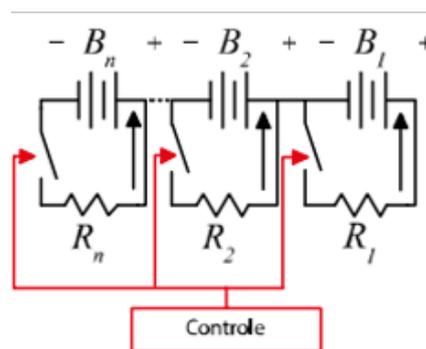
1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Justificativa	11
1.2	Objetivo principal	11
1.3	Objetivos específicos	11
2	BATERIA	12
2.1	Problemas da associação em série	12
2.2	Circuito equivalente	14
2.3	Esquema de ligação das células	15
3	CONVERSOR	17
3.1	Conversor <i>flyback</i> no modo de condução descontínua	17
3.1.1	Etapas de operação	18
3.2	Equações para dimensionamento	19
4	SIMULAÇÕES	23
4.1	Software para simulação	23
4.2	Ciclo de controle	23
4.3	Bateria	23
4.4	Conversor <i>flyback</i>	26
4.5	Simulação do circuito proposto	33
4.6	Resultados	37
5	CONCLUSÃO	42
5.1	Proposta de trabalho futuro	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

A crescente utilização de baterias como forma prática de armazenamento e transporte de energia tem se tornado uma tendência nos últimos anos. Atualmente, essas baterias são empregadas em uma ampla variedade de aplicações, como veículos elétricos, sistemas de backup e energia renovável (BECK, 2018). Alguns problemas enfrentados em relação a baterias é sua vida útil e o quão confiável elas são; isto pode ser resolvido usando baterias de melhor qualidade, mantendo o funcionamento na faixa ideal de tensão e corrente, fazendo controle de temperatura e mantendo, as baterias na mesma tensão nos casos em que suas células internas estão em serie, para que todas se comportem da melhor forma possível (FIGUEIRÓ, 2015).

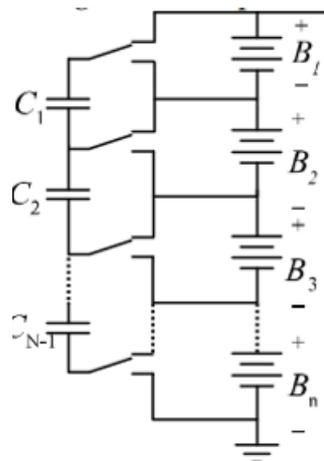
Usa-se equalizadores para garantir que as células no interior de uma bateria, ou em banco de baterias, tenha mesma tensão, quando dispostas em serie. Existe no mercado diversos equalizadores de baterias, tanto passivos quanto ativos. Os passivos tem pouca eficiência, custo baixo e fácil controle; como por exemplo equalizador resistivo, que baixa a tensão das células com tensão acima das demais, dissipando essa energia em resistores Figura 1. Enquanto os ativos tem melhor eficiência, custo mais elevado e controle mais difícil; como por exemplo equalizadores capacitivos que faz os capacitores passar pelas células através de chaveamento, carregando em células com maior tensão e descarregando em células com menor tensão Figura 2; e equalizadores indutivos, tem como entrada o primário e saída vários secundários que são ligados a cada conjunto paralelo que estão dispostos em serie e pode ser alimentado por uma fonte externa, carregando a serie de baterias de forma igual, ou pode usar o próprio conjunto serie como entrada, forçando as saídas sempre estar em mesma tensão Figura 3. sendo que tecnologias de equalizadores ativos têm avançado mais rápido para melhorar o desempenho e confiabilidade das baterias. (COSTA, 2018)

Figura 1 – Equalizador resistivo.



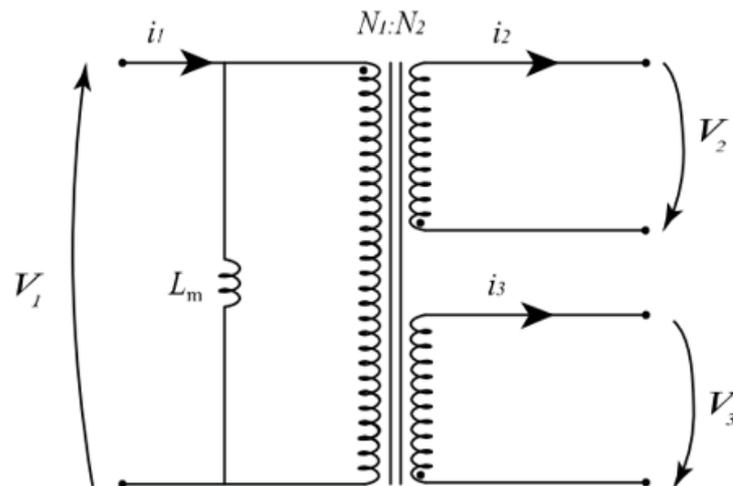
Fonte: Costa (2018)

Figura 2 – Equalizador capacitivo.



Fonte: Costa (2018)

Figura 3 – Equalizador indutivo.



Fonte: Costa (2018)

Este TCC aborda equalizador ativo, através de conversor isolado *flyback* em modo de condução descontinua, onde o mesmo será responsável por igualar as tensões das células isoladamente de forma a manter a equalização, fazendo uso de circuitos simples. Já foi mostrado em diversos trabalhos que manter as baterias em série com mesma carga, aumenta muito sua vida útil, além da confiabilidade de entregar a energia total quando requerido por uma carga, mostrando a importância desse tipo de trabalho no meio acadêmico, além de melhorar o custo benefício para aquisição de baterias, já que as mesmas terão uma vida prolongada (FIGUEIRÓ, 2015).

1.1 Justificativa

O avanço tecnológico e o estudo no desenvolvimento de baterias com maior durabilidade e menor peso tem sido significativos, impulsionados pelo crescente uso dessas baterias em novas tecnologias de geração de energia, comunicação e veículos elétricos(FILHO, 2007). Onde a confiabilidade e durabilidade das baterias são grandes aliados para que estes sistemas funcionem por mais tempo e de melhor qualidade como um todo, viabilizando ainda mais as aplicações com seu uso.

Há muito que ser desenvolvido em relação a melhoria da qualidade e controle das baterias, contribuições tem surgido com o passar do tempo, fazendo com que as baterias tenham durabilidade, eficiência e confiabilidade maiores. Este trabalho busca contribuir com o estudo e tecnologia de equalizadores de baterias, trazendo melhorias para este meio, ajudando a impulsionar ainda mais o uso das baterias.

1.2 Objetivo principal

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar a proposta de um sistema de equalização isolado para baterias que possua perdas mínimas e simplicidade de construção.

1.3 Objetivos específicos

Avaliar a dinâmica do sistema proposto sob algumas condições de operação, determinar limites seguros de corrente e tensão para um banco de baterias especificado, analisar o equalizador sendo acionado para equalizar uma célula, ou um conjunto de célula, verificar as ondulações e picos de tensões durante o acionamento e corte do conversor.

2 BATERIA

As baterias são uma tecnologia antiga, utilizada há séculos em diversas aplicações (FILHO, 2007) Para o projeto em questão, a escolha por baterias de lítio se deve ao fato de que elas têm se destacado como a principal célula utilizada atualmente em carros elétricos, *backups* de segurança, armazenamento de energia fotovoltaica, entre outros (BECK, 2018)

No entanto, é importante destacar que o uso das baterias de lítio requer atenção às especificações do fabricante. Conforme descrito em (SAMSUNG, 2015), em geral, as baterias de lítio são capazes de entregar 100% da sua carga nominal em C40, o que significa que a corrente de descarga estando em 40% da sua capacidade de corrente em uma hora (Ah) faz com que a energia especificada na bateria seja entregue 100% a carga, mas esta capacidade vai sendo reduzida gradualmente com correntes acima desse valor. Além disso, é essencial respeitar a faixa de tensão de segurança das células, que varia entre 3,0V e 4,2V. O não cumprimento dessas especificações pode levar a uma redução exponencial da vida útil das baterias ou até mesmo a danos instantâneos, dependendo do nível de tensão ou corrente ultrapassado (FOGAÇA, 2013).

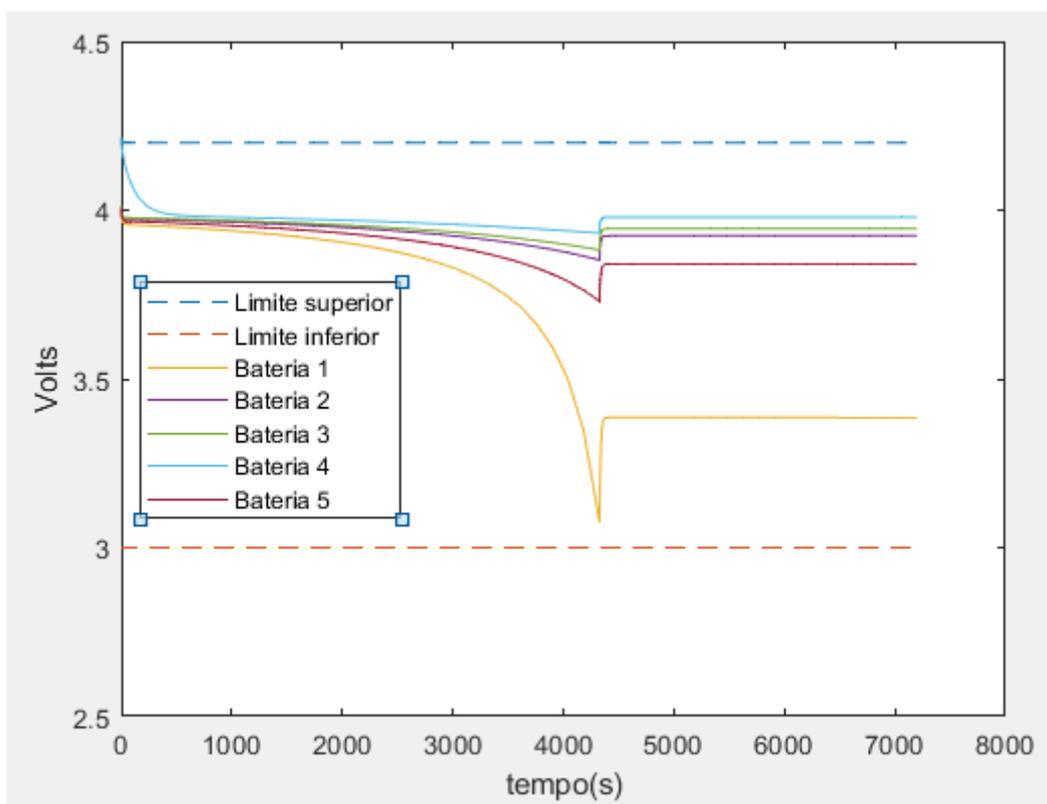
2.1 Problemas da associação em série

Não é possível garantir que células de mesmo lote sejam 100% idênticas, na fabricação de qualquer produto, sempre haverá sutis diferenças, não há como garantir perfeita igualdade. Por isso o uso das baterias com células em série ao longo do tempo causa o desequilíbrio de tensão. (FIGUEIRÓ, 2015). Sistemas de controle que usam tensão como parâmetro para informar a capacidade das baterias ficam comprometidos diante do desbalanço de tensão de células da bateria, pois o mesmo identifica uma tensão onde ainda há capacidade de entregar energia, mas quando uma célula chega em seu limite de tensão, a bateria é impedida de entregar potência, para proteção da célula que chegou em seu limite.

O controle de tensão das baterias é responsável por interromper a carga e a descarga quando células individuais atingem os limites de tensão estabelecidos. Esta medida de proteção é essencial para evitar danos e garantir o bom funcionamento da bateria. Na Figura 4 é ilustrado a descarga de 5 baterias em série, onde as linhas pontilhadas são as restrições críticas de tensão para baterias de lítio (4,2V e 3V), pode ser percebido, que quando uma célula atinge a tensão crítica que é de 3,2V (para circuito de proteção

de notebooks), todo sistema desarma, fazendo com que o fornecimento de energia seja cessado, o degrau de tensão que ocorre no desligamento é devido a queda de tensão na resistência interna das células. Na Figura 5, temos os mesmos parâmetros de restrição da figura 4, mas agora sera feito a recarga das células, percebi-se que quando uma célula atinge o ponto critico de máxima tensão (4,2V) o carregamento é cessado, o degrau no corte do carregamento é devido a queda de tensão sobre a resistência interna das células.

