

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLÓGICA DE SANTA  
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CASSIANO AMORIM PUSTILNIK MATTOS**

**PROJETO DE CONTROLADOR DE CARGA DE BATERIA DE LI-ÍON**

**FLORIANÓPOLIS, JUNHO 2019.**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLÓGICA DE SANTA  
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CASSIANO AMORIM PUSTILNIK MATTOS**

**PROJETO DE CONTROLADOR DE CARGA DE BATERIA DE LI-ÍON**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro(a) Eletricista.

Orientador: Prof. Ricardo Luiz Alves, Dr. Eng

**FLORIANÓPOLIS, JUNHO 2019**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Mattos, Cassiano Amorim Pustilnik  
**Projeto de Controlador de Carga de Bateria de Li-íon**  
/ Cassiano Amorim Pustilnik Mattos ; orientação de Ricardo  
Luiz Alves. - Florianópolis, SC, 2019.  
65 p.

**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal  
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado  
em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico  
de Eletrotécnica.**  
Inclui Referências.

1. Baterias de Li-íon. 2. Controlador de carga.  
3. Conversor Estático. I. Alves, Ricardo Luiz. II. Instituto  
Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico  
de Eletrotécnica. III. Título.

# PROJETO DE CONTROLADOR DE CARGA DE BATERIA DE LÍ-ION

CASSIANO AMORIM PUSTILNIK MATTOS

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro(a) Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

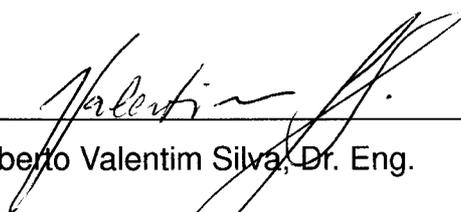
Florianópolis, 01 de julho, 2019.

Banca Examinadora:



---

Ricardo Luiz Alves, Dr. Eng.



---

Gilberto Valentim Silva, Dr. Eng.



---

Rafael Henrique Eckstein, Me. Eng.

Dedico esse trabalho à minha avó, Maria Aparecida Amorim Pustilnik,  
*in memoriam*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais Ana e Paulo por me fornecerem toda a base e estrutura necessária para que eu pudesse me desenvolver como ser humano e para a sociedade, além do apoio em toda a minha vida.

Sou grato pelo apoio concedido pelo meu orientador Prof. Dr. Ricardo Luiz Alves, que mesmo com todas as dificuldades confiou e acreditou na realização deste estudo.

Agradeço também a todos que de alguma maneira contribuíram em algum momento durante essa jornada deixá-la mais empolgante, leve e feliz.

## RESUMO

Este trabalho foi motivado pela expansão da utilização de dispositivos alimentados por baterias de Li-Íon, essas por apresentarem características de carga divididas em estágios, podem ser alimentadas por estruturas de processamento de energia projetadas para esse fim. Inicialmente são revisadas as tecnologias de baterias de chumbo ácido, NiCd e Li-Íon com o intuito de comparar os pontos positivos e negativos da última em relação as primeiras. Em sequência é abordado sobre o conversor estático *Buck*, abaixador de tensão, que em função da sua estabilidade natural foi escolhido para a aplicação de controlador de carga. São revisados os conceitos principais de funcionamento estático e dinâmico que possibilitam o dimensionamento do seu estágio de potência e controle. Por fim, é proposto o projeto de um controlador de carga para a bateria Samsung INR18650-25 R, onde com base nas especificações fornecidas pelo fabricante se realiza o projeto dos estágios de potência e controle e verificado o funcionamento por meio de simulações no *software* PSIM.

**Palavras-chave:** Baterias de Li-Íon. Controlador de Carga. Conversor Estático.

## **ABSTRACT**

This work was motivated by the expansion of the use of devices powered by Li-Ion batteries, which have charge characteristics divided into stages and can be fed by energy processing structures designed for this purpose. First are reviewed the technologies of batteries of lead acid, NiCd and Li-Ion in purpose to compare the positives and negatives of the Li-Ion battery and the others. Then, is discussed about the step-down Buck converter, which was chosen for the application of charger controller because of its natural stability. The main concepts of static and dynamic operation that allow the sizing of its power and control stage are reviewed. Finally, it is proposed the design of a charge controller for the battery Samsung INR18650-25 R, where based on the specifications provided by the manufacturer. The design of the power and control stages are realized through simulations in the software PSIM.

**Keywords:** Li-Ion Battery. Load Controller. Static Converter Buck.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes básicos de uma célula de bateria.....	15
Figura 2 - Esquema de descarga de uma célula de bateria.....	15
Figura 3 - Esquema de carregamento de célula de bateria.....	16
Figura 4 - Esquema simplificado de uma bateria de chumbo ácido.....	18
Figura 5 - Relação entre o estado de carga, tensão da célula e corrente de descarga.....	20
Figura 6 - Curva de carga bateria de NiCd.....	22
Figura 7 - Estrutura bateria de óxido de lítio cobalto .....	23
Figura 8 - Curva de carga Bateria de Li-Íon .....	25
Figura 9 - Curva de descarga para diferentes cargas.....	25
Figura 10 - Conversor <i>Buck</i> . .....	27
Figura 11 - Conversor <i>Buck</i> em operação chave em condução. ....	28
Figura 12 - Formato de onda de corrente no Indutor nos períodos de condução e corte. ....	28
Figura 13 - Conversor <i>Buck</i> operação com chave em corte. ....	30
Figura 14 - Formato de onda no capacitor .....	34
Figura 15 - Sinal comutado em função do tempo e sua representação por valor médio instantâneo .....	36
Figura 16 - Formato da onda de tensão no diodo.....	38
Figura 17 - Validação do Modelo da Tensão de saída do <i>Buck</i> .....	39
Figura 18 - Validação do Modelo em blocos da Tensão de saída do <i>Buck</i> .....	39
Figura 19 - Resposta em frequência da validação do modelo. ....	40
Figura 20 - Comparação entre o circuito e modelo para validação.....	41
Figura 21 - Validação do modelo dinâmico de corrente.....	42
Figura 22 - Conversor projetado validação do estágio de Potência.....	44
Figura 23 - Validação do Projeto de Potência. ....	45
Figura 24 - Validação Projeto de Potência saída máxima. ....	45
Figura 25 - Diagrama de blocos do sistema não compensado. ....	47
Figura 26 - Resposta em frequência para o sistema compensado. ....	48
Figura 27 - Diagrama de blocos do sistema compensado em malha fechada. ....	48
Figura 28 - Modelo de simulação <i>Buck</i> malha fechada para os quatro cenários. ....	49
Figura 29 - Resposta a ação de controle tensão de saída $V_o$ e Corrente de saída $I_o$ . ....	50
Figura 30 - Resposta do sinal de controle a entrada em operação do circuito. ....	51

Figura 31 - Resposta a ação de controle tensão de saída $V_o$ e Corrente de saída lo 2º Cenário.....	51
Figura 32 - Resposta a ação de controle tensão de saída $V_o$ e Corrente de saída lo 3º Cenário .....	52
Figura 33 - Resposta a ação de controle tensão de saída $V_o$ e Corrente de saída lo 4º Cenário .....	53
Figura 34 - Função de transferência em malha aberta. ....	54
Figura 35 - Resposta em frequência para o sistema de compensação de corrente projetado. ....	55
Figura 36 - Modelo para validação do controle de corrente.....	56
Figura 37 - Resposta a ação de controle corrente de saída $I_L$ e Tensão de saída $V_o$ 1º Cenário. ....	56
Figura 38 - Resposta a ação de controle corrente de saída $I_L$ e Tensão de saída $V_o$ 2º Cenário. ....	57
Figura 39 - Resposta a ação de controle corrente de saída $I_L$ e Tensão de saída $V_o$ 3º Cenário. ....	57
Figura 40 - Curva de Carga bateria de Li-Íon. ....	58
Figura 41 - Lógica para acionamento da chave e controle utilizado. ....	59
Figura 42 - Resultado da estratégia de controle de carga de bateria. ....	60
Figura 43 - Resposta da tensão e da corrente para corte de 50% de carga evidenciando a atuação dos controles.....	61
Figura 44 - Resposta do Controle de tensão, corrente e de comando.....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações principais Samsung INR18650-25R.....	43
Tabela 2 - Especificações de Projeto e Valores adotados.....	44
Tabela 3 - Especificações de Projeto do Controle de Corrente PI.....	54

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1</b>	<b>Definição do Problema</b> .....	<b>12</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>12</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>12</b>
1.3.1	Objetivo Geral .....	12
1.3.2	Objetivos Específicos .....	13
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do trabalho</b> .....	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Funcionamento básico de uma célula</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Tecnologias de baterias</b> .....	<b>16</b>
2.2.1	Bateria de Chumbo Ácido .....	17
2.2.1.1	<i>Composição</i> .....	17
2.2.1.2	<i>Classificações</i> .....	18
2.2.1.3	<i>Características</i> .....	19
2.2.2	Bateria de Níquel Cádmio .....	20
2.2.2.1	<i>Composição</i> .....	20
2.2.2.2	<i>Características</i> .....	21
2.2.3	Bateria de Li-Ion.....	22
2.2.3.1	<i>Composição</i> .....	22
2.2.3.2	<i>Classificações</i> .....	23
2.2.3.3	<i>Curva de carga e descarga</i> .....	24
2.2.4	Conclusão parcial .....	26
<b>3</b>	<b>CONVERSOR ESTÁTICO DE ENERGIA</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Conversor <i>Buck</i></b> .....	<b>26</b>
3.1.1	Modos de operação .....	27
3.1.1.1	<i>Operação em condução contínua</i> .....	28
3.1.2	Cálculo do capacitor e indutor .....	32
3.1.2.1	<i>Indutor</i> .....	32
3.1.2.2	<i>Capacitor</i> .....	33
3.1.3	Funcionamento dinâmico .....	35
3.1.3.1	<i>Modelagem</i> .....	35
3.1.3.2	<i>Modelo Buck Tensão</i> .....	38
3.1.3.3	<i>Modelo Buck Corrente</i> .....	40
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>42</b>
<b>4.1</b>	<b>Projeto do Estágio de Potência</b> .....	<b>43</b>
<b>4.2</b>	<b>Projeto de controle</b> .....	<b>46</b>
4.2.1	Controle de tensão.....	46
4.2.2	Controle de Corrente.....	53
4.2.3	Estratégia para o controle de carga de bateria.....	58
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>64</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos houve o aumento da demanda por dispositivos portáteis com diferentes usos e finalidades. No Brasil em 2017 já foi alcançada a marca de um celular por habitante (TERRA, 2017). Sejam essas para uso direto do usuário: celulares, *tablets* e *laptops*, ou para fins específicos como sensores de umidade, temperatura, pressão acompanhados de pequenos painéis solares em aplicações *Internet of Things* (IOT) (NGUYEN, SANTOS, *et al.*, 2018).

Em função da portabilidade e mobilidade, esses dispositivos costumam ter pequenos volumes, porém isso não diminui a necessidade de energia que possam vir a consumir.

Neles costumam se empregar baterias de íons de lítio (Li-íon), em função da alta densidade de energia que possuem, baixa manutenção e descarga reduzida quando estão fora de uso (BATTERY UNIVERSITY, 201-).

Apesar das vantagens descritas acima, as baterias de Li-íon apresentam como desvantagem serem altamente inflamáveis e isso pode causar acidentes e explosões (BATTERY UNIVERSITY, 201-). Um exemplo ocorreu com o celular *Galaxy Note 7*, que em função de um problema com a bateria e seu controle de carga e descarga ocasionou diversos acidentes que levaram ao *recall* deste produto.

Os maiores problemas atrelados as desvantagens das baterias de Li-íon vêm do mau uso e desrespeito das especificações estabelecidas pelo fabricante. Desta forma a fim de garantir que não sejam encontrados problemas é necessário impedir que a bateria de Li-íon ultrapasse seus limites físicos de corrente, tensão e temperatura.

Uma das maneiras utilizadas para evitar acidentes e garantir o funcionamento pleno é utilizando controladores de carga e descarga que limitem o nível de tensão máximo.

Os controladores de carga são normalmente conversores estáticos de corrente contínua (CC), onde um nível de tensão é aplicado na entrada do conversor e convertidos em níveis de tensão e corrente necessários para o correto carregamento

da bateria. Em seguida o controlador de descarga também é um conversor estático dimensionado para que a corrente solicitada pela carga, quando essa for superior a máxima da bateria, interrompa o fornecimento, ou forneça apenas o limite da bateria. Podem ser utilizados conversores bidirecionais que possuem a vantagem de realizar o controle de carga e descarga da bateria. Porém, neste trabalho serão abordados apenas os conversores unidirecionais empregados com a finalidade de carregamento. Será apresentada a estratégia de controle específica para a realização do controle de carga para uma bateria de Li-íon, obedecendo os critérios de segurança e especificações delimitados pelo fabricante.

## **1.1 Definição do Problema**

Baterias de Li-íon, em função de sua alta inflamabilidade e potenciais riscos de acidentes e explosões (BATTERY UNIVERSITY, 201-); Devem ser dotadas de um circuito de proteção capaz de garantir a operação dentro das condições delimitadas pelo fabricante.

Para isso é necessário desenvolvimento de um controlador de carga especificamente desenvolvido para atender as necessidades da bateria.