Figura 4 – Descarga de bateria em desequilíbrio de tensão V(volts) x t(segundos)



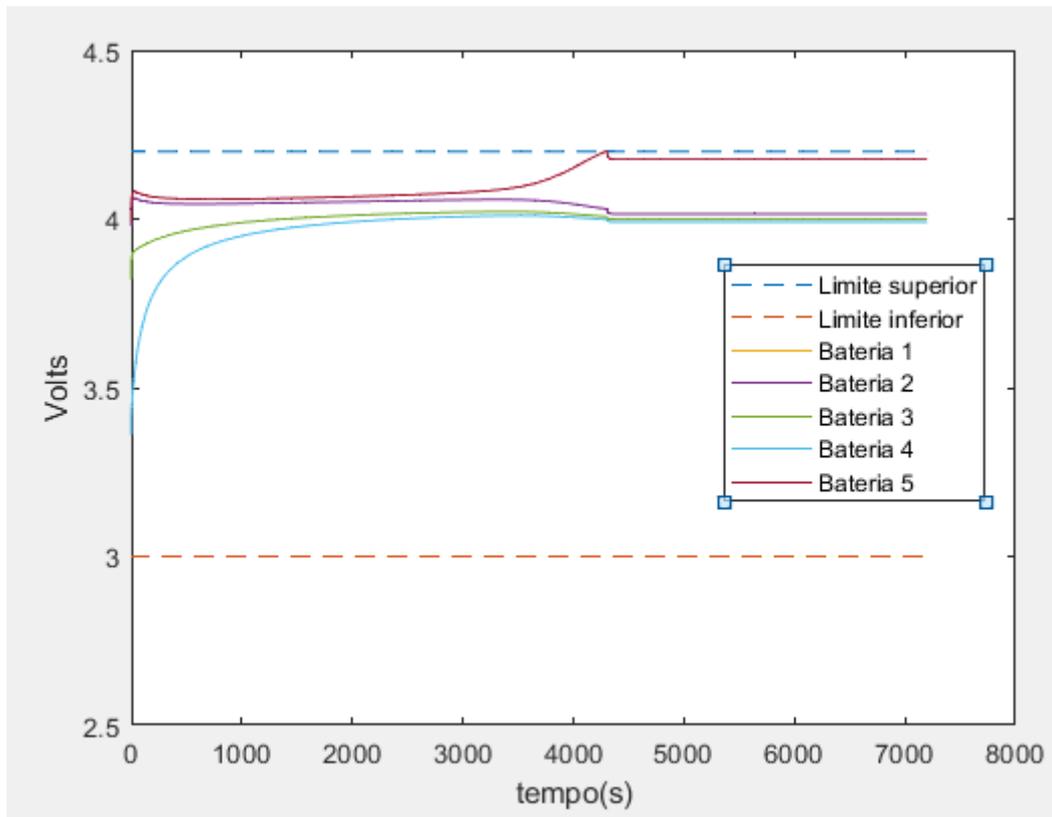
Fonte: Próprio autor

Quando uma célula atinge o limite superior de tensão, geralmente em torno de 4,2V, o controle de tensão interrompe a carga para evitar a sobretensão. Da mesma forma, quando uma célula atinge o limite inferior de tensão, por exemplo, 3,2V, a descarga é interrompida para prevenir a descarga excessiva.(FIGUEIRÓ, 2015)

É importante ressaltar, mesmo que algumas células tenham energia disponível, a presença de células com tensões extremas compromete a confiabilidade do sistema. Embora a leitura da tensão total possa indicar uma capacidade aparente de fornecer energia, a leitura individual de tensão é crucial para garantir a segurança e a vida útil da bateria.

Portanto, a utilização de um equalizador de tensão em células conectadas em série se torna essencial. Este dispositivo tem a função de equalizar as tensões entre as células individuais, evitando disparidades e permitindo que a bateria funcione de maneira mais eficiente e

Figura 5 – Recarga de bateria em desequilíbrio de tensão V(volts) x t(segundos)



Fonte: Próprio autor

confiável. Dessa forma, o equalizador de tensão desempenha um papel fundamental na otimização do desempenho e no aumento da vida útil das células em série.

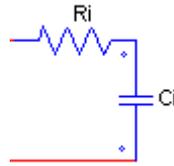
2.2 Circuito equivalente

Na literatura, existem diversos circuitos equivalentes de células de lítio, desde os mais simples, apenas um resistor em série com um capacitor, até os mais avançados, com capacitores, resistores, tanto em série quanto em paralelo e controle de tensão, para chegar o mais próximo do real nos mínimos detalhes de uma célula (VARGAS, 2013).

Para este trabalho, se fará uso de um circuito simples de célula de lítio, como mostrado na Figura 6.

R_i é a resistência interna da célula, o que representa as perdas e o capacitor C_i representa o armazenamento de energia da célula; para medir esses valores internos de uma célula real são necessários apenas 2 passos;

Figura 6 – Circuito equivalente de uma célula de lítio



Fonte: Próprio autor

Primeiro: Medir tensão da célula sem carga.

Segundo: Medir tensão da célula com carga.

Seguindo esses dois passos, consegue-se medir a queda de tensão que o resistor R_i causa, conseqüentemente é possível calcular o seu valor através da equação (2.1).

$$R_i = \frac{V_{out1} - V_{out2}}{\frac{V_{out2}}{R_c}} \quad (2.1)$$

Onde $\frac{V_{out2}}{R_c}$ é a corrente série do circuito, V_{out2} é a tensão na saída da célula com carga e R_c é a carga e V_{out1} é a tensão de saída com circuito aberto (FOGAÇA, 2013).

Para calcular a capacitância, sabendo que a variação de tensão da célula é de 3V a 4,2V, então tem-se que:

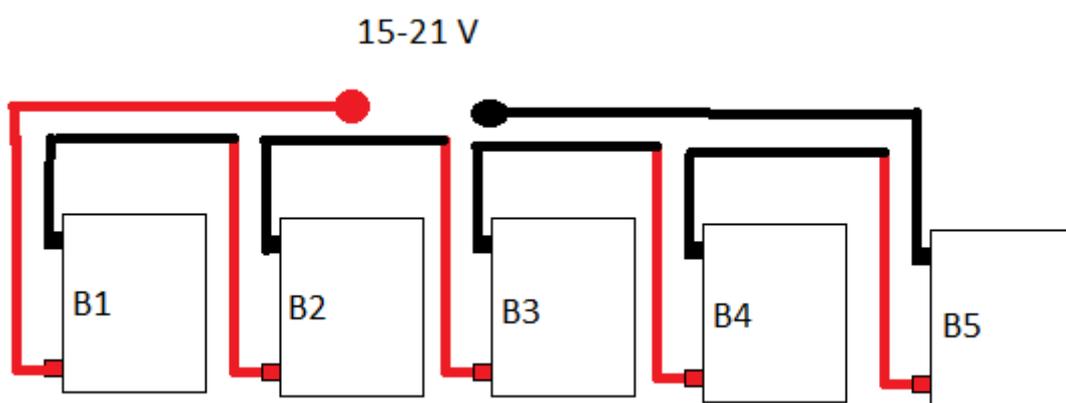
$$E_c = \frac{C_i \cdot \Delta V^2}{2} \quad (2.2)$$

Onde E_c é a energia interna da célula e ΔV a variação de tensão na mesma (NILSON, 2010).

2.3 Esquema de ligação das células

Para a simulação será usado um esquema simples de células em série, contendo 5 células, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Conjunto de células em serie

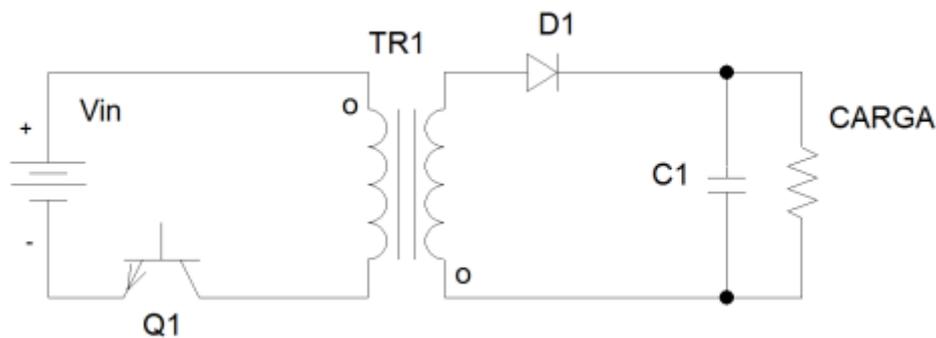


Fonte: Próprio autor

3 CONVERSOR

Na literatura existem vários conversores (NASSABAY, 2019), como buscamos para este TCC um conversor de fácil montagem, simples, e que atenda aos requisitos de funcionamento do trabalho, foi analisado o conversor *flyback*, que é amplamente utilizado em aplicações de baixa potência e se destaca por sua simplicidade e baixo custo de implementação. O *flyback* opera com base no armazenamento de energia em um indutor e na interrupção do fluxo de corrente por meio de um interruptor (DIDONET, 2015). Para o projeto de equalização de células, consideramos a configuração específica do conversor, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Esquema Conversor *flyback*



Fonte: Nassabay (2019)

O conversor *flyback*, pode trabalhar em dois modos, o de condução contínua, onde a corrente no indutor nunca chega a zero e o modo de condução descontínua, onde a corrente do indutor sempre chega a zero (NASSABAY, 2019).

Para este trabalho, usaremos o modo de condução descontínua, por ser um projeto mais barato devido ao núcleo ser menor.

3.1 Conversor *flyback* no modo de condução descontínua

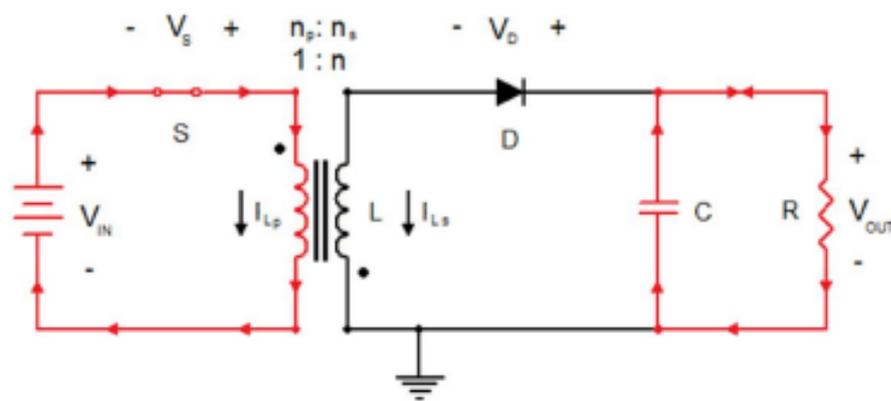
No modo de condução descontínua, a corrente do indutor primário do conversor *flyback* é interrompida durante uma parte do ciclo de operação. Isso ocorre quando a carga aplicada ao conversor é grande o suficiente para que a corrente no indutor seja completamente esgotada antes do próximo ciclo de chaveamento (COSTA, 2018)

3.1.1 Etapas de operação

O funcionamento do conversor *flyback* em regime é realizado em três passos principais, conforme descrito a seguir (NASSABAY, 2019).

- Passo 1: Inicialmente, a chave (*MOSFET*) do conversor *flyback* é fechada, permitindo que a fonte de energia carregue o indutor por meio do enrolamento primário. Nesse momento, o diodo no enrolamento secundário está em um estado de circuito aberto, o que significa que não há circulação de corrente no secundário. Durante esse período, a carga é mantida pelo capacitor, que retém a energia recebida do primário do transformador. Essa etapa é ilustrada na Figura 9 (NASSABAY, 2019).