## **1.2 Justificativa**

Ampliação de uso das baterias de Li-íon em dispositivos portáteis de diversos usos em função do crescimento da indústria de IoT.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

Desenvolver um controlador de carga de baterias de Li-íon que garanta o funcionamento dentro dos limites impostos pelo fabricante, evitando assim danos e prolongando a vida útil da bateria.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Conceituação das tecnologias de baterias;
- b) Definição dos critérios importantes de projeto;
- c) Projeto do controlador de carga nas etapas de potência e de controle.

## 1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em quatro partes. Na primeira parte é contextualizado o cenário atual das tecnologias de baterias e suas principais características e aplicações. Na segunda, é realizado um aprofundamento no estudo mais detalhado da bateria de íons de lítio e suas especificações necessárias para o desenvolvimento de um projeto de controlador de carga. Em sequência é desenvolvido o controlador de carga para uma bateria real com especificações do fabricante. Por fim a metodologia é validada por meio de simulações onde se busca avaliar o cumprimento dos requisitos e as especificações estabelecidas na etapa de projeto.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A sociedade aprendeu a manipular e a utilizar a energia para melhorar a sua qualidade de vida. Utilizam-se energia em diversas formas: Para cozinhar alimentos, para aquecer a água do banho, para gerar tração, produzir calor, retirar calor etc. Devido a facilidade de conversão, eficiência e possibilidade de transporte de maneira satisfatória a energia elétrica pode ser utilizada para todos esses fins. Entretanto, quando o objetivo é armazenar a energia, mantê-la na forma elétrica não é o melhor caminho.

Para armazenar energia e possibilitar o suprimento de cargas distantes de conexões com a rede elétrica ou cargas portáteis como celulares e *laptops* frequentemente são empregadas baterias. Nas baterias a energia dos componentes químicos agem como um meio armazenador, que durante a descarga, através de uma reação química gera energia que pode ser drenada da bateria na forma de uma corrente elétrica em corrente contínua e com um nível de tensão (KIEHNE, 2003).

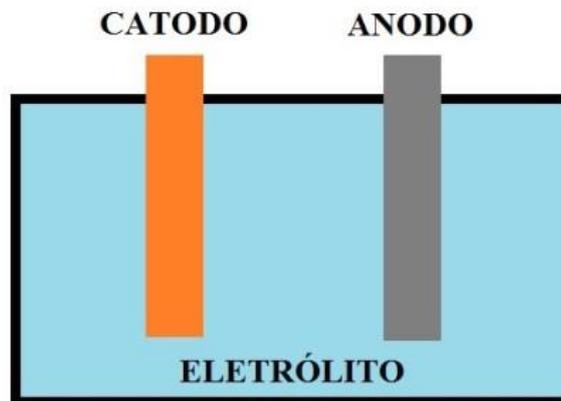
Existem diferentes tecnologias de baterias e seus usos variam conforme a sua aplicabilidade. Dentre as diferentes opções disponíveis, as de maior uso são as de chumbo-ácido, níquel-cádmio (NiCd), hidreto metálico de níquel (NiMH) e íon de lítio (Li-íon).

Além da classificação apresentada anteriormente, baseada nos materiais empregados na fabricação, as baterias podem ser classificadas entre células primárias e secundárias. As do primeiro tipo não podem ser recarregadas, portanto não serão abordadas neste trabalho. Já as secundárias funcionam como conversores reversíveis de energia e são projetadas para repetidas cargas e descargas (MIT ELECTRIC VEHICLE TEAM, 2008).

### 2.1 Funcionamento básico de uma célula

Uma bateria é composta por células em série, cada uma composta por dois eletrodos, um positivo e um negativo imersos em um meio eletrólito. Apresenta-se uma célula de bateria na Figura 1.

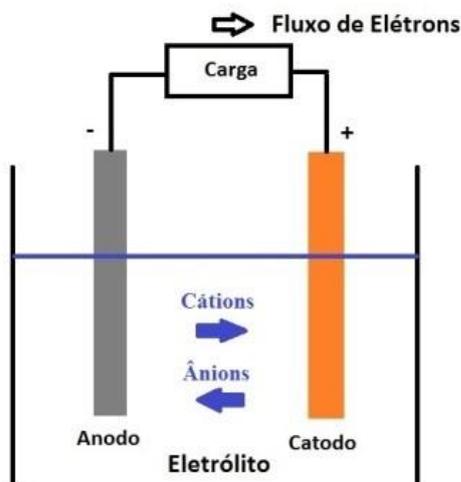
Figura 1 - Componentes básicos de uma célula de bateria.



Fonte: (RONTEK , s.a.)

Quando conectados por um elemento condutor, a reação química dos eletrodos imersos no meio eletrólito gera uma corrente de elétrons que flui do eletrodo negativo para o eletrodo positivo, alimentando a carga, como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Esquema de descarga de uma célula de bateria.



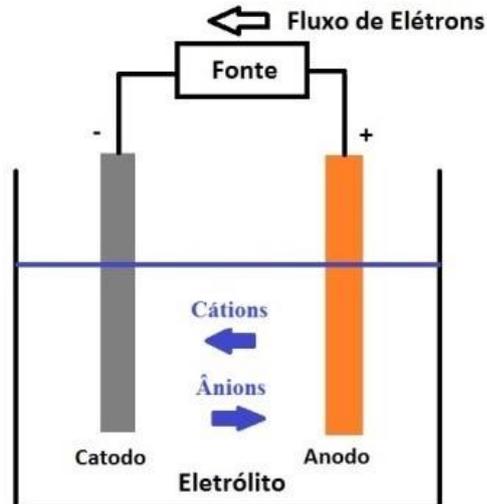
Fonte: (RONTEK , s.a.)

Supondo um sistema carregado, um dos eletrodos fornece elétrons enquanto o outro recebe elétrons, através de uma corrente de elétrons. Quando o eletrodo responsável por fornecer elétrons é totalmente consumido a energia da célula termina (KIEHNE, 2003).

Para células do tipo secundárias, além da descarga ocorrer dessa maneira em cada célula, quando uma fonte é ligada com polaridade oposta à de descarga,

acontece a carga. A recarga da bateria ocorre quando ao invés de requisitar energia elétrica e corrente, fornece-se corrente à célula, conforme a Figura 3.

**Figura 3 - Esquema de carregamento de célula de bateria.**



Fonte: (RONTEK , s.a.)

## 2.2 Tecnologias de baterias

Para ser possível a comparação entre os tipos de baterias, breves conceitos devem ser abordados para permitir a correta compreensão dos parâmetros relevantes na escolha de uma bateria. Dentre esses parâmetros, os que serão abrangidos neste trabalho são a capacidade, a densidade de energia, ciclo de operação, temperatura de operação e taxa de carga/descarga. Entretanto, há outros parâmetros importantes para outros fins.

A capacidade diz respeito a quanto de corrente é possível extrair de uma bateria em um período de uma hora (MIT ELECTRIC VEHICLE TEAM, 2008). Sua unidade é dada em A.h e os outros parâmetros como carga e descarga são frações ou produtos desse valor.

Densidade de energia é um dos critérios que mais diferencia as baterias e é dependente diretamente dos materiais empregados na construção. Baterias com densidade de energia mais altas apresentam soluções menos volumosas que baterias com densidade de energia menores (MIT ELECTRIC VEHICLE TEAM, 2008).

O ciclo de operação define sob uma condição operativa o tempo médio de descarga até um ponto específico e informa a máxima profundidade de descarga recomendada para que a bateria tenha uma vida útil prolongada (KIEHNE, 2003).

Já a temperatura de operação mostra o quanto o funcionamento da célula pode ser influenciado pela temperatura a que ela está submetida. Deste modo, muitas vezes é necessário dimensionar ou projetar o sistema com capacidade de manter a temperatura da bateria sobre controle.

Nesta seção são abordadas as principais baterias e suas especificidades e usos. Serão mostradas as aplicações e comparadas as características, vantagens de desvantagens nos principais critérios estabelecidos nesta seção.

### 2.2.1 Bateria de Chumbo Ácido

A bateria de chumbo ácido é a mais antiga bateria recarregável existente comercialmente. Foi inventada em 1859 por Gaston Planté e é amplamente utilizada para realizar a partida em veículos a combustão e em outros sistemas em que o custo para baterias com tecnologias mais modernas não se justifica (BATTERY UNIVERSITY, 2010?).

#### 2.2.1.1 Composição

É composta de uma placa de chumbo poroso (Pb) que forma o eletrodo negativo e uma placa de óxido de chumbo (PbO<sub>2</sub>) como eletrodo positivo. Ambas são imersas em uma solução de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) com água (H<sub>2</sub>O).

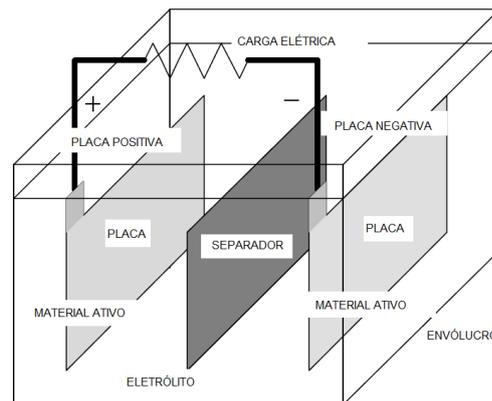
Em função do chumbo ser um material pesado e extremamente tóxico, diversos cuidados são necessários desde a construção da bateria, envolvendo a sua estrutura, proteção mecânica e isolamento e também quanto para o seu correto descarte no fim de sua vida útil. Entretanto, quando corretamente descartadas são enviadas para processo de reciclagem e quase todas as partes da bateria podem ser reaproveitadas em novas baterias de chumbo ácido (KIEHNE, 2003).

Além dos eletrodos e o eletrólito, as baterias de ácido de chumbo contam com estruturas secundárias que garantem a isolação física entre as placas além de propiciar resistência mecânica. São partes da bateria os seguintes itens:

- Placas: onde constam os eletrodos de chumbo;
- Separador: Divisor isolante entre as placas, evitando curto circuito entre elas;
- Terminais: Conectores externos ligados as placas de chumbo;
- Eletrólito: O meio ácido o qual as placas estão imersas;
- Invólucro: Carcaça externa que protege mecanicamente e evita vazamento dos fluídos.

Apresenta-se na Figura 4, uma bateria simplificada com os componentes expostos.

**Figura 4 - Esquema simplificado de uma bateria de chumbo ácido.**



Fonte: (SAAD, 2012)

### 2.2.1.2 Classificações

São classificadas em três tipos diferentes: SLI (*starting, lighting and ignition*), de tração e estacionárias. A sua classificação está intimamente relacionada com a aplicação destinada.

O primeiro tipo opera em ciclos de pequena duração fornecendo altas correntes e são comumente utilizadas em partidas de motores a combustão pelos carros. É composta de placas finas que possibilitam maior superfície de contato com os terminais garantindo descargas de correntes altas em períodos curtos. Em função

da sua aplicação de carácter curto, não deve ser descarregada completamente, pois pode danificar permanentemente a bateria.

O segundo tipo diz respeito as baterias tipicamente utilizadas em carros elétricos, mas também podem ser aplicadas a sistemas fotovoltaicos isolados da rede. Diferente das primeiras, permitem descargas mais profundas e ciclos de operação mais longos (SAAD, 2012).

Já as baterias estacionárias, são para aplicações onde o fornecimento de energia não pode ser interrompido, então são aplicáveis a UPS (*Uninterruptible Power Supply*).

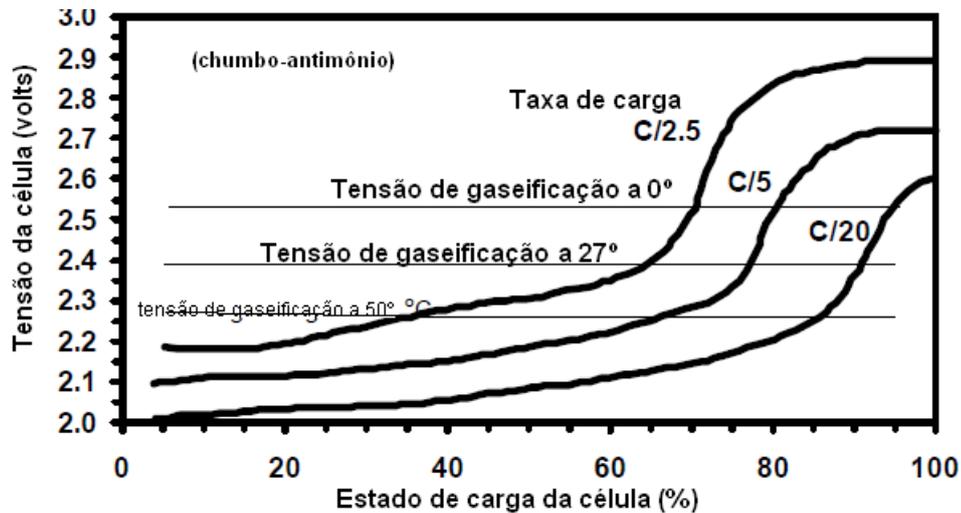
### 2.2.1.3 Características

Apesar das diferentes classificações possibilitarem aplicações diversas, as baterias de chumbo ácido não são ideais para descargas profundas. Mesmo as consideradas de descarga profunda, não devem ser descarregadas mais de 50%. Uma descarga mais profunda diminui a vida útil da bateria (BATTERY UNIVERSITY, 2010?).

Além disso, apresentam densidade de energia baixa, variando entre 80 Wh/L e 90 Wh/L, o que as tornam inviáveis para aplicações portáteis como celulares e *laptops*. Quando não estão em uso, apresentam uma auto descarga anual de 40%.

A curva de descarga de uma bateria de chumbo ácido é encontrado na Figura 5.