Figura 9 – Chave no primário fechada

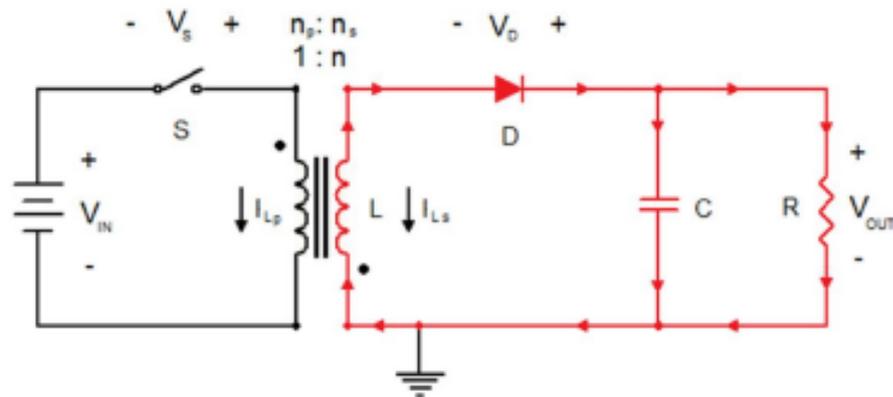


Fonte: Nassabay (2019)

- Passo 2: Após o carregamento do indutor primário, o próximo passo é abrir a chave (*MOSFET*) do conversor *flyback*, interrompendo assim a corrente no primário. Essa ação provoca uma reversão da tensão no indutor, forçando a corrente a continuar fluindo em seu sentido original. Nesse momento, o diodo no enrolamento secundário começa a conduzir, permitindo a transferência de energia para o capacitor e a carga conectada ao secundário do transformador. Essa etapa é ilustrada na Figura 10 (NASSABAY, 2019).
- Passo 3: A energia armazenada no indutor acaba, cessando a corrente no secundário, fazendo com que nesse intervalo (fim da energia no secundário até o acionamento da chave) toda energia seja fornecida pelo capacitor para a carga como ilustrado na Figura 11 (NASSABAY, 2019).

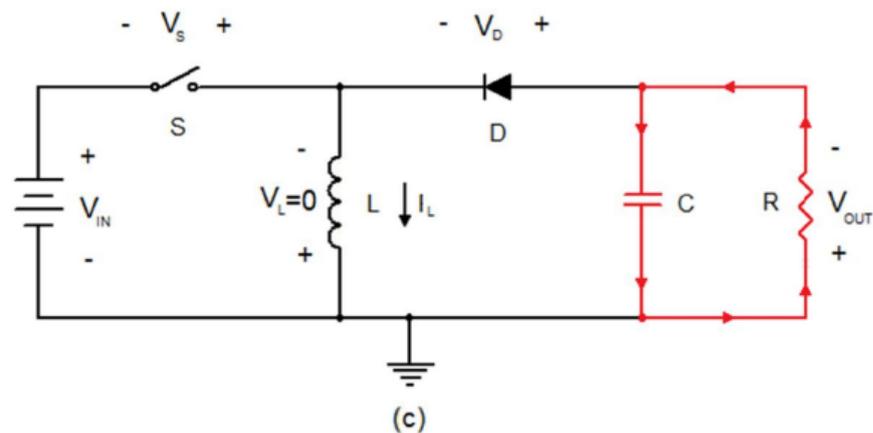
O ciclo de operação do conversor consiste em alternar entre estes três estados, fechando e abrindo a chave (*MOSFET*), a fim de permitir a transferência de energia do primário para

Figura 10 – Chave aberta, corrente no secundário



Fonte: Nassabay (2019)

Figura 11 – Chave aberta, capacitor alimentando a carga



Fonte: Nassabay (2019)

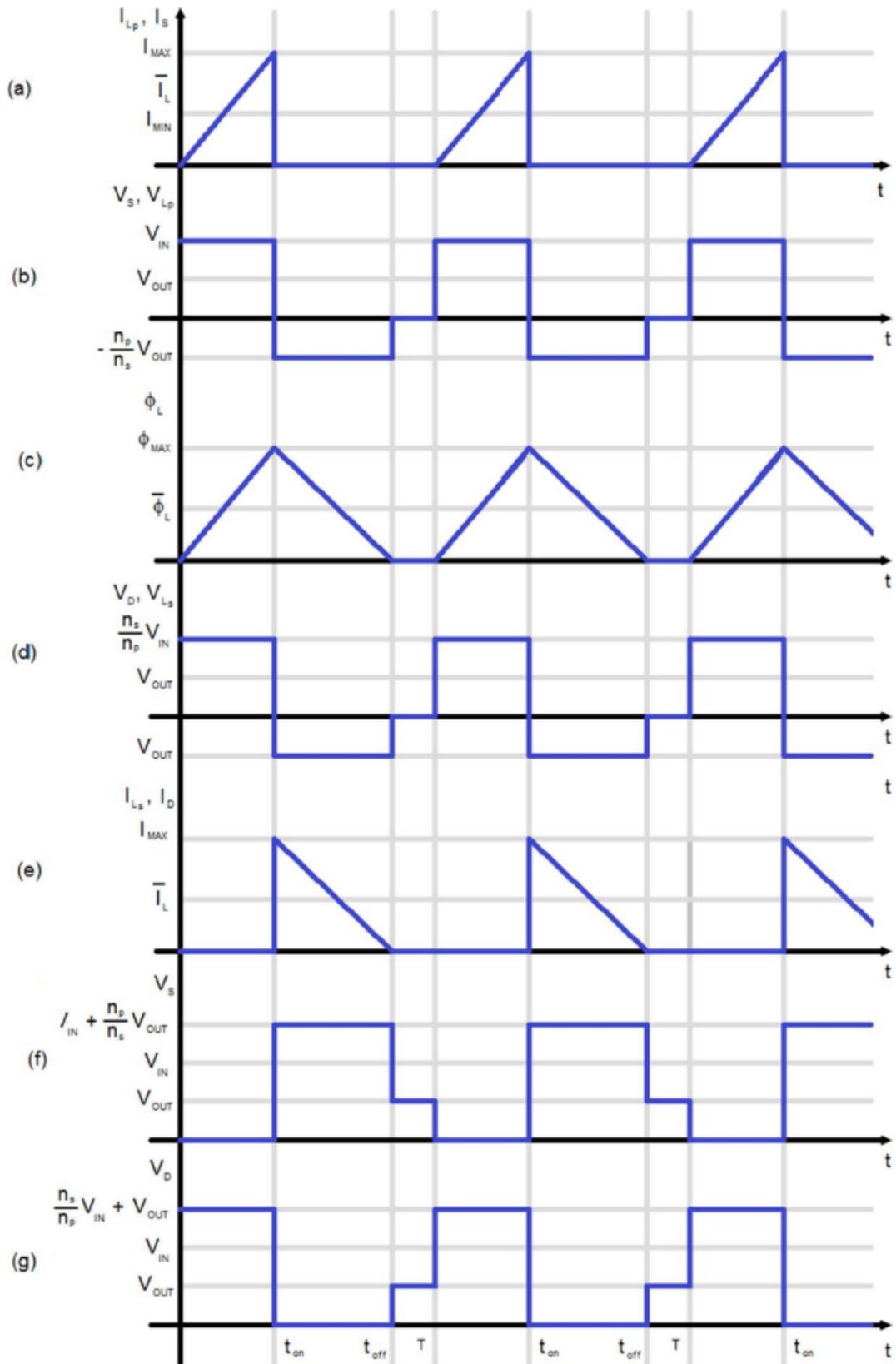
o secundário e fornecer a energia necessária para a carga. Espera-se ter os resultados de ondas segundo, (NASSABAY, 2019), assim como mostrado na Figura 12.

Ao entender esses passos principais, torna-se possível compreender o princípio de funcionamento do conversor *Flyback* e como ele permite a conversão de energia.

3.2 Equações para dimensionamento

No modo de condução descontínua do conversor *Flyback*, é possível utilizar equações específicas para obter resultados relacionados à tensão de saída, corrente de saída e forma de onda. a condução descontínua ocorre quando a corrente na indutância do transformador do *Flyback* atinge zero durante cada ciclo de operação. Nesse modo, as equações permitem analisar o comportamento do conversor e calcular seus parâmetros principais. Aqui estão

Figura 12 – a) Corrente na chave e no enrolamento primário, b) Tensão no enrolamento primário, c) Fluxo magnético do núcleo, d) Tensão no enrolamento secundário, e) Corrente no diodo e no enrolamento secundário, f) Tensão sobre a chave, g) Tensão sobre o diodo



algumas das equações importantes para o modo de condução descontínua:

- Relaciona tensão de entrada e saída:

Relaciona a razão entre a tensão de saída V_{out} e a tensão de entrada V_{in} com os parâmetros de transformação N_s e N_p e o ciclo de trabalho D .

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_s \cdot D}{N_p \cdot (1 - D)} \quad (3.1)$$

- Fator de desmagnetização:

Determina o fator de desmagnetização x com base nos parâmetros de transformação N_s e N_p , a tensão de entrada V_{in} , a duração do ciclo de chaveamento DT_s e a indutância L .

$$\frac{N_s \cdot V_{in} \cdot DT}{L} = \frac{N_p \cdot V_{out} \cdot xT}{L} \implies \frac{N_s \cdot V_{in} \cdot D}{N_p \cdot V_{out}} \quad (3.2)$$

- Relação da indutância, com as tensões de entrada e saída:

Equação que relaciona a indutância L , tensão de entrada V_{in} , tensão saída V_{out} , número de espiras N_s e N_p , resistência de carga R , frequência f , corrente no indutor visto pelo secundário i_{ls} .

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R} = \frac{i_{ls}}{2} \cdot x = \frac{1 \cdot V_{in} \cdot DT}{2 \cdot L} \cdot \frac{N_s \cdot V_{in} \cdot D}{N_p \cdot V_{out}} \implies \frac{V_{out}}{V_{in}} = D \cdot \sqrt{\frac{N_s \cdot R}{N_p \cdot 2fL}} \quad (3.3)$$

- Energia consumida por ciclo.

$$E = \frac{P}{f} \quad (3.4)$$

- Área do núcleo:

Equação utilizada para calcular a área do núcleo do indutor (Al) é dada por:

$$Al = \frac{A_e^2 \cdot B_{max}^2}{2 \cdot E} \quad (3.5)$$

onde A_e representa a área efetiva da seção transversal do núcleo do indutor e B_{max} é a densidade máxima de fluxo magnético. Esta equação permite determinar a área necessária do núcleo do transformador com base na energia consumida.

Essas equações são importantes ferramentas para o dimensionamento e análise do conversor *Flyback*, permitindo estimar a corrente de saída, a energia consumida e a área do núcleo do transformador. Com base nesses cálculos, é possível projetar e otimizar o sistema de equalização de baterias de forma mais precisa e eficiente (NASSABAY, 2019).

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

4.1 Software para simulação

Para a simulação foram feitos testes nos *softwares* PROTEUS, SIMULINK e PSIM, o que teve todos os recursos necessários de forma mais simples para realização da simulação foi o PSIM.

Com o PSIM, foi possível montar o circuito do conversor *flyback* com todas as saídas necessárias, configurar os parâmetros dos componentes, como indutores, capacitores, resistores e *MOSFETs*, e simular o funcionamento do circuito em diferentes condições de operação.

Além disso, o PSIM permite gerar gráficos que representam as formas de onda da tensão de entrada, tensão de saída, corrente, *ripple* de tensão, entre outros parâmetros relevantes.

Por esse motivo o PSIM foi a escolha para simular o trabalho.

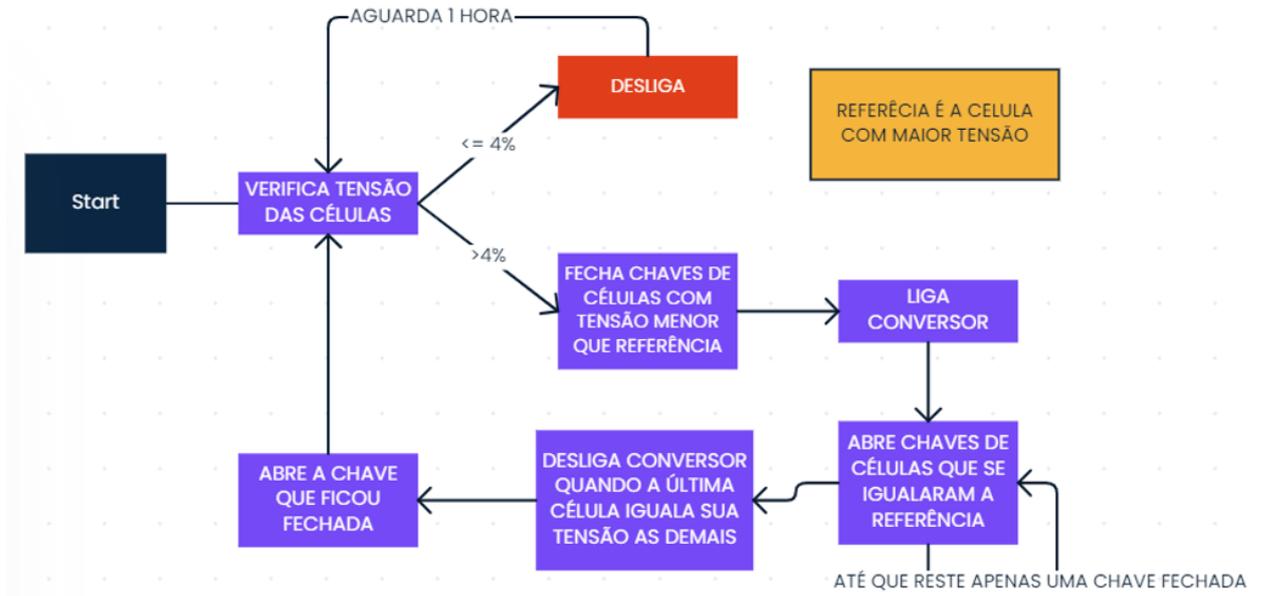
4.2 Ciclo de controle

Foi criado um fluxograma para representar o funcionamento do circuito como um todo. Inicia-se ligando o sistema no *start*, logo após acontece a medição das células, onde verifica-se a diferença de tensão entre elas ultrapassa 4%, se não ultrapassar, o sistema permanece desligado e aguarda 1 hora para fazer as medições novamente. Caso ultrapasse os 4%, então iniciasse o ciclo para equalizar as células, quando a equalização termina, o sistema volta para o ciclo onde mantém o circuito desligado Figura 13.

4.3 Bateria

Para simular uma célula de lítio, será usado um circuito simples, como citado na seção 2.2, onde o mesmo faz uso de um resistor (representa a resistência interna da célula) e um capacitor (representa a energia interna da célula). Para calcular os componentes, podem ser usados as equações 2.1 e 2.2 e os parâmetros de uma célula de lítio.

Figura 13 – Fluxograma da simulação



Fonte: Próprio autor

Para coletar os parâmetros da célula, foi feito ensaios em 5 células de lítio, obtendo as seguintes informações:

- Tensões das células em aberto $V_{out1} = 4,05V$.
- Resistência usada como carga $R_c = 0,66\Omega$.
- Media das Tensões com carga $V_{out2} = 3,68V$, com desvio máximo de 0,01.
- energia interna das células 14,4Wh
- Calculo da resistência interna usando a equação 2.1:

$$R_i = \frac{V_{out1} - V_{out2}}{V_{out2}/R_c} = \frac{4,05 - 3,68}{\frac{3,68}{0,66}} = 0,066\Omega \quad (4.1)$$

Com o valor da resistência calculado, precisa-se agora calcular o valor da capacitância segundo a energia interna da célula.

- Calculo da capacitância interna usando a equação 2.2:

$$E_c = \frac{C_i \cdot \Delta V^2}{2} \implies C_i = \frac{2 \cdot E_c}{\Delta V^2} = \frac{2 * (14,4)}{(4,2 - 3)^2} = 20F \quad (4.2)$$

Com esse valor de capacitância e energia interna de 14,4Wh, para ser possível visualizar a equalização por completo, a simulação levou mais de 30 minutos para ser concluída. Para reduzir o tempo de simulação, foi feito o cálculo usando 5% da energia interna da célula original, mas foi mantido os outros parâmetros. Sendo assim, a energia interna total da célula passa a ser 0,72Wh.

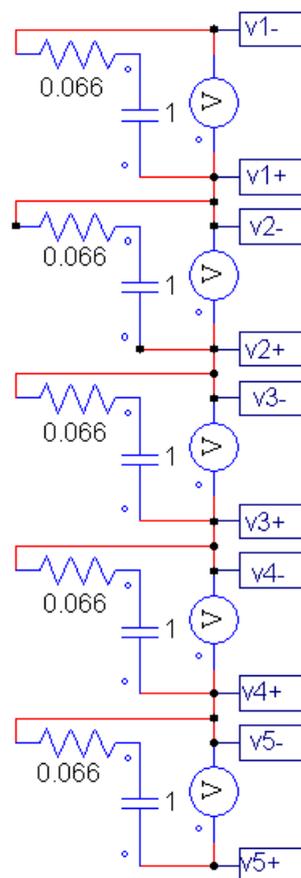
Será recalculado o valor da capacitância usando o novo valor de energia interna.

- Cálculo da capacitância interna com valor de energia reduzido usando a equação 2.2:

$$E_c = \frac{C_i \cdot \Delta V^2}{2} \implies C_i = \frac{2 \cdot E_c}{\Delta V^2} = \frac{2 * (0,72)}{(4,2 - 3)^2} = 1F \quad (4.3)$$

Com os valores calculados, foi feito o circuito para simulação das células em série, ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Esquema células em série



Fonte: Próprio autor

4.4 Conversor *flyback*

Para calcular os parâmetros do conversor seguir-se-á as seguintes informações.

- Tensão máxima por secundário de 4,2V, pois deve ser a mesma tensão da célula.
- 5 células em série o que irá demandar 5 secundários para equalizar as células e um para controle, somando 6 secundários.
- Faixa de tensão de entrada do conversor 16V-21V, pois é a soma das tensões das células.
- Potência de saída 24W (valor definido para máxima potencia).
- D máximo de 0,5 (valor definido para maior ciclo de trabalho).
- Frequência de 50KHz.

Essas informações foram obtidas tomando como base a tensão máxima e mínima de recarga das células segundo *datasheet*, (FOGAÇA, 2013).

A frequência de operação foi escolhida seguindo o trabalho feito por (COSTA, 2018). O valor de 24W foi selecionado com base em experimentos realizados por mim nos últimos 2 anos, o desequilíbrio de carga ocorre lentamente, resultando em uma diferença de aproximadamente 0,1V por mês. Portanto, para o equilíbrio de tensão, não é necessária grande potência, sendo que os 24W são mais do que suficientes para o projeto. O ciclo de trabalho foi escolhido em 0,5 como valor máximo por segurança, para garantir que o inversor não ultrapasse essa marca podendo entrar em saturação.

Tem-se um diodo para retificar a saída do secundário, onde o mesmo precisa de 0,7V para conduzir (NILSON, 2010), então para se ter uma saída de 4,1V, precisa-se somar este valor ao valor que se deseja.

$$V_{out} = 4,1 + 0,7 = 4,8V \quad (4.4)$$

Para garantir 4,8V na saída, foi calculado a proporção de espiras entre o primário e secundário usando o menor nível de tensão na entrada, que é 16V e o maior ciclo de trabalho, que é 0,5. Assim, para as tensões de entrada maior que 16V, o ciclo de trabalho vai

sendo reduzido proporcionalmente, para manter a tensão de saída em 4,8V (NASSABAY, 2019). Usando a equação (3.1) tem-se:

$$\frac{4,8}{16} = \frac{N_s \cdot 0,5}{N_p \cdot (1 - 0,5)} \implies N_p = N_s \cdot 3,3 \quad (4.5)$$

A proporção de espiras deverá ser de 3,3 no secundário para 1 no primário.

Calculo da resistência de carga R , substituindo na equação (3.3) e rearrumando, chega-se ao valor da indutância.

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{4,8^2}{28,09} = 0,82\Omega \quad (4.6)$$

$$\frac{4,8}{16} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{N_s \cdot 0,82}{N_s \cdot 3,3 \cdot 2 \cdot 50000 \cdot L}} \implies \frac{4,8^2}{16^2} = 0,5^2 \cdot \frac{N_s \cdot 0,82}{N_s \cdot 3,3 \cdot 2 \cdot 50000 \cdot L} \quad (4.7)$$

$$L = \frac{52,48}{7603200} = 6,9\mu H \quad (4.8)$$

Usa-se a equação (3.4) para calcular a energia por ciclo:

$$E = \frac{28}{50000} = 5,6 \cdot 10^{-4} J \quad (4.9)$$

Substituindo em (3.5) tem-se:

$$Al = \frac{A_e^2 \cdot B_{max}^2}{2 \cdot E} = \frac{(1,2 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 0,3^2}{2 \cdot 5,6 \cdot 10^{-4}} = 1,15 \cdot 10^{-6} H/espira \quad (4.10)$$

$$A_e = 1,2 \cdot 10^{-4} cm^2$$

$$B_{max} = 0,3 Wb/cm^2$$

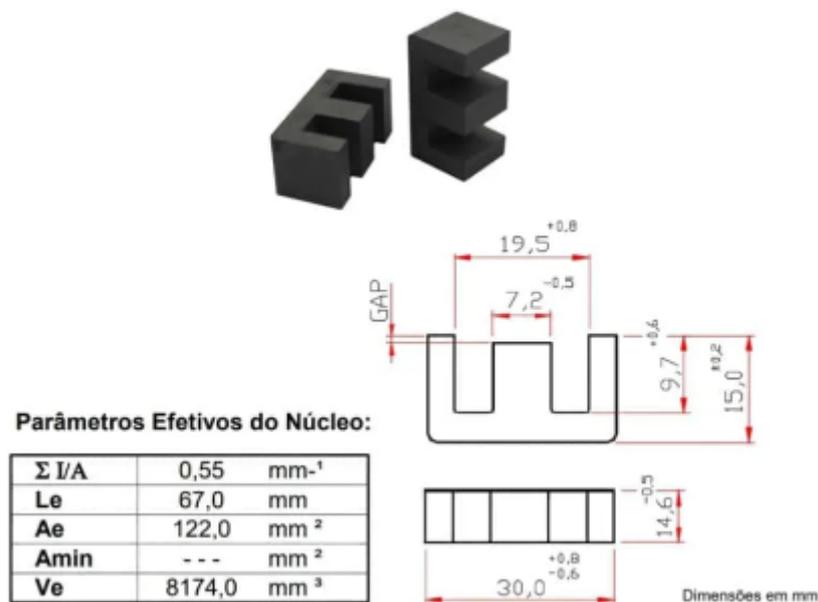
Sabendo que segundo a equação 4.8, $L = 6,9\mu H$, tem-se que:

$$N_p = \frac{L_p}{Al} = \frac{3,6 \cdot 10^{-6}}{1,15 \cdot 10^{-6}} = 6 \text{ espiras} \quad N_p = N_s \cdot 3,3 \quad (4.11)$$

$N_s = 1,8$ espiras, aproximadamente 2 espiras.

Os dados do núcleo para o indutor foram coletados na Figura 15.