Figura 5 - Relação entre o estado de carga, tensão da célula e corrente de descarga.



Fonte: (SAAD, 2012)

### 2.2.2 Bateria de Níquel Cádmio

As baterias de níquel cádmio (NiCd) pertencem a um outro tipo de baterias secundárias onde o eletrólito é uma solução alcalina, normalmente hidróxido de potássio diluído.

O seu desenvolvimento iniciou no começo do século XX e apesar de mais cara, apresentava vantagens significativas em comparação a bateria de chumbo ácido, podendo sofrer grande profundidade de descarga e ser armazenada descarregada. Entretanto, tem como principal desvantagem o efeito memória conhecido popularmente por vício, onde a bateria deixa de recarregar completamente, atingindo apenas uma faixa anteriormente atingida.

Essa bateria foi amplamente utilizada nos primeiros equipamentos portáteis, mas a medida do avanço das baterias de Li-íon e outras tecnologias, perdeu mercado pela menor eficiência e o efeito de memória.

#### 2.2.2.1 Composição

Tem como seu catodo o eletrodo de hidróxido de níquel e como anodo o cádmio, ambos imersos em uma solução alcalina aquosa. Apesar de não fazer parte

da reação química, a solução eletrolítica contém de 20% a 33% de hidróxido de potássio (KOH) (KIEHNE, 2003).

O cádmio é um elemento perigoso para natureza e altamente tóxico, qualquer contato com ele pode ser prejudicial e por isso essas baterias precisam ser armazenadas e descartadas corretamente.

#### 2.2.2.2 Características

Pela sua composição, pode ser armazenada em longos períodos descarregadas, com o custo de realizar uma carga completa antes do seu primeiro uso. Facilitando o seu transporte e armazenamento, que diminui o risco de acidentes.

Apresenta-se como uma opção viável, quando avaliada em custo por número de ciclos de uso e pode ser adaptável para diversas aplicações com diferentes volumes e capacidades.

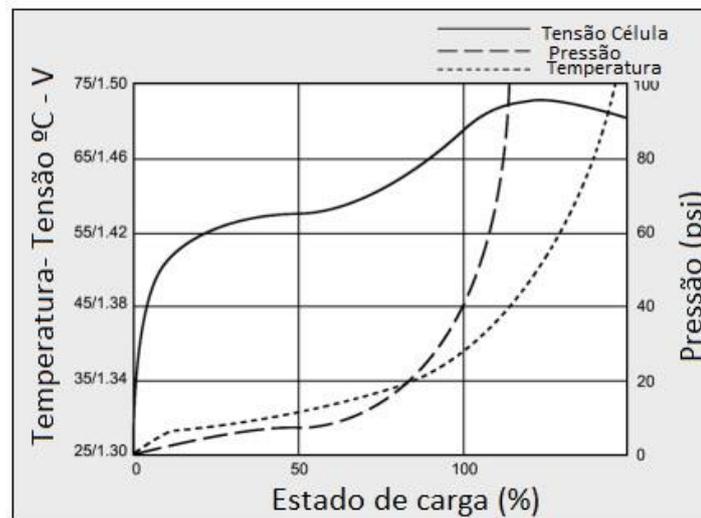
Diferente das baterias de Li-íon e chumbo ácido que são carregadas a partir do princípio de CC-CV (*Constant Current – Constant Voltage*), as baterias de NiCd são mais robustas e podem ser carregadas mais rapidamente que as outras, sofrendo menores danos. Entretanto, realizar sua carga é um processo mais complexo que nas demais.

Os fabricantes recomendam que a primeira carga seja lenta, isso é, que o carregador não cause esforços maiores que os nominais, isso garante que as células se mantenham equipotenciais e o eletrólito se espalhe corretamente não deixando espaços vazios em decorrência de longos períodos sem carga e ações externas (BATTERY UNIVERSITY, 2019).

Outra particularidade da bateria de NiCd referente ao seu carregamento é a detecção do estado de carga. Há duas estratégias para determinar o completo carregamento da bateria, a primeira consiste em medir a variação da temperatura ao longo de um minuto, quando essa estiver na proporção de 1°C por minuto, a carga deverá ser encerrada. Já a segunda, consiste em monitorar a tensão nos terminais da bateria, quando essa subir rapidamente e em sequência cair drasticamente, é o sinal que está carregada.

A curva de carga da bateria em função dos diversos fatores é apresentada na Figura 6.

**Figura 6 - Curva de carga bateria de NiCd**



Fonte: (BATTERY UNIVERSITY, 2019)

Em relação a densidade de energia, esse tipo de bateria pode variar entre 50 Wh/L e 150 Wh/L, o que para certas aplicações móveis se torna mais interessante do que às baterias de chumbo ácido.

### 2.2.3 Bateria de Li-Ion

A bateria de Li-Ion é derivada da bateria de lítio que começou a ser desenvolvida em 1912 por G. N. Lewis, entretanto só apareceu comercialmente na década de 70 em função da instabilidade das baterias de Lítio que inflamavam e explodiam facilmente.

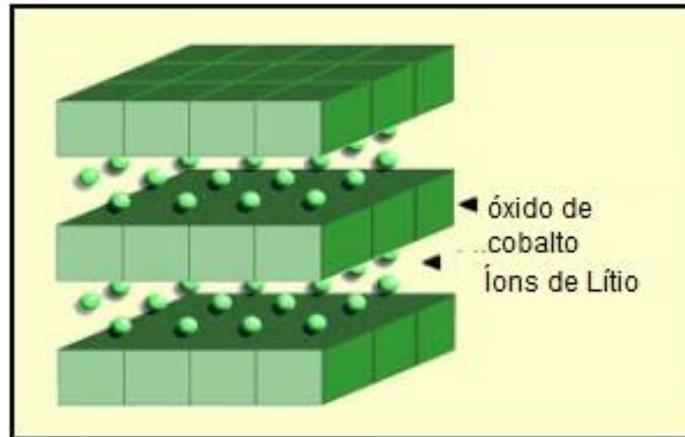
Apresenta como vantagem maior densidade de energia dentre as baterias estudadas neste trabalho e por isso é utilizada amplamente em eletrônicos como celulares e notebooks, além de não apresentar efeito memória, problema que fez a bateria de NiCd perder o seu mercado (BATTERY UNIVERSITY, 201-).

#### 2.2.3.1 Composição

As composições podem variar dependendo do material ativo da bateria de íon de lítio. Há cinco baterias principais, porém sua estrutura não é variável. O material

do anodo forma camadas e os íons de lítio preenchem os espaços vazios entre as camadas. Um exemplo disso pode ser observado no caso da bateria de Óxido de Lítio Cobalto, na Figura 7.

**Figura 7 - Estrutura bateria de óxido de lítio cobalto**



Fonte: (BATTERY UNIVERSITY)

Quando ocorre a descarga, o sentido dos elétrons é em direção ao anodo (óxido de cobalto) com origem dos íons de lítio. No momento da carga o sentido é invertido.

### 2.2.3.2 Classificações

Diversos podem ser os compostos para as baterias e Li-íon, o que influencia é a aplicação desejada. As cinco principais são classificadas como: Óxido de Lítio Cobalto, Óxido de Lítio Manganês, Fosfato de Lítio Ferro, Óxido de Lítio Níquel Cobalto Alumínio e Titanato de Lítio.

Battery University (2019d) apresenta as classificações de baterias de íons de lítio como:

A bateria de Oxido de Lítio Cobalto ( $\text{LiCoO}_2$ ), utiliza o  $\text{LiCoO}_2$  como cátodo e grafite como anodo. É amplamente utilizada em celulares e *laptops*, porém sua vida útil é baixa, além de não ter estabilidade térmica e apresenta capacidade de carga limitada. Não pode ser carregada com uma corrente além da Capacidade (C) estabelecida no datasheet. Esse tipo de bateria apresenta densidade de energia entre 250 e 690 Wh/L, que comparada às tecnologias das duas baterias apresentadas

anteriormente possui duas vezes ou mais energia por volume, se tornando atrativa para aplicações portáteis.

No caso da de Óxido de Lítio Manganês ( $\text{LiMn}_2\text{O}_2$ ), sua estrutura facilita a corrente de elétrons, por formar uma passagem de menor resistência, apresentando melhor desempenho de estabilidade térmica, portanto maior segurança. É possível carregá-la e descarregá-la com correntes da ordem de 20A e, por isso, é empregada em equipamentos de potência e instrumentos médicos.

A bateria de Fosfato de Lítio Ferro ( $\text{LiFePO}_4$ ), por sua vez, é mais tolerante a cargas mais altas e sofre menores danos se aplicada a uma tensão maior que a nominal. Tem um poder de descarga maior que as demais, que pode ser balanceado com a redução da vida útil, pode substituir baterias de chumbo ácido como aplicação.

A principal característica da de Óxido de Lítio Níquel Cobalto Alumínio ( $\text{LiNiCoAlO}_2$ ) é a alta duração de ciclo e uma energia específica maior, porém tem como contras estar sujeita a maior instabilidade e seu alto custo monetário.

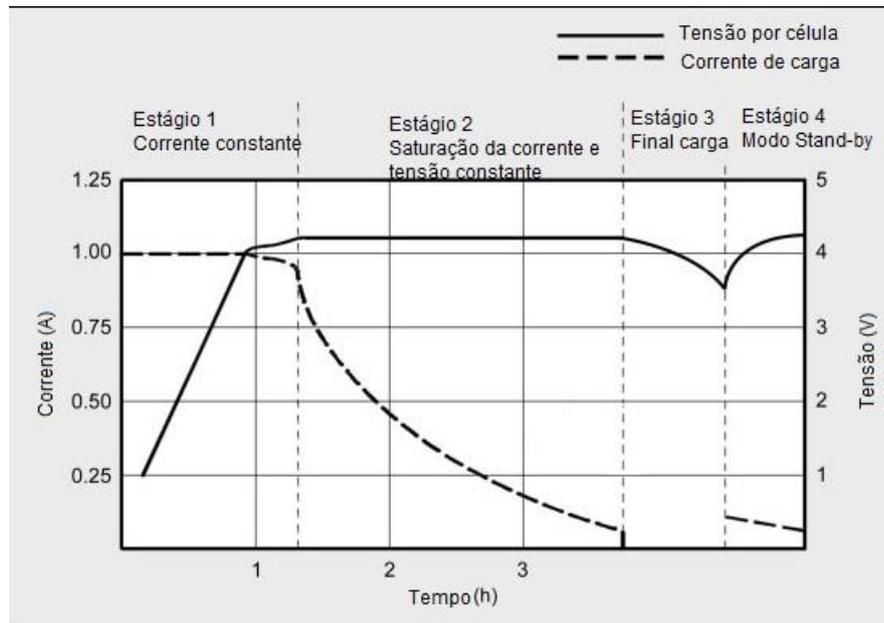
Por último há a bateria de Titanato de Lítio ( $\text{Li}_4\text{To}_5\text{O}_{12}$ ). Sua tensão nominal de cada célula é de cerca de 2,4 V, porém apresenta como vantagem correntes de descarga de até dez vezes a capacidade nominal. Seus ciclos de vida são maiores e sofrem baixa descarga se armazenadas em locais com temperaturas de  $-30^\circ\text{C}$ . Sua desvantagem é a baixa energia específica, com cerca de 65 Wh/kg, tornando difícil sua aplicação em portáteis.

### 2.2.3.3 *Curva de carga e descarga*

Como o foco do trabalho é desenvolver um controlador de carga e descarga para baterias de Li-Íon, é necessário compreender o comportamento desejado de maneira a garantir que a capacidade não sofra alteração.

Uma maneira de carregar a bateria de Li-Íon é através do método CC-CV. Conforme citado anteriormente no capítulo sobre a bateria de NiCd, este método consiste em aplicar uma corrente constante por um período, em seguida aplicar uma tensão constante até o final da carga. Esta curva está apresentada na Figura 8.

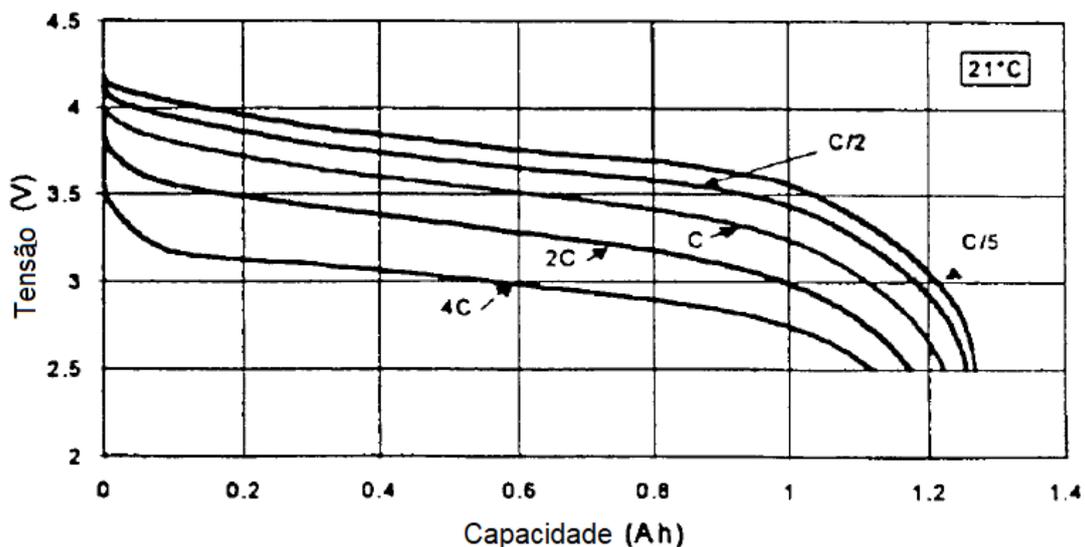
**Figura 8 - Curva de carga Bateria de Li-Íon**



Fonte: (BATTERY UNIVERSITY, 2018) (Adaptado).

De forma semelhante, apresenta-se a característica de descarga, para diferentes níveis de correntes de aplicação na Figura 9.

**Figura 9 - Curva de descarga para diferentes cargas.**



Fonte: KIEHNE, 2003 (adaptado).

Diferentemente da carga, o comportamento de descarga não é medido pelo tempo em uso, mas sim pela corrente (ou energia) requerida da bateria. Isso é, a corrente requerida influencia diretamente na descarga da bateria. A fim de evitar danos a bateria é preciso monitorar a corrente de descarga e garantir que ela não exceda os valores determinados pelo fabricante.

#### 2.2.4 Conclusão parcial

Apresentaram-se neste capítulo três tecnologias de baterias, sendo que foi dado ênfase a última, a bateria de Li-íon, destacando-se as principais vantagens e desvantagens de cada tecnologia e suas aplicações.

Além disso, no que diz respeito a bateria escolhida para a análise, mostraram-se as suas principais características e sua curva de carga e descarga. Com base nessa curva, será projetado o controlador.

### 3 CONVERSOR ESTÁTICO DE ENERGIA

Para controlar a carga de uma bateria são normalmente utilizados conversores de potência. Tratando-se de conversores de corrente contínua, é possível citar estruturas não isoladas como o conversor *Buck*, *Boost* e *Cúk* ou estruturas isoladas como o conversor *Fly-back*, *Push-Pull* e *Forward*.

Independente do conversor, eles combinam elementos de armazenamento de energia, com elementos ativos (transistores) e passivos (diodos), para possibilitar a transformação do nível de tensão.

Como o intuito do trabalho é a aplicação dos conversores para controle de carga de bateria, a estrutura escolhida será a do conversor *Buck*, esse conversor será aprofundado ao longo desta seção e evidenciados os motivos que justificam a sua escolha, porém, o principal é o fato deste ser um conversor naturalmente estável para controle.

#### 3.1 Conversor *Buck*

O conversor de corrente contínua do tipo *Buck* é um conversor abaixador de tensão não isolado. Pode ser empregado como fonte de corrente contínua em sistemas de computadores, telecomunicações, eletrodomésticos, equipamentos médicos, satélites entre outros (BARBI, 2007).

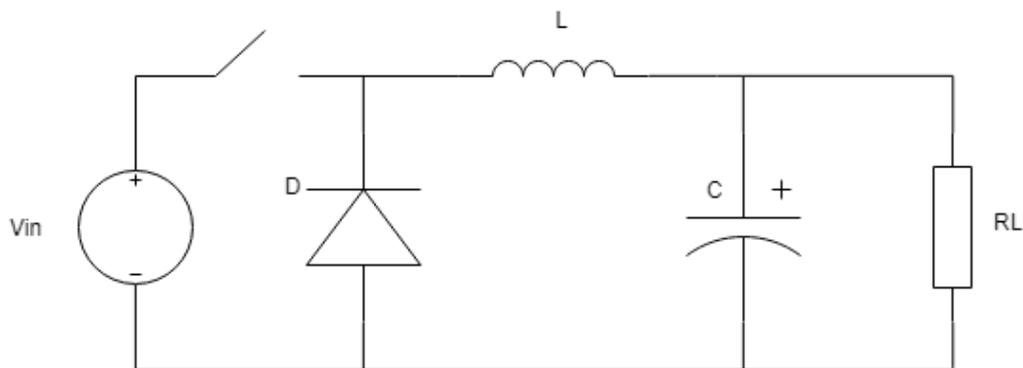
Suas características e principais modos de operação e dimensionamento serão descritos ao longo desta seção, com o intuito de apresentar ao leitor a

justificativa da utilização da estrutura para a aplicação de controlador de carga de bateria.

### 3.1.1 Modos de operação

O conversor do tipo *Buck* funciona como uma estrutura abaixadora de tensão, quando a chave da Figura 10 fecha, a fonte primária carrega o indutor e o capacitor de filtro e no momento em que a chave abre, então a abrupta descontinuidade de corrente no indutor provoca uma tensão ( $V_L$ ) que polariza o diodo e mantém a corrente circulando no circuito.

**Figura 10 - Conversor *Buck*.**



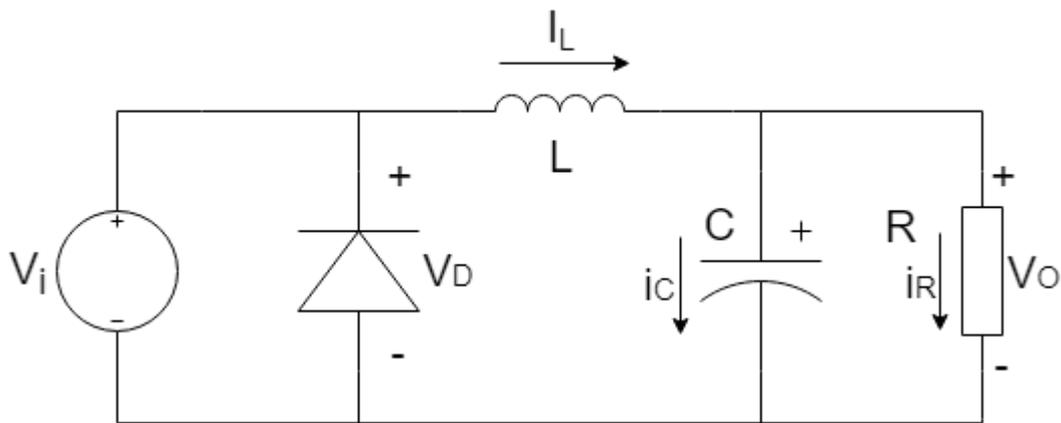
O nível é determinado a partir do comando da chave controlável, onde usualmente são utilizados transistores MOSFETs para baixa potência, devido a sua facilidade de disparo e baixo tempo de subida e descida, além da sua versatilidade para operar em frequências da ordem de dezenas de kHz.

Existem três modos de operação da estrutura, que dizem respeito ao comportamento da corrente no indutor em regime permanente: Condução contínua, na qual a corrente no indutor nunca se anula durante o intervalo de comutação; condução crítica quando a corrente chega a zero e imediatamente retorna a crescer com o chaveamento e a condução descontínua, quando a corrente é anulada no indutor e assim permanece por um tempo até retornar a crescer.

### 3.1.1.1 Operação em condução contínua

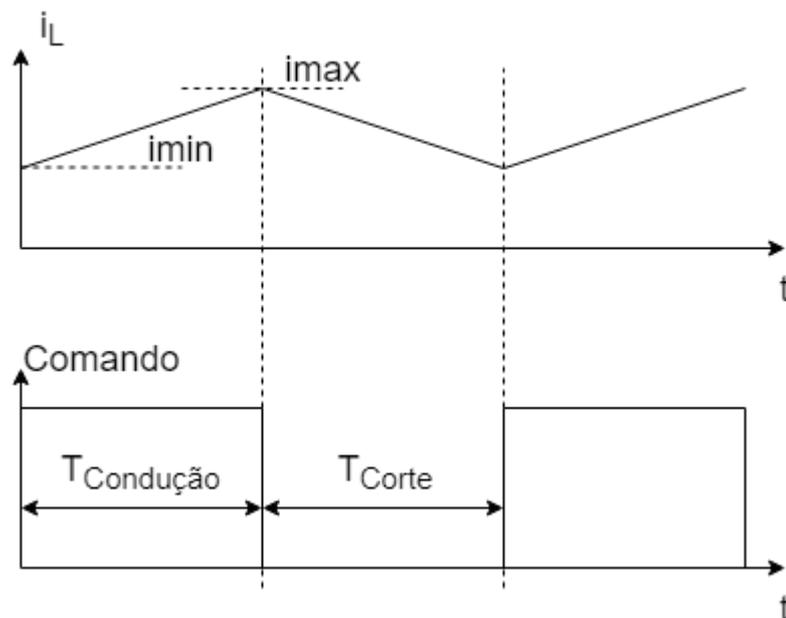
Para operação em condução contínua é considerado que o conversor está em regime permanente e a tensão na carga é contínua, após etapa transitória de carga do indutor e capacitor de filtro. Quando a chave está fechada ( $t_{\text{condução}}$ ), o sentido da corrente é apresentado na Figura 11.

**Figura 11 - Conversor *Buck* em operação chave em condução.**



Após o fechamento da chave, a corrente no indutor cresce linearmente de um valor mínimo ( $i_{\text{min}}$ ), até o valor máximo ( $i_{\text{max}}$ ) como se apresenta na Figura 12.

**Figura 12 - Formato de onda de corrente no Indutor nos períodos de condução e corte.**



Esse crescimento ocorre durante todo o intervalo de condução, sendo que o valor médio ( $I_{L\text{med}}$ ) será dado por:

$$I_{Lmed} = \frac{(i_{max} + I_{min})}{2} \quad (1)$$

A curva de carga obedecerá ao comportamento descrito nas seguintes equações obtidas a partir da análise da Figura 11 e Figura 12.

Tem-se que:

$$V_i = V_L + V_o \quad (2)$$

Mas,

$$V_L = L * \frac{di_L(t)}{dt} \quad (3)$$

Então,

$$V_i - V_o = L * \frac{di_L(t)}{dt} \quad (4)$$

Considerando que é conhecido o intervalo que a chave se encontra em condução e o período de comutação total de um ciclo, é possível simplificar a equação 4 para a equação 5.

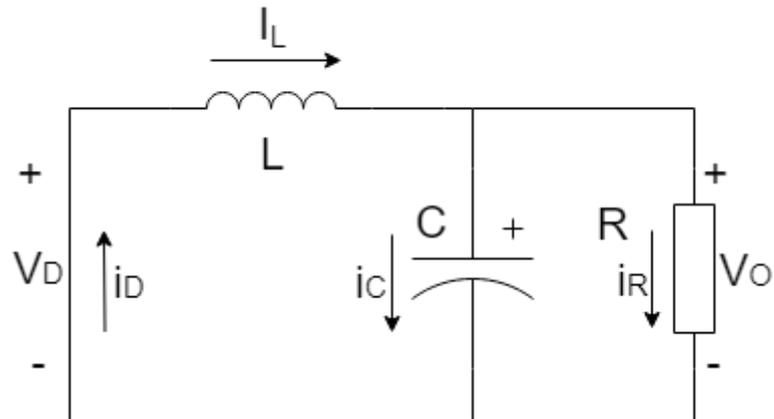
$$V_i - V_o = L * \frac{\Delta i_L}{\Delta t} \quad (5)$$

Assim:

$$\Delta i_L = \frac{(V_i - V_o) * t_{condução}}{L} \quad (6)$$

Quando a chave é aberta, o diodo D entra em condução e é iniciada a descarga do indutor do valor de  $i_{max}$  até  $i_{min}$  durante o intervalo  $t_{corte}$ . Neste intervalo, as equações que descrevem a curva são obtidas com base na Figura 13.

Figura 13 - Conversor *Buck* operação com chave em corte.



Desta forma:

$$V_L = V_D - V_o \quad (7)$$

Assumindo que a queda de tensão no diodo é desprezível, se tem que:

$$V_L = -V_o \quad (8)$$

Então:

$$V_o = -L * \frac{di(t)}{dt} \quad (9)$$

Conforme foi simplificada a equação 4 para a equação 5, é possível simplificar a equação 9 na equação 10, assim:

$$V_o = -L * \frac{\Delta I_L}{\Delta t} \quad (10)$$

E é possível determinar a indutância L com base em:

$$L = -V_o * \frac{\Delta t}{\Delta I_L} \quad (11)$$

Sabendo que o período total (T) é a soma dos intervalos conforme a equação 12:

$$T = t_{\text{condução}} + t_{\text{corte}} \quad (12)$$

E que a tensão média no indutor é zero, pois a energia armazenada durante um período completo de comutação é zero, verifica-se que:

$$\left(\frac{V_i - V_o}{L}\right) * \frac{t_{\text{condução}}}{T} - \frac{V_o}{L} * \frac{t_{\text{corte}}}{T} = 0 \quad (13)$$

Ao rearranjar a equação 11, de maneira a representar ambos períodos em função do período total, define-se uma variável razão cíclica  $D$  que é dada pela equação 14:

$$D = \frac{t_{condução}}{T} \quad (14)$$

E assim:

$$t_{corte} = 1 - D \quad (15)$$

Desta forma, a equação 13 após realizadas simplificações dos termos em comum é reescrita em 16 como:

$$(V_i - V_o) * D = V_o * (1 - D) \quad (16)$$

Encontra-se que a tensão de saída,  $V_o$ , obedece à equação 17.

$$V_o = V_i * D \quad (17)$$

Para que seja possível observar o comportamento estático definido nesta seção é necessário que o conversor esteja operando em modo de condução contínua, sem que a corrente do indutor se anule. Dessa forma, o ponto de operação limite do modo é quando a corrente do condutor toca o eixo zero e imediatamente retorna a crescer, esse é o ponto de condução crítica. Para se compreender o que influencia na condução crítica, é preciso analisar o comportamento da corrente na carga do conversor.