Figura 15 – Dados do núcleo



Fonte: Próprio autor

A especificação para o primário ficou com os seguintes valores:

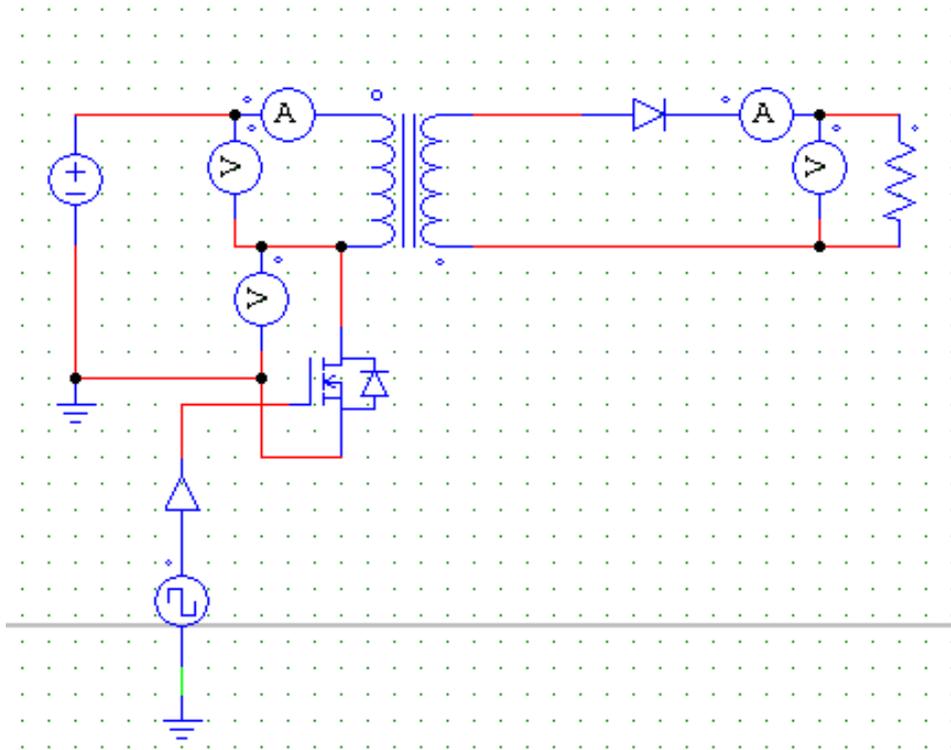
- Indutor com $6,9\mu H$.
- 6 espiras.

A especificação para o secundário ficou com os seguintes valores:

- 2 espiras.

O esquema do circuito sem o filtro com 16V na entrada, para verificar os resultados calculados está ilustrado na Figura 16 e os resultados gráficos estão ilustrados na Figura 17.

Figura 16 – Esquema usado na simulação.



Fonte: Próprio autor

Para o projeto, será utilizado um filtro capacitivo para retificar a saída, com oscilação máxima de tensão ΔV , conforme descrito na equação 4.15 (NASSABAY, 2019):

$$\Delta V = \frac{1}{C} \cdot \int_{T_s}^{DT_s} i_{out} dt \quad (4.12)$$

$$\Delta V = \frac{1}{C} \cdot i_{out} \cdot (1 - D) \cdot T_s \quad (4.13)$$

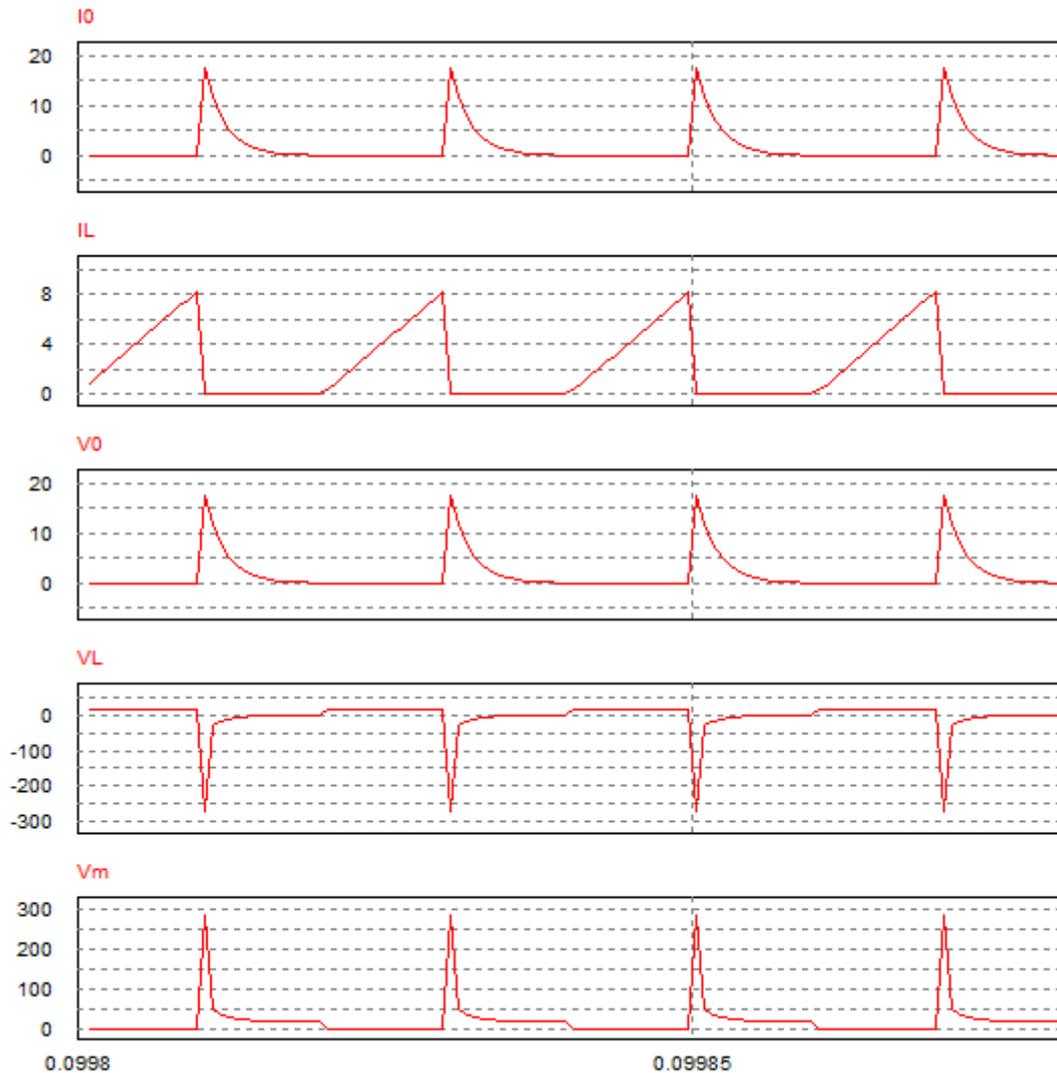
$$f = \frac{1}{T_s} \quad (4.14)$$

$$\Delta V = \frac{1}{C \cdot f} \cdot i_{out} \cdot (1 - D) \quad (4.15)$$

Será adotada uma oscilação de tensão de 0,05V. A oscilação máxima ocorre com a máxima potência, quando a corrente é aproximadamente 6A e o *duty cycle* é 0,5 (NASSABAY, 2019).

Substituindo os dados na equação (4.15), tem-se:

Figura 17 – Corrente na saída do secundário I_o , corrente no primário I_L , tensão na saída V_o , tensão no indutor V_L , V_m tensão na chave.



Fonte: Próprio autor

$$0,05 = \frac{1}{C \cdot 50000} \cdot 6 \cdot (1 - 0,5) \quad (4.16)$$

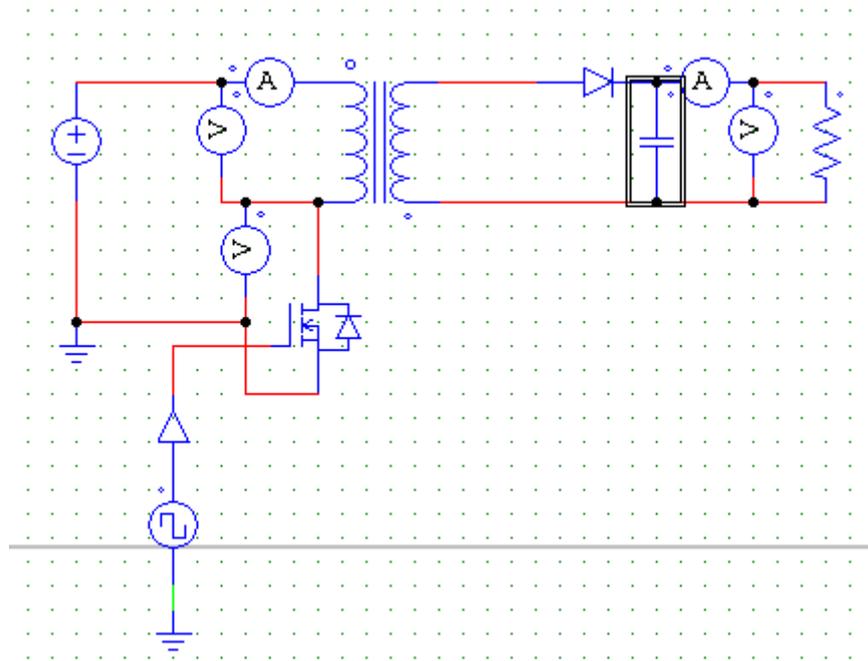
Resolvendo a equação (4.16), obtém-se:

$$C = \frac{1}{0,05 \cdot 50000} \cdot 6 \cdot (1 - 0,5) = 1200\mu F \quad (4.17)$$

Portanto, a capacitância do filtro será de $1200\mu F$.

Na figura Figura 18 é ilustrado o esquema do conversor com a adição do filtro e na Figura 19 é mostrado os resultados da simulação com a adição do filtro capacitivo. É possível observar que a oscilação de tensão na saída ficou abaixo dos 0,05V, assim como a oscilação de corrente, atenuando os picos elevados de corrente e tensão que é prejudicial para as células.

Figura 18 – Esquema com Filtro de saída.



Fonte: Próprio autor

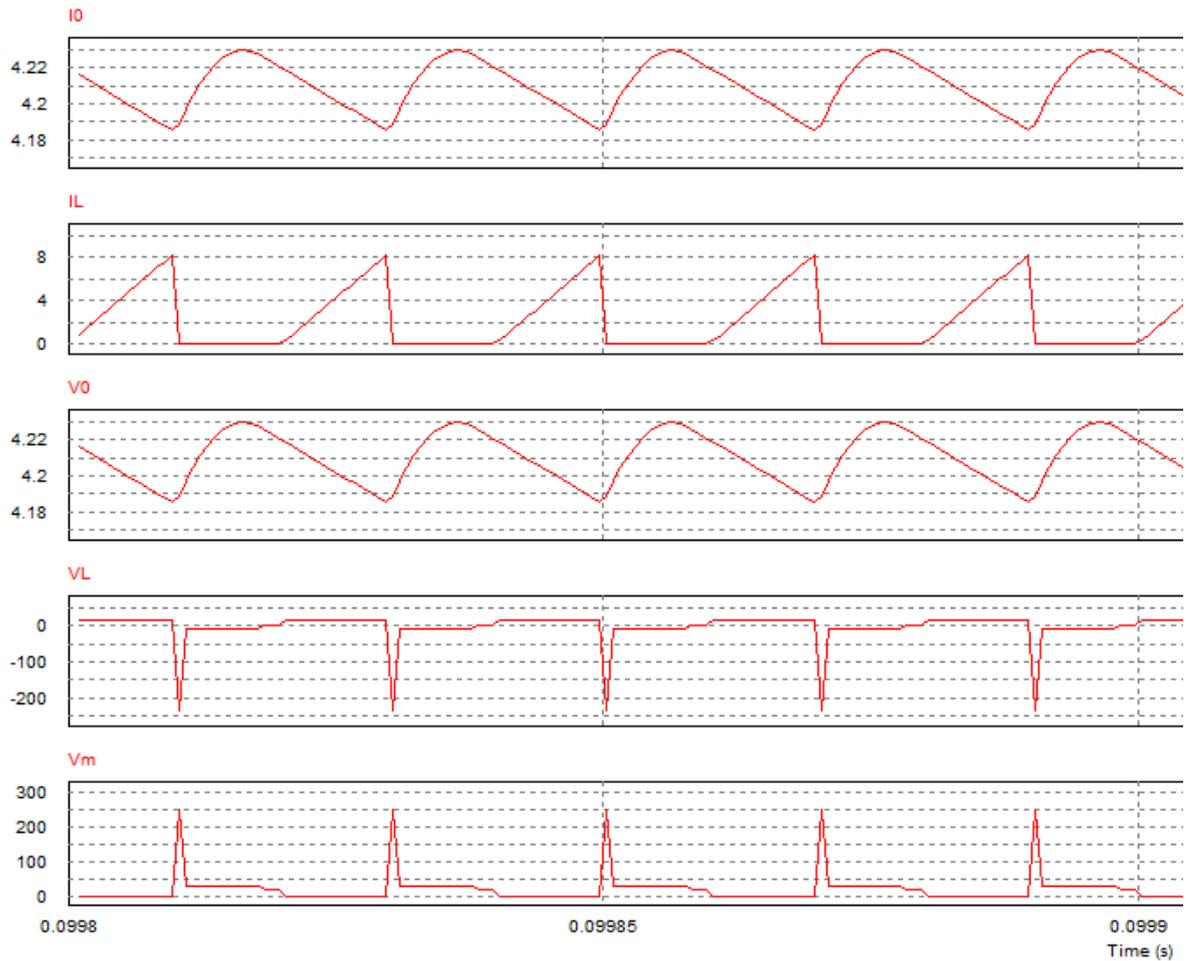
Devido aos picos de tensão no primário (*ripple*) do conversor *flyback*, que chega próximo dos 300V, foi preciso utilizar um diodo seguido de um circuito RC (conhecido como circuito grampeador) para absorver a energia que provoca os picos de tensão, fazendo os mesmos reduzirem a valores na faixa de segurança de *mosfets* da família IRF na potência adequada para o projeto, que foi tomado como parâmetro para os cálculos.