Assim, na existência de uma carga ( $R_L$ ), é observado que a corrente média nesta ( $I_o$ ) durante o período  $T$  é dado pelas somas das correntes médias do capacitor  $C$ ,  $I_{Cmed}$  e do indutor  $L$ ,  $I_{Lmed}$ , obedecendo a equação 18 tem-se:

$$I_o = I_{Lmed} + I_{Cmed} \quad (18)$$

Porém, a corrente média no capacitor é zero, pois a variação de tensão no período total  $T$  é nula, então:

$$I_o = I_{Lmed} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} = \frac{V_o}{R_L} \quad (19)$$

É possível reescrever a equação 6 como:

$$I_{max} = \frac{(V_o * (1 - D) * T)}{L} + I_{min} \quad (20)$$

Então,

$$2 * \frac{V_o}{R_L} = \frac{V_o * (1 - D) * T}{L} + 2 * I_{min} \quad (21)$$

Quando o  $I_{min}$  atinge o valor nulo, é definido como ponto crítico de condução contínua e desta forma simplificando os termos, a equação 21 pode ser reorganizada para se obter o valor crítico de indutância em função da tensão e corrente de saída como.

$$L_{critico} = \frac{V_o * (1 - D) * T}{2 * I_o} \quad (22)$$

### 3.1.2 Cálculo do capacitor e indutor

#### 3.1.2.1 Indutor

As definições realizadas na seção 3.1.1.1 possibilitam o projeto de um conversor *Buck* com base em critérios especificados de: Tensão, corrente, frequência, ondulação máxima de corrente e tensão, além da potência de entrada e de saída.

Visando garantir que o conversor opere em modo contínuo, o valor da indutância deverá ser superior ao  $L_{critico}$  encontrado na equação 22. Dessa maneira, o valor da indutância necessária para atender o projeto é obtido estabelecendo a variação máxima da corrente de saída. Rearranjando a equação 6, obtém-se:

$$L = \frac{V_{in} * D * (1 - D)}{F_s * \Delta I_o} \quad (23)$$

Onde:

L – Indutância mínima;

$V_{in}$  – Tensão de entrada;

$F_s$  – Frequência de comutação do interruptor;

D – Razão cíclica;

$\Delta I_o$  – Variação da corrente de saída.

Como é observado por Barbi (2007 p.92) a equação 23 é quadrática em função de D, que varia de 0 a 1, o pior caso é observado quando D tem valor igual a 0,5. Então é possível simplificar a equação 23 para:

$$L = \frac{V_{in}}{4 * \Delta I_o * F_s} \quad (24)$$

### 3.1.2.2 Capacitor

O capacitor será determinado com base na ondulação máxima de tensão de saída. Como foi definido na seção 3.1.1, o conversor *Buck* apresenta dois estágios quando opera em condução contínua, sendo que no segundo estágio o capacitor é responsável por suprir a corrente demandada pela carga.

O capacitor armazena energia em seu campo elétrico e a tensão do capacitor ( $V_C$ ) é obtida pela integral da corrente em razão da capacitância como mostra a equação 25.

$$V_C = \int_0^t \frac{i_c(t)}{C} * dt \quad (25)$$

Onde  $i_c$  é a corrente no capacitor e C a capacitância deste. Derivando ambos os lados da equação, se encontra que a corrente  $i_c$  é:

$$I_c = C * \frac{dV_C}{dt} \quad (26)$$

Porém, a corrente elétrica pode ser descrita como a variação de cargas (Q) em um tempo (t), ou seja:

$$I_c = \frac{dQ}{dt} \quad (27)$$

Igualando-se as equações 26 e 27, é verificado que:

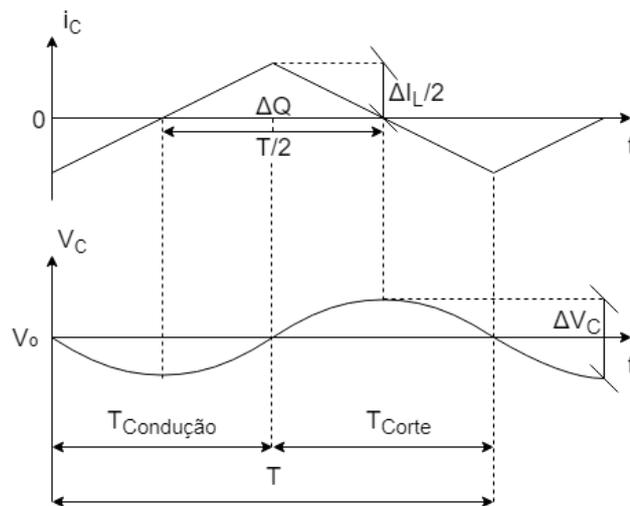
$$C * \frac{dV_C}{dt} = \frac{dQ}{dt} \quad (28)$$

Sendo o período de observação conhecido, simplifica-se a equação 28 na equação 29.

$$C * \Delta V_C = \Delta Q \quad (29)$$

A variação das cargas (Q) se dá em função da variação da corrente, como a corrente verificada na carga é apenas a componente média da corrente  $I_L$ , a parcela restante é absorvida pelo capacitor, ou seja, durante o estágio de carga do capacitor, a corrente absorvida é metade da variação da corrente  $I_L$  atingindo valor máximo  $I_{max}$ . Bem como no período de descarga o capacitor descarregará até o  $I_{min}$  no fim do período de corte do interruptor.

**Figura 14 - Formato de onda no capacitor**



Idealmente, o capacitor precisará de meio período da chave em condução para ultrapassar sua corrente média e meio período da chave em corte para encontrar o mesmo ponto. Assim, pode se obter a variação da carga Q através da área do triângulo formado através da equação 30:

$$\Delta Q = \frac{\frac{\Delta I_L}{2} * \left( \frac{t_{condução}}{2} + \frac{t_{corte}}{2} \right)}{2} \quad (30)$$

Que pode ser reduzida para a equação 31:

$$\Delta Q = \frac{\Delta I_L * T}{8} \quad (31)$$

Substituindo a equação 10 na equação 31, obtém-se que na equação 32:

$$|\Delta Q| = \frac{|V_o * t_{corte}| * T}{8 * L} \quad (32)$$

A carga em um capacitor pode ser obtida também pela equação 33.

$$Q = C * V_c \quad (33)$$

Substituindo 33 em 32, e reorganizando os termos em questão, verifica-se que a Capacitância  $C$  é obtida a partir da máxima ondulação de tensão desejada na saída do conversor, como mostra a equação 34.

$$C = \frac{|V_o * t_{corte}| * T}{8 * L * \Delta V_c} \quad (34)$$

### 3.1.3 Funcionamento dinâmico

Apresentado o funcionamento estático do conversor na seção 3.1.1.1 é necessário verificar o funcionamento do conversor dinamicamente, isso é, como irão se comportar a tensão e a corrente de saída quando houverem modificações nas configurações das cargas ou variação na tensão de entrada. A partir da modelagem será possível definir a estratégia de controle que garanta estabilidade e eficácia.

Sem o modelo dinâmico correto o controle se torna ineficiente, pois a aplicação de carga de baterias, foco do estudo, faz com que o conversor precise operar em dois estágios distintos durante um ciclo de carga, corrente constante e tensão constante. Isso implica em variar a dinâmica do conversor no tempo.

Para facilitar o entendimento do funcionamento dinâmico do conversor, nesta seção será apresentada uma breve explicação sobre a teoria de pequenos e grandes sinais.

#### 3.1.3.1 Modelagem

A modelagem de um sistema é a forma matemática encontrada para descrever os fenômenos físicos apresentados nele. Na maior parte dos sistemas de engenharia há diversos fenômenos presentes nos sistemas, uns afetam com maior intensidade que outros e alguns são desprezados propositalmente, gerando modelos aproximados, mas fidedignos (ERICKSON e MAKSIMOVIC, 2001).

A teoria de circuitos elétricos e parte das ferramentas aplicáveis a eles não são suficientes à primeira vista para o caso de conversores estáticos como o *Buck*. Isto se dá em função do fato do conversor estático apresentar descontinuidades geradas pela comutação e corte das chaves presentes no circuito.

No sistema do conversor *Buck* sob condições estáticas e em modo de operação contínua, onde a razão entre a tensão de saída a sua corrente satisfaz os requisitos da equação 22, é verificado que a tensão na saída depende apenas da tensão da entrada ( $V_i$ ) e a razão cíclica de operação que foi definida na equação 14.

Portanto, entende-se que a variação de qualquer uma dessas grandezas ao longo do tempo implica em variação na tensão de saída do conversor e isto não é o desejado. Para o controle, é preciso realizar a modelagem e linearização das descontinuidades.

Em função do tempo de resposta do conversor a uma variação ser normalmente mais alto que o tempo de comutação das chaves, é possível realizar uma média do valor instantâneo para cada intervalo de comutação.

Na Figura 15 é apresentada a resposta de um sinal qualquer comutado ao longo do tempo quando sofre uma variação.

**Figura 15 - Sinal comutado em função do tempo e sua representação por valor médio instantâneo**



Fonte: (ERICKSON e MAKSIMOVIC, 2001)

É possível comparar essa onda comutada com a onda de corrente no indutor do conversor estudado, conforme é abordado na seção 3.1.1.1. De forma análoga, pode-se considerar que a corrente média do indutor em cada ciclo de operação representa o sinal médio da Figura 15.

Ou seja, como a ondulação (ou *ripple*) observado normalmente é inferior a 1%, é possível considerar que o valor médio varia linearmente ao longo do tempo, respondendo as variações do circuito de forma mais lenta que a comutação do sinal.

Para encontrar-se o valor médio instantâneo, serão utilizadas como exemplo as equações de corrente no indutor e tensão sobre o capacitor, visto que estas têm esse comportamento não linear de acordo com as equações 35 e 36.

$$L \frac{d \langle I_L(t) \rangle_T}{dt} = \langle V_L(t) \rangle_T \quad (35)$$

$$C \frac{d \langle V_C(t) \rangle_T}{dt} = \langle I_C(t) \rangle_T \quad (36)$$

Assim, o valor médio instantâneo é a média do valor da tensão e da corrente observados no período de comutação. De mesma forma a ser reescrito conforme equação 37.

$$\langle x(t) \rangle_T = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} x(\tau) d\tau \quad (37)$$

Onde x pode representar o sinal de tensão no capacitor ou corrente no indutor.

Ainda que efetivo, apenas isso não lineariza todo o sistema pois a tensão no indutor e a corrente do capacitor permanecem equações diferenciais não lineares. Para obtenção do modelo completo linearizado, é necessário compreender a teoria de pequenos sinais e aplicá-la.

Como visto na seção 3.1.1.1, o que modela o funcionamento do conversor em funcionamento estático é o equilíbrio V-s (volt-segundo) no indutor e o equilíbrio entre as cargas do capacitor no período total de comutação (ERICKSON e MAKSIMOVIC, 2001).

Assim, é possível considerar que o conversor tem comportamento linear e constante de tensão e corrente em um ponto de operação qualquer e sofre perturbações (CA) suficientemente pequenas e dividem-se as parcelas do sistema em duas parcelas como é mostrado na equação 38, 39 e 40.

$$\langle I_L(t) \rangle_T = I_L + i_L \quad (38)$$

$$\langle V_x(t) \rangle_T = VD + vD \quad (39)$$

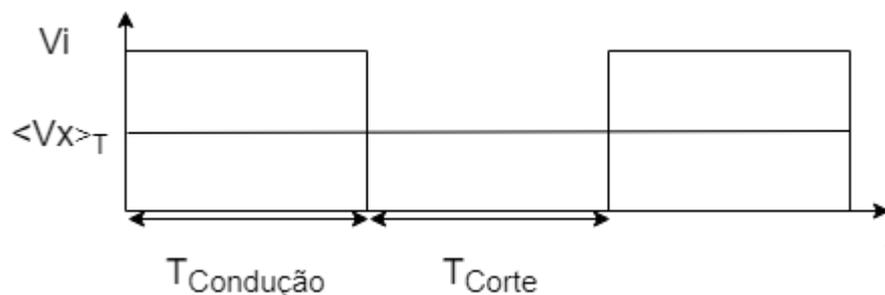
$$D = D + d \quad (40)$$

Em que as letras minúsculas correspondem a variável em sua componente alternada que varia em função do tempo. Com ambas as parcelas são realizadas as modelagens de tensão e corrente para o conversor. Como o foco do presente estudo não é a dedução de todas as equações de teorias de pequenos sinais, essas serão omitidas, porém é possível encontrar toda a dedução em Erickson e Maksimovic (2001, p.200).

### 3.1.3.2 Modelo Buck Tensão

Para definir o modelo de resposta para controle da tensão se utiliza a equação 38 para encontrar o valor médio instantâneo da tensão comutada, que é aplicada entre o diodo D e o terra. A forma de onda de tensão no diodo é observada na Figura 16.

Figura 16 - Formato da onda de tensão no diodo.



Idealmente, essa onda ao longo do tempo forma um quadrado e o valor médio instantâneo para cada período de comutação pode ser obtido a partir da equação 41.

$$\langle V_x \rangle_T = V_i * \frac{t_{\text{condução}}}{T} = V_i * D \quad (41)$$

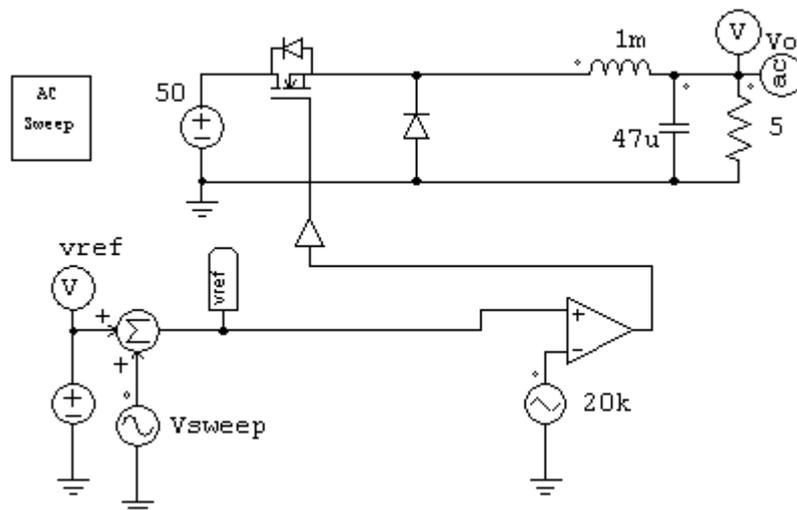
O conversor apresenta na sua saída um filtro passa baixas (LC), que é de segunda ordem. Considerando a impedância de carga como puramente resistiva, há um circuito RC paralelo em série com um indutor, já que o circuito foi linearizado, há uma tensão média instantânea aplicada sobre o diodo que foi obtida em 41.

Como o objetivo é determinar o modelo que dá a resposta da tensão de saída  $V_o$  em função da variação na razão cíclica  $D$ , variável de controle do circuito, é necessário observar a resposta da saída em função de uma variação na entrada de controle. Encontra-se a função de transferência da tensão de saída pela razão cíclica da equação 42.

$$\frac{vo(s)}{d(s)} = \frac{\frac{Vi}{L * C}}{s^2 + \frac{s}{R * C} + \frac{1}{L * C}} \quad (42)$$

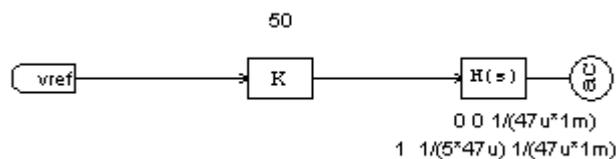
Onde  $vo(s)$  é a tensão de saída variável no domínio da frequência. Para comprovação do modelo, foi utilizado o *software* PSIM, onde foi verificada a resposta do sistema do circuito e sua função de transferência equivalente. Na Figura 17 se encontra a modelagem do circuito no PSIM.

**Figura 17 - Validação do Modelo da Tensão de saída do Buck.**



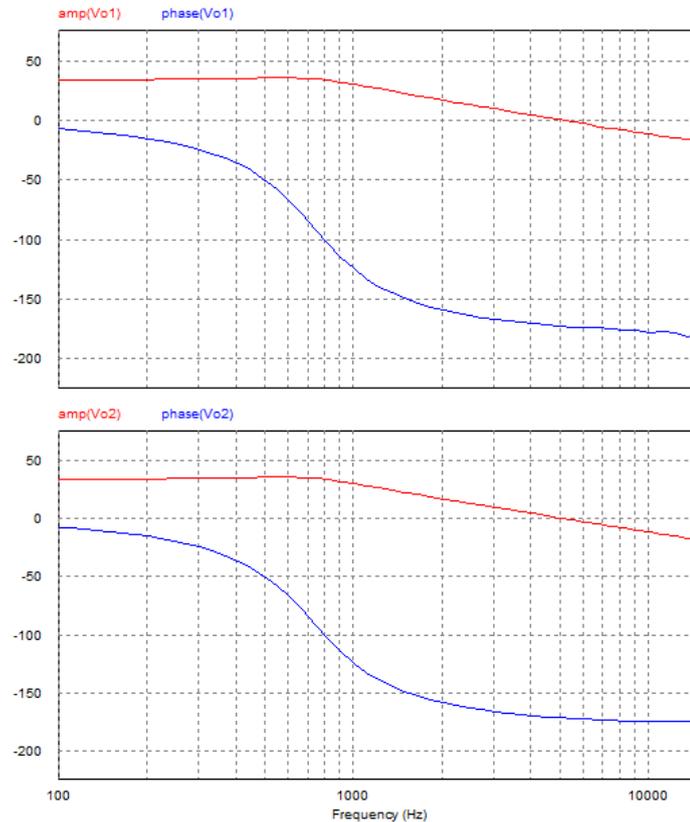
Em sequência, na mesma simulação foi montado um diagrama de blocos com a função de transferência encontrada na equação 42. Como é mostrado na Figura 18.

**Figura 18 - Validação do Modelo em blocos da Tensão de saída do Buck.**



A resposta em frequência do circuito e do diagrama de blocos é apresentada na Figura 19. Na imagem superior a resposta de ganho e fase para o circuito e na imagem inferior a resposta de ganho e fase para o diagrama de blocos.

**Figura 19 - Resposta em frequência da validação do modelo.**



Foi verificado que o modelo matemático encontrado na equação 42 traduz o comportamento do circuito, validando o modelo de tensão do conversor.

### 3.1.3.3 Modelo Buck Corrente

Para modelagem do controle de corrente no conversor *Buck* é necessário observar inicialmente que a corrente de saída é o valor médio da corrente que atravessa o indutor.

Considerando que a tensão média instantânea sobre o circuito RLC de saída do *Buck* é obtida através da equação 40, é possível encontrar um circuito equivalente entre o indutor, capacitor e a resistência a fim de determinar a variação na corrente do circuito em função da razão cíclica.

A impedância equivalente entre a carga e o capacitor em paralelo é obtida na equação 43.

$$Z_{RC} = \left( \frac{1}{R} + s * C \right)^{-1} \quad (43)$$

Enquanto a impedância equivalente para o circuito é dada por 44.

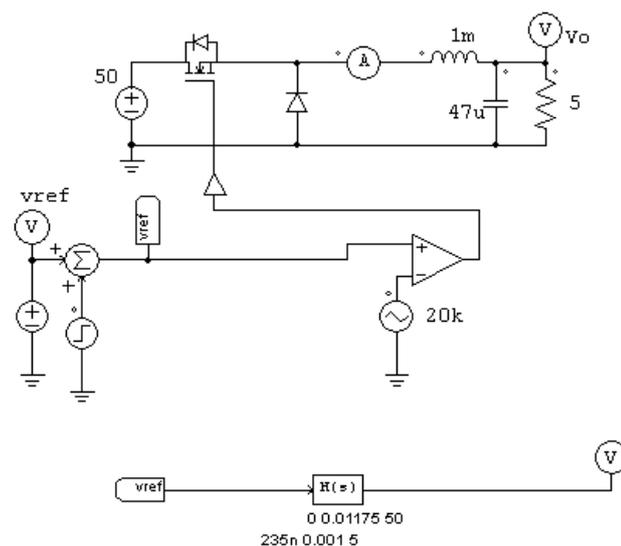
$$Z_{eq} = Z_{RC} + s * L \quad (44)$$

Então, a corrente do circuito em função da razão cíclica é corretamente descrita pela equação 45.

$$\frac{i(s)}{d(s)} = \frac{Vi * \left( s * C + \frac{1}{R} \right)}{s^2 * L * C + \frac{L}{R} + 1} \quad (45)$$

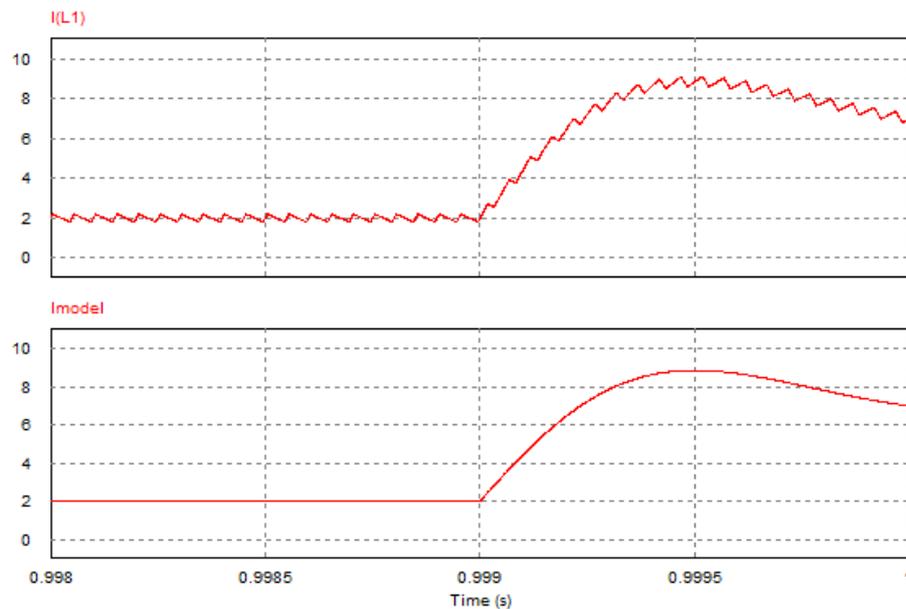
Para validação do modelo foi considerado um circuito operando com uma corrente de 2 A, em seguida foi inserido um degrau e comparada a resposta do circuito com a resposta do modelo. O circuito e o modelo foram montados conforme é mostrado na Figura 20.

**Figura 20 - Comparação entre o circuito e modelo para validação.**



Observam-se as respostas na Figura 21, onde a superior representa o circuito e a inferior representa o modelo.

**Figura 21 - Validação do modelo dinâmico de corrente.**



Note, que o modelo é uma aproximação linear de um sinal comutado e representa corretamente a média do valor, que é o desejado a se controlar. Dessa maneira, é possível considerar a modelagem realizada.

## 4 ESTUDO DE CASO

De forma a concentrar todos os conhecimentos abordados ao decorrer deste trabalho e a forma de validar a correta abordagem dos conteúdos, é proposto o projeto de um controlador de carga de uma bateria de Li-íon.

Para o projeto será considerada uma bateria real e disponível no mercado, que é o caso da Samsung INR18650-25 R. Suas principais especificações estão definidas na Tabela 1.

Tabela 1 - Especificações principais Samsung INR18650-25R

<b>Capacidade (C)</b>	<b>2500 mAH</b>
<b>Tensão nominal</b>	<b>3,6 V</b>
<b>Tensão ao término da descarga</b>	<b>2,5 V</b>
<b>Tensão máxima da bateria</b>	<b>4,2 V</b>
<b>Carga padrão</b>	<b>1,25 A para corrente constante 4,2 V durante tensão constante 125 mA para encerrar a carga 3 horas para carga total</b>
<b>Carga rápida</b>	<b>4 A para corrente constante 4,2 V para tensão constante 100 mA para encerrar a carga 1 hora para carga total</b>

Fonte: (SAMSUNG SDI CO., LTD. - ENERGY BUSINESS DIVISION, 2014)

Outros parâmetros como a temperatura e as dimensões da célula devem ser levados em consideração na implementação física do controlador. Porém, a análise se manterá nos critérios elétricos de corrente e tensão máximos suportados, pois o objetivo é garantir a alimentação adequada. O controlador será desenvolvido para carga rápida e o seu controle será analógico.

#### 4.1 Projeto do Estágio de Potência

Para o projeto do estágio de potência é preciso definir o indutor e o capacitor adequados. Na seção 3.1.2 foram apresentados os critérios necessários e calculados a partir das equações 24 e 34. A Tabela 2 apresenta os valores especificados e os respectivos valores calculados com base nas equações.

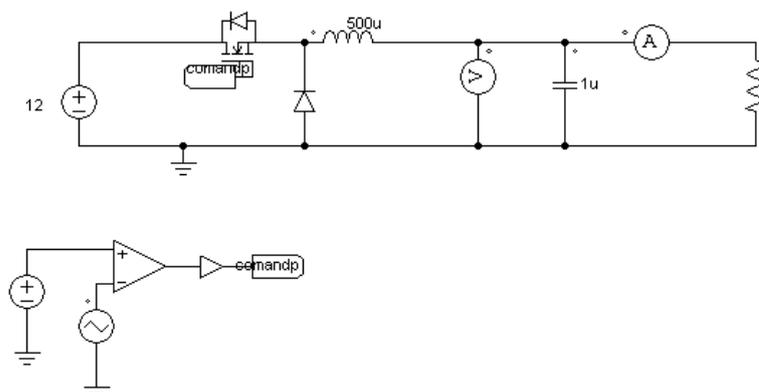
Tabela 2 - Especificações de Projeto e Valores adotados.

Item	Valor adotado
Potência	20 W
Tensão máxima saída	4,2 V
Corrente máxima saída	4 A
Corrente mínima na saída	100 mA
Variação de corrente no indutor ( $\Delta I_L$ )	$\pm 38$ mA
Ondulação de tensão na saída ( $\Delta V_o$ )	$\pm 21$ mV
Frequência de chaveamento ( $F_s$ )	80 kHz
Tensão de entrada ( $V_i$ )	12 V
Indutor (L)	500 $\mu$ H
Capacitor (C)	930 nF -> 1 $\mu$ F

Visando otimizar o projeto e levando em consideração que a operação em 100 mA é a de menor período de duração, foi projetado um indutor com impedância que permitisse que mesmo operando em baixa corrente o conversor não atinja o estado de operação descontínuo, que foi definido na equação 22 e é de 136,5  $\mu$ H. Da mesma forma, foi utilizado o capacitor de 1  $\mu$ F pois é o mais próximo comercialmente disponível.