Considerando que o diodo no secundário entra em corte quando a corrente não é capaz de sustentar a tensão acima da tensão de corte e uma resistência equivalente mínima de 1Ω . Com a tensão no capacitor de 4,1V e a tensão necessária para o diodo conduzir sendo 0,7V, a corrente de corte é calculada como.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{4,1 + 0,7}{1} = 4,8A \quad (4.18)$$

Com base no valor de corrente da equação (4.18), pode ser calculado a energia armazenada no indutor:

Figura 19 – Corrente na saída do secundário I_o , corrente no primário I_L , tensão na saída V_o , tensão no primário V_L , tensão no *mosfet*.



Fonte: Próprio autor

$$E = \frac{L \cdot i^2}{2} = \frac{2,3 \cdot 10^{-6} \cdot 4,8^2}{2} = 5,52 \mu j \quad (4.19)$$

Optar-se-á por uma máxima tensão de 40V tendo uma margem de 20V segundo a media de tensão dos *mosfets* da família IRF e usando a maior tensão de entrada, que para as 5 células é de 21V. Para um capacitor absorver essa energia sem ultrapassar a tensão máxima, ele deve ter:

$$E = \frac{C \cdot \Delta V^2}{2} \implies C = \frac{5,52 \cdot 10^{-6} \cdot 2}{(40 - 21)^2} = 31 \eta j \quad (4.20)$$

A energia não pode ser acumulada no capacitor e precisa ser dissipada em um resistor. Nesse caso, o resistor será o consumidor de potência.

$$p = E \cdot f = 5,52 \cdot 10^{-6} \cdot 50000 = 0,276W \quad (4.21)$$

Considerando uma tensão média sobre o capacitor de:

$$V_{medio} = \frac{40 - 21}{2} = 9,5V \quad (4.22)$$

Com os valores das equações 4.21 e 4.22, podemos calcular o resistor R:

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{9,5^2}{0,276} = 327\Omega \quad (4.23)$$

Agora tem-se os valores de resistência e capacitância mínimo para atenuar o *ripple* de tensão no primário (NILSON, 2010).

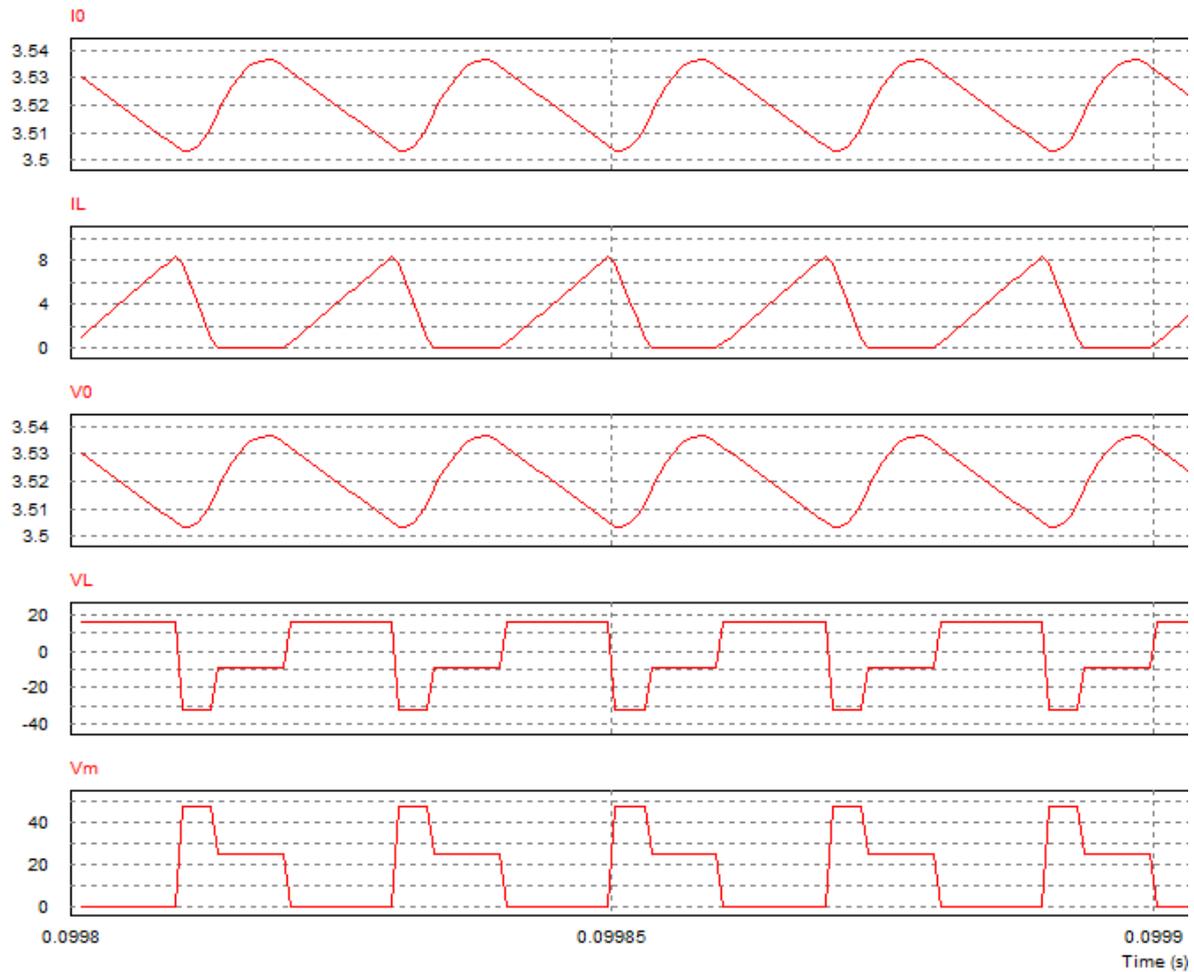
Será escolhido um valor de $100\eta F$, por ser um valor comercial e que dará um melhor resultado já que é três vezes acima do mínimo. Com isso é possível reduzir a tensão de pico, mas como penalidade se perde um pouco de potência na saída, como mostrado na Figura 20, a tensão de pico V_L teve valores menores que 40V, mas como penalidade, pode ser observado uma queda de tensão na saída V_0 se comparado com a Figura 19, ou seja, teve queda de desempenho por perdas no circuito grampeador. A tensão na chave V_m quando esta aberta é a soma da tensão no indutor com a fonte, chegando a valores próximos de 50V para uma entrada de 16V (NASSABAY, 2019).

Com todos os valores e dados necessários para montar a simulação do *flyback*, tem-se o esquema ilustrado na Figura 21, onde as saídas são ligadas no filtro da Figura 22, e o controle é feito pelo comparador Figura 23 e controle Figura 24.

4.5 Simulação do circuito proposto

Com base na ilustração, Figura 21 da simulação, é apresentado o esquema do circuito do conversor *flyback*, onde os valores dos componentes e parâmetros foram calculados ao longo da TCC. O sinal de entrada do *mosfet* é controlado por um sinal *PWM*, que é gerado pelo bloco comparador Figura 23 e controlado pelo bloco controlador, Figura 24.

Figura 20 – Corrente na saída do secundário I_o , corrente no primário I_L , tensão na saída V_o , tensão no primário V_L , tensão no *mosfet*.

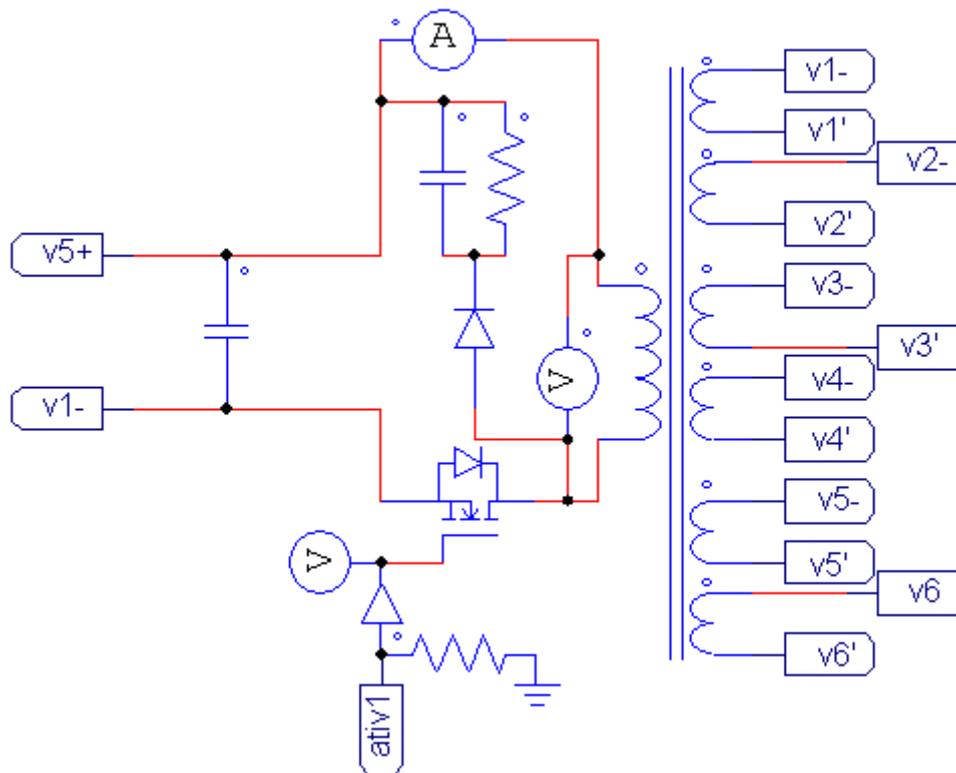


Fonte: Próprio autor

O sinal *PWM* controla o *mosfet* para oscilar de acordo com a demanda das células, permitindo que o conversor forneça a potência necessária. Quando a potência atinge o valor máximo de 25W, o valor do *duty cycle* D alcança 0,5, que é o valor de corte definido pelo controle.

Essa estratégia de controle por *PWM* permite ajustar a potência fornecida pelo conversor de acordo com a necessidade das células, garantindo um fornecimento eficiente e adequado de energia.

O comparador recebe o sinal de tensão do último secundário Figura 21 após passar pelo filtro indicado na Figura 22. Essa tensão é usada para controlar o sinal *PWM*, que por sua vez é controlado pelo fluxo do conversor, garantindo o controle de tensão para cada saída dos filtros da Figura 22.

Figura 21 – Esquema Conversor *flyback* isolado com 1 primário e 6 secundários.