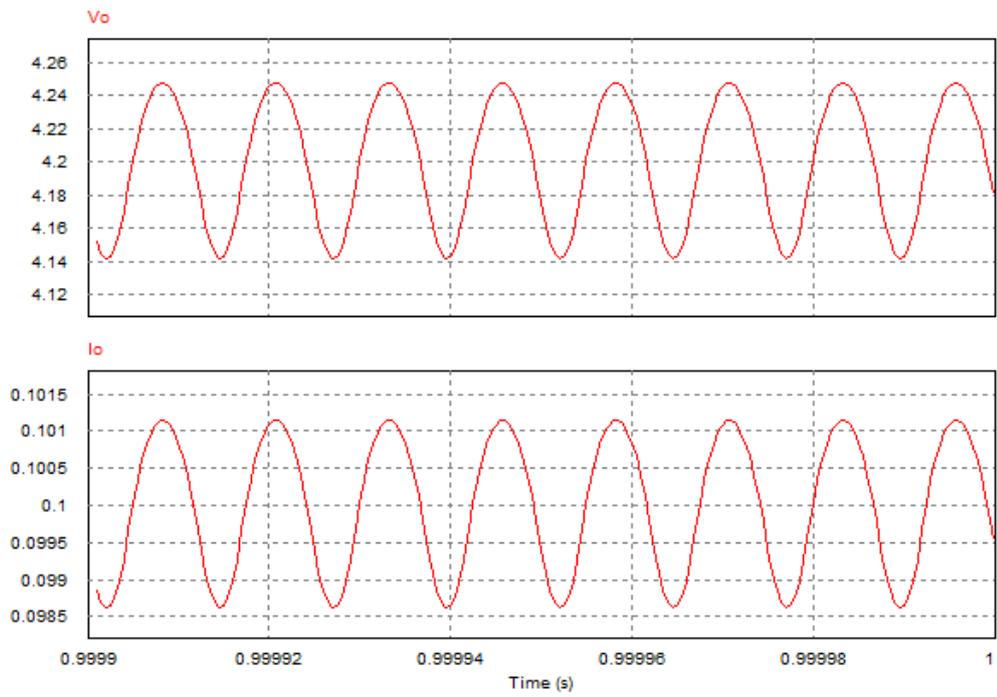
Para validar o estágio de potência projetado foi escolhido o ponto de operação com 4,2 V na saída e corrente de 100 mA. O circuito foi montado conforme a Figura 22.

Figura 22 - Conversor projetado validação do estágio de Potência.



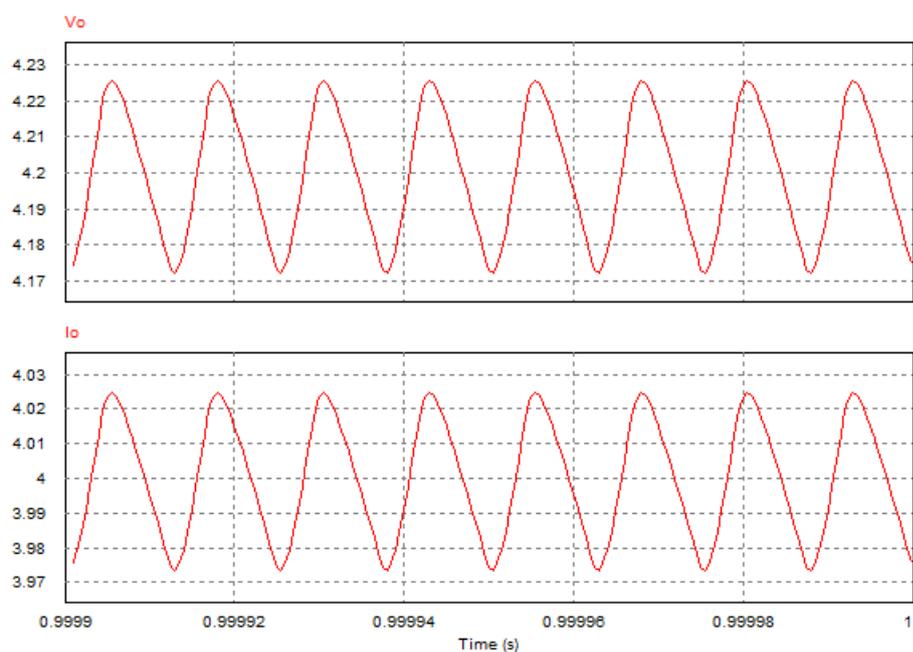
Foi verificada a tensão e a corrente de saída em um período que fosse possível observar a variação. O resultado é verificado na Figura 23.

**Figura 23 - Validação do Projeto de Potência.**



Se verifica então a operação com os 4 A de saída, respeitando os 4,2 V máximos que podem ser aplicados a bateria.

**Figura 24 - Validação Projeto de Potência saída máxima.**



Verifica-se que a operação em corrente máxima reduz o *ripple* nas formas de onda de tensão e corrente. Como o maior estágio do controlador de carga é operando com a corrente constante de 4 A constante, o *ripple* observado na corrente do indutor será praticamente desprezível e a parcela alternada será absorvida pelo capacitor de filtro.

## 4.2 Projeto de controle

Para o controle do controlador de carga de bateria serão adotados dois estágios e, portanto, dois controles que se alternam. Em um deles será controlada a tensão da bateria utilizando a modelagem realizada na seção 3.1.3.2. Em seguida validada a estrutura de controle de tensão será projetado o controle de corrente utilizando a modelagem definida na seção 3.1.3.3.

### 4.2.1 Controle de tensão

Para controlar a tensão do *Buck* será utilizado um controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) devido sua robustez e capacidade de eliminar desvio da referência. Além disso, é um dos controladores mais utilizados na indústria pois apresenta bom desempenho e é simples, permitindo os engenheiros aplicarem de forma eficaz e direta (DORF e BISHOP, 2001).

De forma simples, a ação Proporcional é responsável por amplificar o sinal do erro, o que deixa o sistema responder mais rápido. A ação Integral garante que quando o sistema apresentar uma entrada linear, o erro estático é zerado devido ao acréscimo de um polo na sua origem. Já a ação Derivativa funciona de forma preditiva, comparando a variação do erro e antecipando variações para que o sistema responda de forma mais rápida.

De forma simplificada, as etapas que constituem o diagrama de blocos da planta (conversor *Buck*) não compensado são apresentadas pela Figura 25.

Figura 25 - Diagrama de blocos do sistema não compensado.



Onde o KPWM é o ganho necessário para que o valor de referência esteja entre os valores limite inferior e superior do modulador PWM (*Pulse Width Modulation*). Assim como  $G_{planta}(s)$  representa a função de transferência encontrada na equação 42. Substituindo os valores da Tabela 2 na equação 42, é verificada que  $G_{planta}(s)$  é corretamente descrita por:

$$G_{planta}(s) = \frac{2,4 * 10^{10}}{s^2 + 3,03 * 10^4 * s + 2 * 10^9} \quad (46)$$

Para realização do projeto foram estabelecidos os critérios sugeridos por Barbi (2007) de alocação de ambos os zeros na frequência de ressonância do circuito LC de filtro, um polo na origem e um polo na frequência de chaveamento, conforme é verificado na equação 47.

$$G_{controle}(s) = \frac{(s + 4,4721 * 10^4)^2}{s * (s + 5,0265 * 10^5)} \quad (47)$$

Para se encontrar o ganho do controlador ( $K_c$ ), se substitui na função de transferência de malha aberta o  $\omega_c$  (frequência de corte), o ganho do controlador será o valor necessário para que o módulo da função nesta frequência atinja o valor um, conforme equação 48.

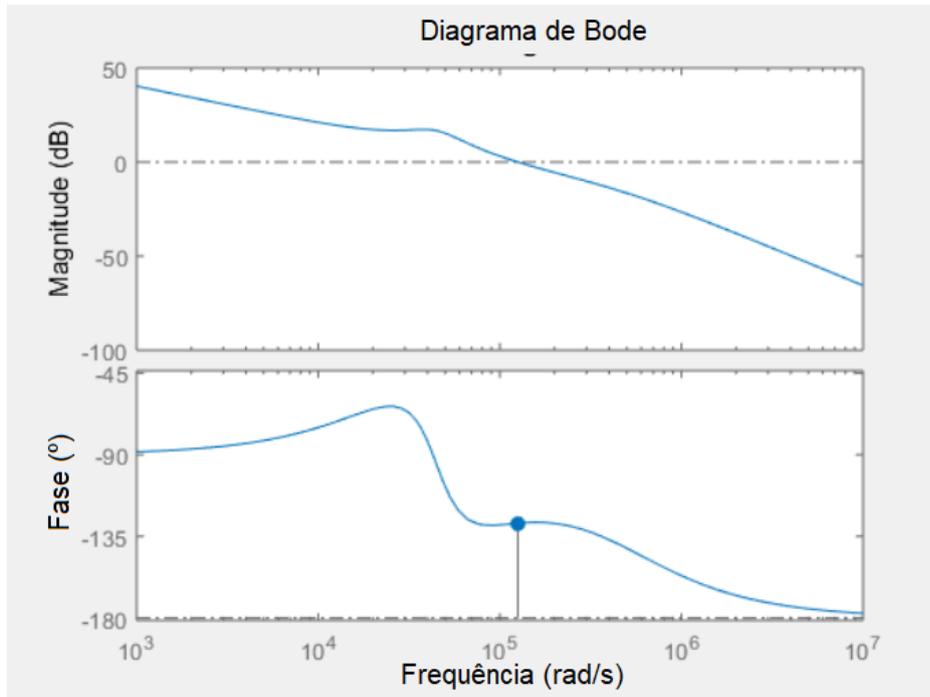
$$1 = |KPWM * K_c * G_{planta}(j\omega_c) * G_{controle}(j\omega_c)| \quad (48)$$

Ao aplicar-se os valores obtidos em 46 e 47 em 48 verifica-se que para a frequência de corte de 20 kHz, referente a um quarto da frequência de chaveamento (BARBI, 2007) o ganho do controlador é:

$$K_c = \frac{1}{|KPWM * G_{planta}(j\omega_c) * G_{controle}(j\omega_c)|} = 2,1818 \quad (49)$$

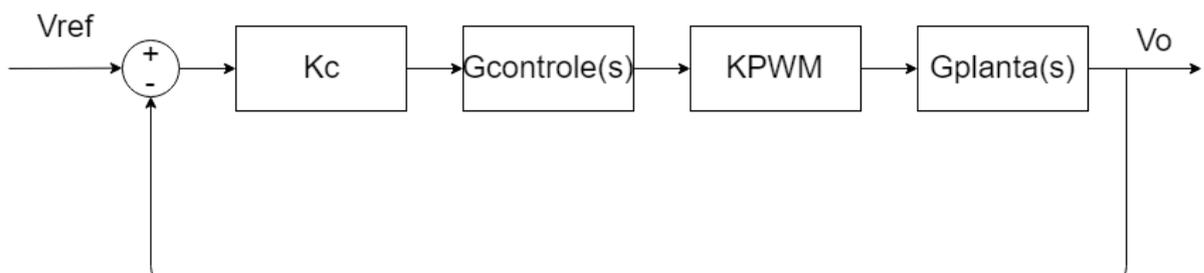
Para verificação do correto projeto, é traçada a resposta da função de transferência em malha aberta, verificada na Figura 26.

**Figura 26 - Resposta em frequência para o sistema compensado.**



Conforme projetado, o sistema está em ganho de 0 dB na frequência de corte definida, apresentando uma margem de fase de  $52,2^\circ$ , que se adequa aos limites definidos por Barbi (2007) entre  $45^\circ$  e  $60^\circ$ . Essa margem de fase garante que o sistema não se instabilize, mas forneça uma resposta rápida a variações, sem sobressinais superiores a 25%. O sistema em malha fechada é corretamente descrito pela Figura 27.