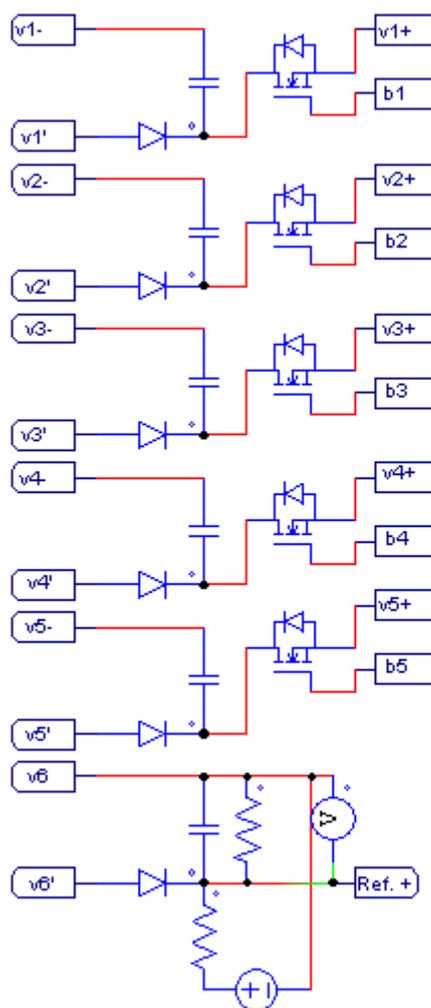
Fonte: Próprio autor

A simulação do desligamento do conversor é realizada por meio da adição de um *mosfet* na parte de controle Figura 24. Esse *mosfet* recebe a saída do comparador como entrada e controla a entrada do *mosfet* principal do conversor Figura 21, permitindo desligar completamente o fluxo de energia quando necessário.

No filtro Figura 22, foram adicionados *mosfets* na saída para serem utilizados como chaves. Eles carregam apenas as células que apresentam deficit de tensão, conforme controlado pelo bloco lógico Figura 24. Esse bloco de controle tem 6 entradas, sendo uma entrada de referência zero $V1-$ e as outras cinco entradas correspondentes aos polos positivos das células individuais.

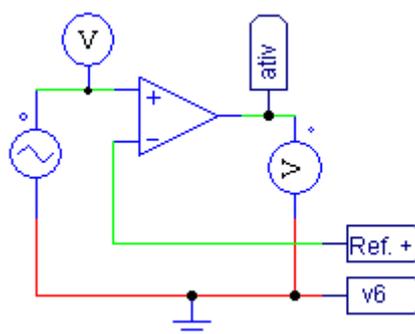
Essa estrutura de controle e os circuitos envolvidos permitem um gerenciamento eficiente da carga e descarga das células, garantindo que apenas as células com diferença de tensão abaixo de 4% sejam carregadas.

Figura 22 – Filtros com chave para as células e saída de controle.



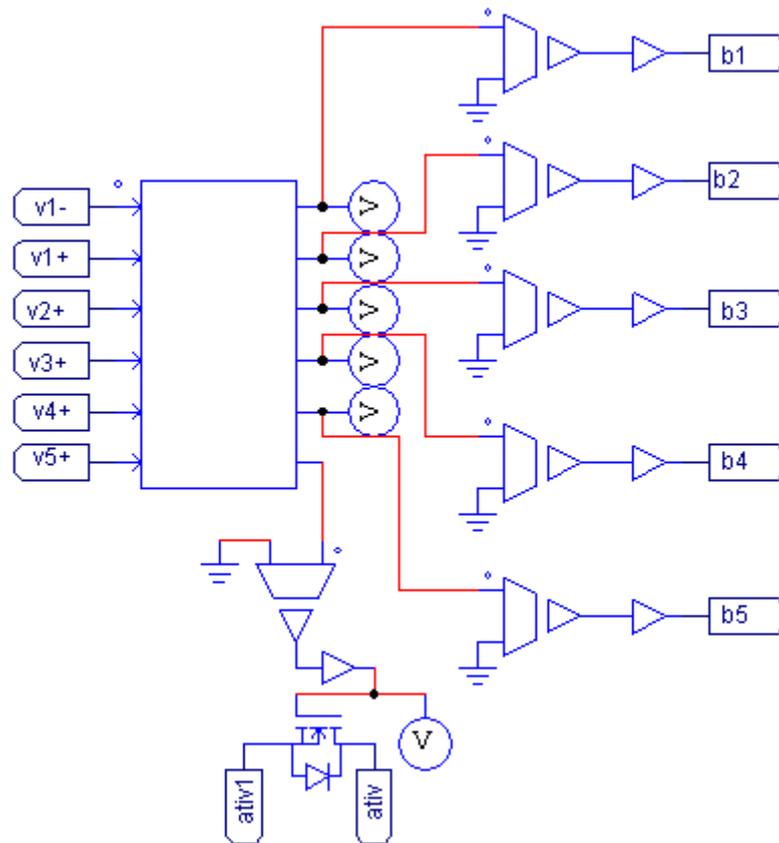
Fonte: Próprio autor

Figura 23 – Comparador.



Fonte: Próprio autor

Figura 24 – Controle.



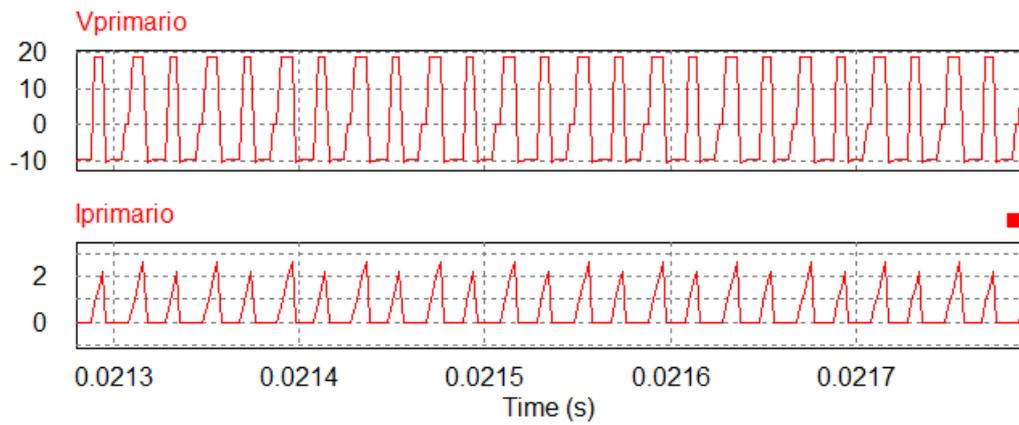
Fonte: Próprio autor

4.6 Resultados

Primeiro foi feita a equalização das células, sendo as 5 com tensões diferentes. Na Figura 25, onde é mostrado o gráfico com zoom, a corrente tem seu ciclo tocando zero, o que é típico de conversor *flyback* em condução descontinua e a tensão no primário está pulsando de acordo com o chaveamento sem a presença de *ripple*. Todas as tensões das células (B1, B2, B3, B4, B5) foram equalizadas, chegando a um valor de tensão comum entre elas. Os valores de tensão e corrente do primário não tiveram picos acima do restringido nos cálculos como mostrado na Figura 26. Pode-se perceber que a célula B1, não foi acionada para receber carga, e as demais que tinha tensão 4% abaixo da mesma, foram ativadas para receber carga.

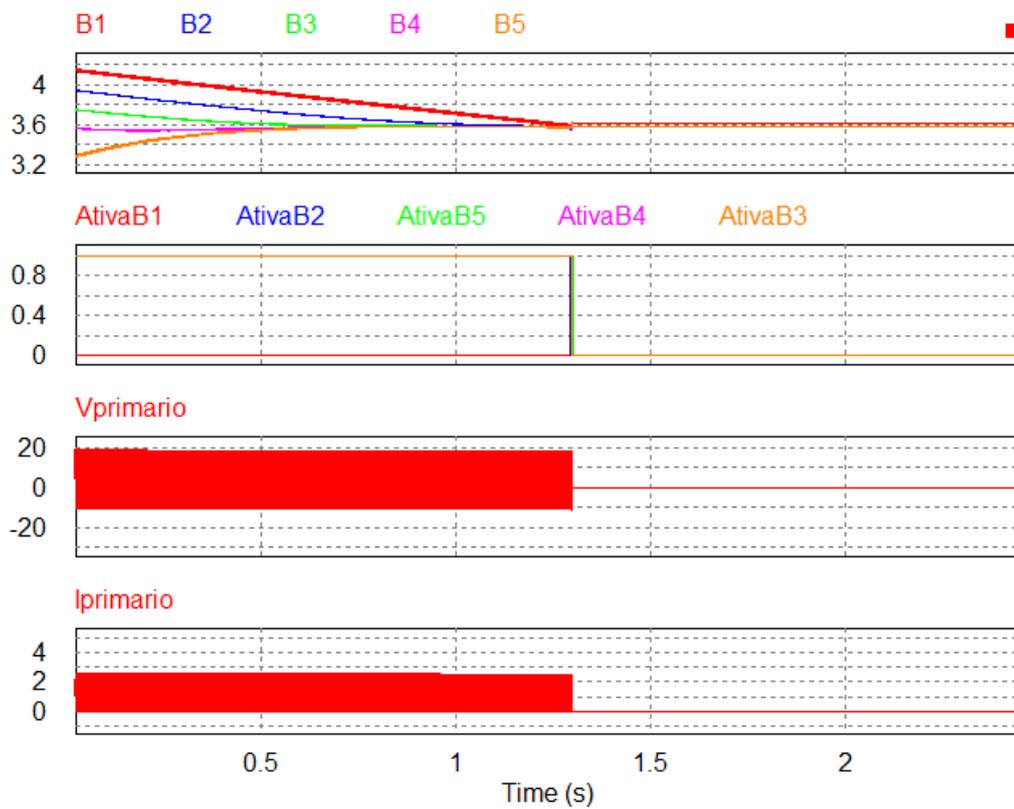
Segundo teste, apenas uma célula estará com tensão diferente das outras. Como mostrado na Figura 27, só é liberado para calibrar a célula B4 e o sistema desliga quando a mesma iguala sua tensão as demais.

Figura 25 – Tensão e corrente no primário.



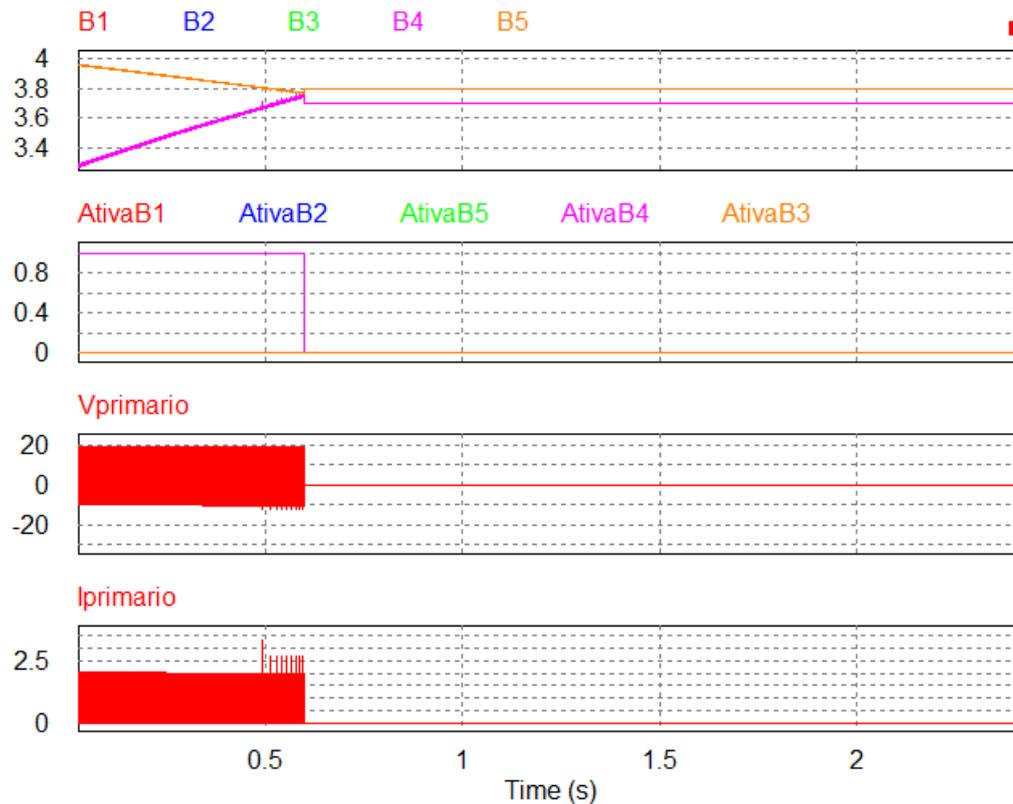
Fonte: Próprio autor

Figura 26 – Equalização de Células.



Fonte: Próprio autor

Figura 27 – Equalizando a célula B4.

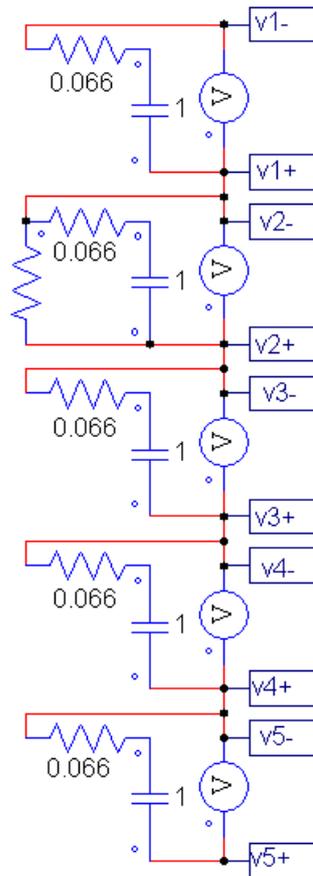


Fonte: Próprio autor

Terceiro teste, foi colocado um resistor para consumir potencia apenas da célula B2 Figura 28. O sistema arma quando a célula B2 tem sua tensão abaixo de 4% em relação as demais e desarma quando iguala as tensões (é permitido uma margem de erro de 1% na equalização) como ilustrado na Figura 29.

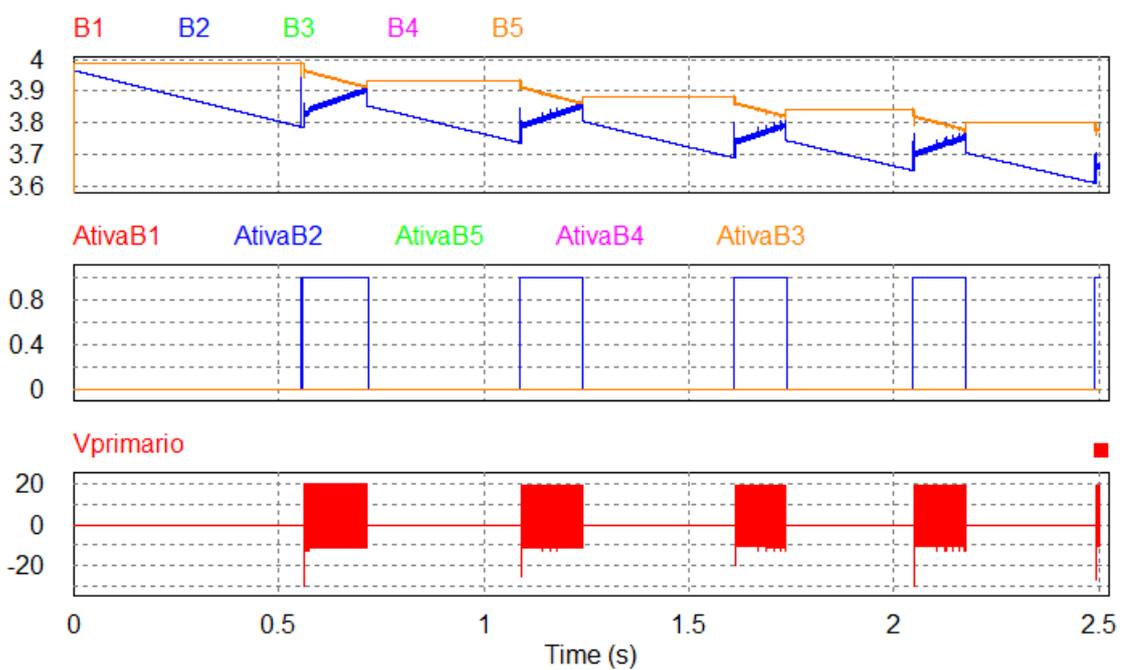
Quarto teste, o sistema não deve ser ativado ou deve ser desativado quando a célula com maior tensão estiver abaixo de 3,1V. Pode ser visualizado na Figura 30, que o sistema desarma mesmo sem finalizar a equalização, foi feito assim, para garantir a segurança do limite de tensão das células. É percebido que as tensões sofrem redução inicialmente, isso ocorre porque as células tem baixa energia interna, pois foi reduzido para 5% como descrito na seção 4.1, essa energia é dissipada nas perdas, e não tem força suficiente para fazer as baixas tensões ter leve aumento, causando queda de tensão.

Figura 28 – Esquema das células com carga na bateria B2.



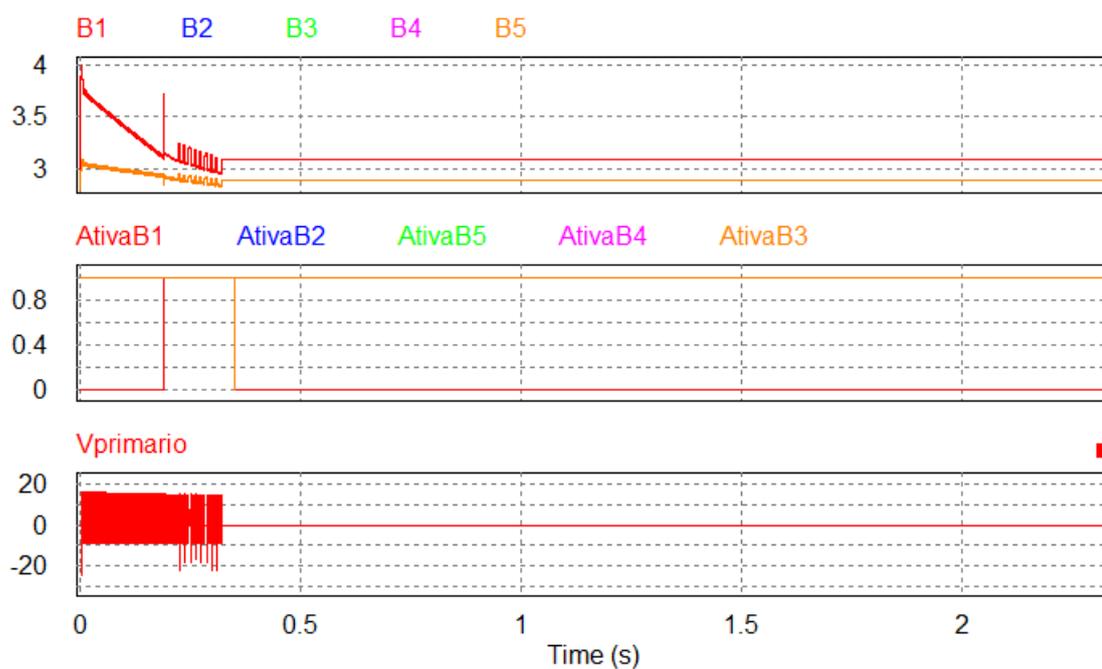
Fonte: Próprio autor

Figura 29 – Desequilíbrio forçado em B2.



Fonte: Próprio autor

Figura 30 – Desequilíbrio forçado em B2.



Fonte: Próprio autor

5 CONCLUSÃO

O material aqui descrito, mostra o quão importante é a adição de equalizadores em células, seja em baterias pequenas ou grandes, a utilização de equalizadores de tensão é uma prática recomendada para melhorar o desempenho e a confiabilidade do sistema de armazenamento de energia. Isso é especialmente importante em sistemas críticos, onde a confiabilidade e a longevidade das baterias são essenciais para o funcionamento adequado da aplicação.

Se for observado o custo das baterias e a simplicidade dos componentes tratados nesse trabalho, adicionado ao prolongamento da vida útil e confiabilidade das baterias, essa aplicação seria uma boa opção para elevar o custo benefício das baterias.

O sistema terá um bom rendimento durante o equilíbrio de carga, se comparando com outros trabalhos como o de (COSTA, 2018), o que foi usado como parâmetro para o trabalho, onde o equalizador fica ligado em todo tempo durante a equalização, com diferencial que, o sistema aqui apresentado, ao equalizar as células fica em *standby*, levando o consumo a quase zero enquanto que os outros equalizadores ativos continuam com todo sistema em operação normal.

Se compararmos com equalizadores resistivos, que são mais simples e com custo mais baixo, apesar de ter um consumo baixo de energia quando a equalização é alcançada, toda energia usada para igualar as tensões das células é perdida em forma de calor (COSTA, 2018), sendo assim, a eficiência energética em atividade é 0, enquanto que o equalizador proposto em atividade teria uma melhor eficiência se observados os gráficos de simulação, onde a energia é compartilhada entre as células para chegar em um valor médio comum.

Por ser um sistema simples, seria de fácil implementação em larga escala, podendo ser um produto para vários sistemas que ainda não possui esse tipo de tecnologia e adicionar o diferencial desse trabalho aos que já existem.

Como o trabalho aqui tratado não é usado para fazer recarga de baterias, apenas para equalizar e que o desequilíbrio de tensão ocorre lentamente, mesmo em bancos de baterias maiores, com sistema equalizador de baixa potência seria o suficiente para garantir a equalização, a diferença é, quanto maior o sistema de células, maior o tempo para equalizar.

5.1 Proposta de trabalho futuro

Usar um conversor mais eficiente, como por exemplo o conversor *flyback* com duas chaves, uma em cada ponta do primário, esse conversor dispensa circuito grampeador, o que já melhoraria muito o desempenho, pois se for observado a Figura 19 e Figura 20 das seções 4.4 e 4.5 , a queda de desempenho é bem elevada.

Usar um ESP32, ESP8266, ou um modulo de conexão com a rede, para ter acesso a internet e ter todas as informações de forma online.

Montar todo sistema de forma física para testes reais em módulos de baterias em funcionamento.

Algo que levaria muito tempo, mas que seria um excelente avanço para esse tipo de sistema, verificar na pratica o quanto a vida útil das baterias, tipo as de *NOTEBOOK*, será estendida usando esse tipo de equalizador de baterias.

REFERÊNCIAS

BECK, R. F. Baterias de Lítio-Íon (lib) perspectivas e mercado. In: . [s.n.], 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/ciencia_tecnologia/acumuladores_energia/cpqd.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 12.

COSTA, G. D. EQUALIZAÇÃO ATIVA DA TENSÃO EM BATERIAS CONECTADAS EM SÉRIE, APLICANDO O CONVERSOR CC-CC FLYBACK NO MODO DE CONDUÇÃO DESCONTÍNUA. 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/205599/PEAS0296-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>>. Citado 5 vezes nas páginas 9, 10, 17, 26 e 42.

DIDONET, R. J. CONVERSOR BUCK CMOS COM CONTROLE PWM DE FREQUÊNCIA FIXA EM MODO DE TENSÃO UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA FACULDADE DE TECNOLOGIA. 2015. Disponível em: <https://bdm.unb.br/bitstream/10483/14786/1/2015_RicardoJensenDidonet_tcc.pdf>. Citado na página 17.

FIGUEIRÓ, A. A. CONTROLE DO BALANCEAMENTO DE BATERIA E ESTIMAÇÃO DE ESTADO DE CARGA. 2015. Disponível em: <<http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2015-1/2015122201-2015122201/file>>. Citado 4 vezes nas páginas 9, 10, 12 e 13.

FILHO, T. T. Influência da Qualidade do Pó de Zinco na Geração de Hidrogênio em Pilhas Alcalinas. 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-96WJHB/1/disserta__o__de__mestrado___final15032012.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.

FOGAÇA, J. R. V. Pilhas e baterias de lítio. 2013. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/pilhas-baterias-litio.htm>>. Citado 3 vezes nas páginas 12, 15 e 26.

NASSABAY, A. N. de S. ANÁLISE E PROJETO DE CONVERSORES DC/DC COMPACTOS VISANDO A MITILAÇÃO DE EFEITOS DE RADIAÇÃO SOBRE ACOPLADORES ÓPTICOS. 2019. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TQRGPE>>. Citado 8 vezes nas páginas 17, 18, 19, 20, 22, 27, 29 e 33.

NILSON. Circuitos eletricos. [S.l.: s.n.], 2010. Citado 3 vezes nas páginas 15, 26 e 33.

SAMSUNG. INR18650-35E. [s.n.], 2015. Disponível em: <<https://www.thornton.com.br/pdf/CATALOGO%20THORNTON.pdf>>. Citado na página 12.