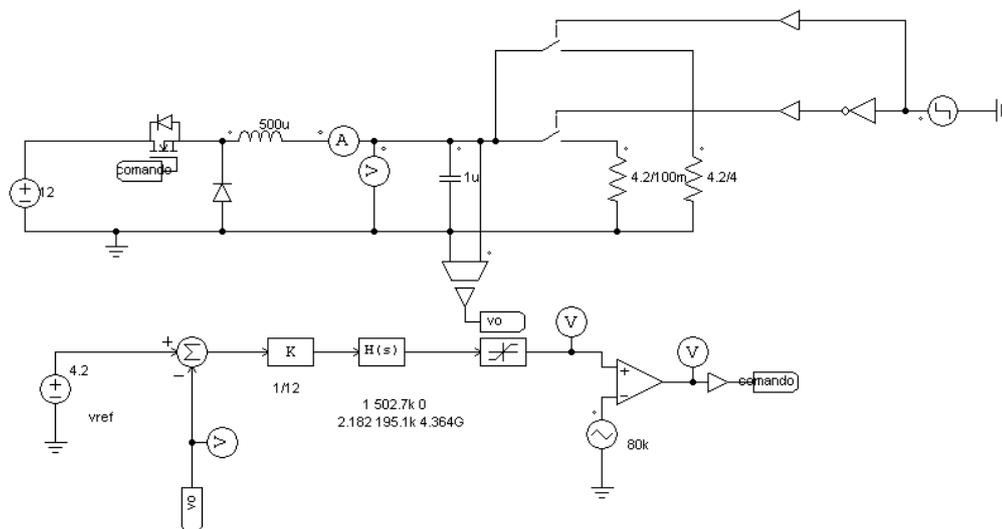
**Figura 27 - Diagrama de blocos do sistema compensado em malha fechada.**



Para validação, é necessário verificar a resposta do circuito a ação do controle, então foi dividida a verificação em quatro cenários. O primeiro cenário

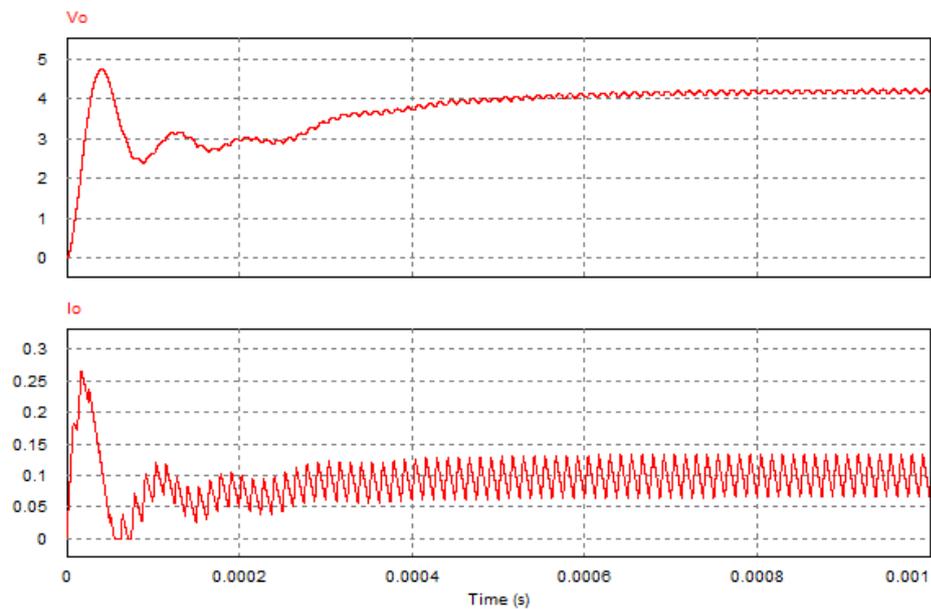
observará a ação de controle do com o sistema partindo do zero, até atingir a tensão de 4,2 V estabelecida na Tabela 2 para uma carga que consome 100 mA. O segundo cenário é com corrente de 4 A. O terceiro cenário será analisado a transição de uma carga de 100 mA para 4 A quando o circuito está em regime permanente e o quarto cenário será realizado o corte de carga de 4 A (100%) para 3 A (75%). Para a validação foi utilizado o *software* PSIM e desenvolvido o modelo da Figura 28.

**Figura 28 - Modelo de simulação *Buck* malha fechada para os quatro cenários.**



Para o primeiro e segundo cenário o período de observação será de 1 ms, serão analisadas as ondas de tensão, corrente e a ação de controle. Para o primeiro cenário se obteve a resposta de tensão de saída ( $V_o$ ) e corrente ( $I_o$ ) apresentadas na Figura 29.

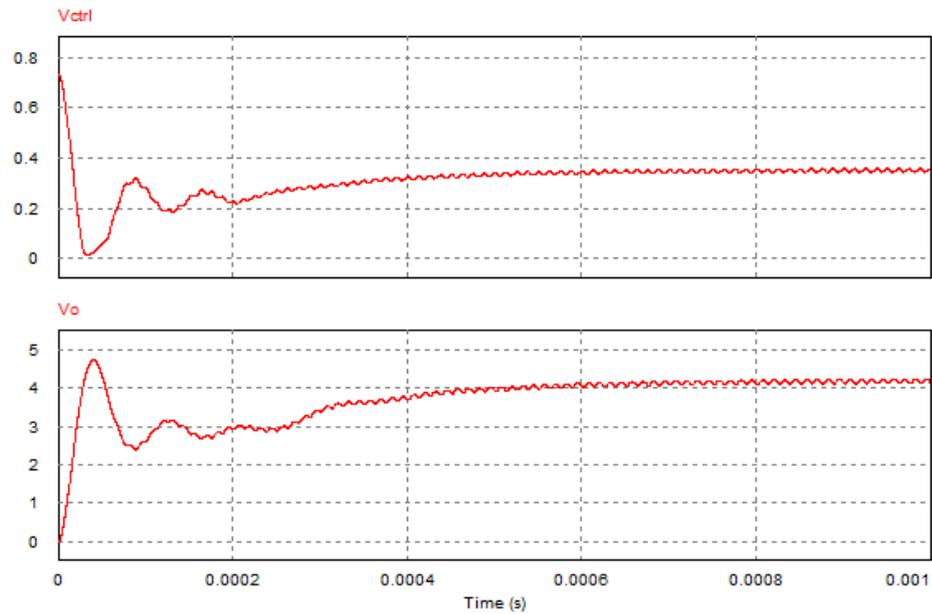
Figura 29 - Resposta a ação de controle tensão de saída  $V_o$  e Corrente de saída  $I_o$ .



O sistema atinge o regime permanente em menos de 1ms, indicando boa resposta em tempo de subida e é verificado que apesar do *ripple* perceptível na corrente, essa não causa a alteração do modo de operação do conversor para o descontínuo. O sobressinal verificado é de 12,6%, contribuindo para a validação das características projetadas.

Para análise do sinal de controle, será apresentada a Figura 30, contemplando o sinal de controle e a tensão de saída encontrada para posterior análise.

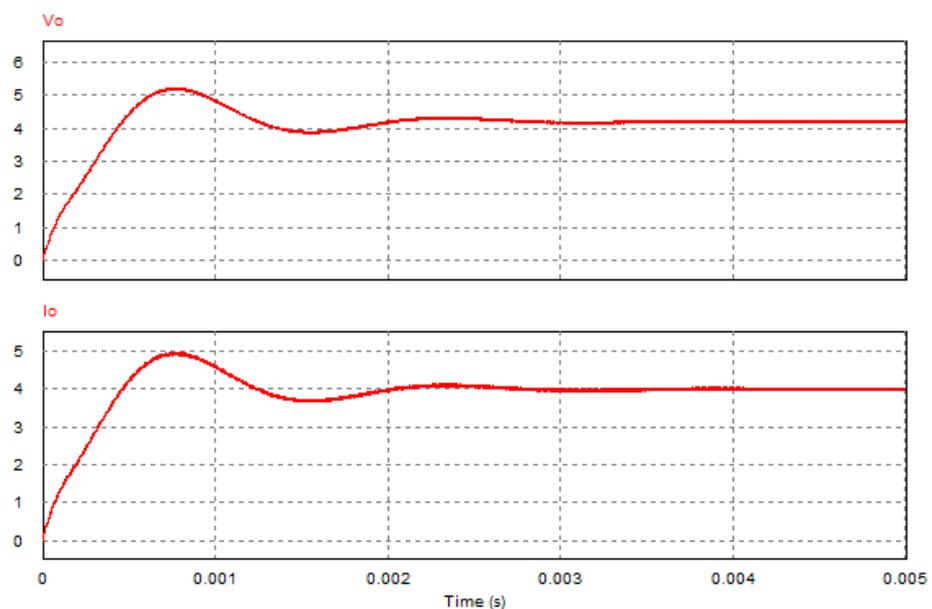
**Figura 30 - Resposta do sinal de controle a entrada em operação do circuito.**



Nota-se que o sinal de controle se encontra entre os limites estabelecidos do modulador (entre 0 e 1) e atua de maneira a manter constante a tensão na saída do conversor.

Será analisado o segundo cenário, onde é verificada a resposta do circuito quando sai do repouso para operação fornecendo 4 A de corrente na saída, durante 5 ms. Encontra-se a resposta de corrente  $I_o$  e tensão  $V_o$  na Figura 31.

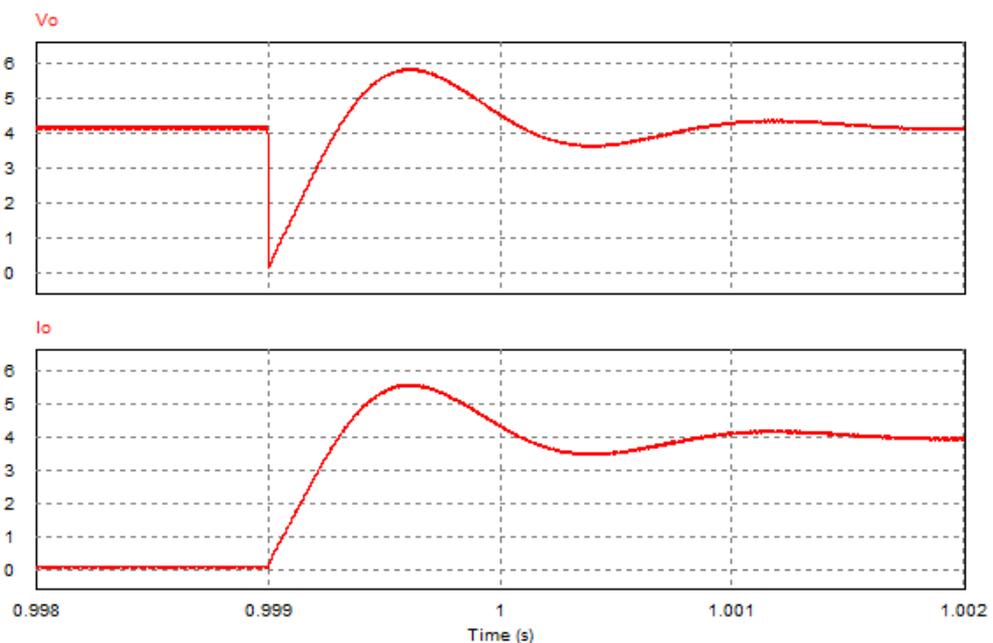
**Figura 31 - Resposta a ação de controle tensão de saída  $V_o$  e Corrente de saída  $I_o$  2º Cenário.**



Para a entrada em operação com o circuito atendendo à uma carga de 4 A, o tempo de acomodação é cerca de três vezes maior, entretanto continua rápido e com baixo sobressinal de 23,8%. Nesta operação o *ripple* de corrente se torna menos perceptível, como era esperado.

O terceiro cenário de análise considerará a subida do patamar de 100 mA para 4 A requeridos pela carga no tempo de 999 ms, com horizonte de análise entre 998 ms e 1,002 s. A resposta de tensão e de corrente são verificadas na Figura 32.

**Figura 32 - Resposta a ação de controle tensão de saída  $V_o$  e Corrente de saída  $I_o$  3º Cenário**



Tem-se que a resposta do circuito é satisfatória para um degrau de carga de quarenta vezes, sem apresentar sobre sinais de valores elevados e reagindo rapidamente para estabilizar a tensão em 4,2 V.

O quarto cenário baseia-se em mostrar a resposta de um decréscimo de carga. Como no *Buck*, reduzir carga significa reduzir a corrente no indutor, quando o decréscimo é superior à 50%, os valores transitórios de tensão induzida apresentam valores elevados podendo ocasionar danos aos elementos semicondutores e à carga.

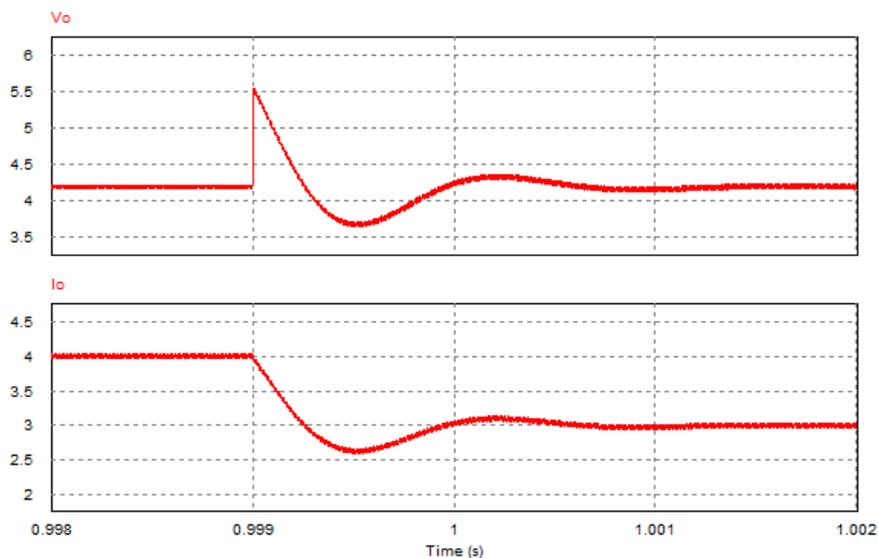
Isso é demonstrado de maneira simples ao observar a equação que descreve a tensão no indutor. Quando é realizada uma grande variação de corrente, em um curto intervalo de tempo a tensão de polaridade inversa a passagem da corrente cresce, supondo uma variação de 4 A, em 1 ms, a tensão seria dada por:

$$V_L = L * d \frac{i(t)}{dt} = 19,5 V \quad (50)$$

Devido a ação de controle ser ainda mais rápida que 1 ms, a sobretensão observada na carga pode chegar a 100 V ou mais.

Desta forma, o estudo é realizado para a redução de 25% de carga, visto que o funcionamento do controlador não prevê variações bruscas na corrente instantaneamente. Para esse cenário a tensão e a corrente se comportam da maneira verificada na Figura 33.

**Figura 33 - Resposta a ação de controle tensão de saída  $V_o$  e Corrente de saída  $I_o$  4º Cenário**



O resultado obtido mostra que o circuito se adapta a mudança proposta e com corte de 25% a sobretensão verificada na saída não ultrapassa 30% e dura menos de 500  $\mu$ s.

Com a validação dos quatro cenários, é validada a ação de controle e, portanto, é prosseguido o estudo determinando o controle de corrente.

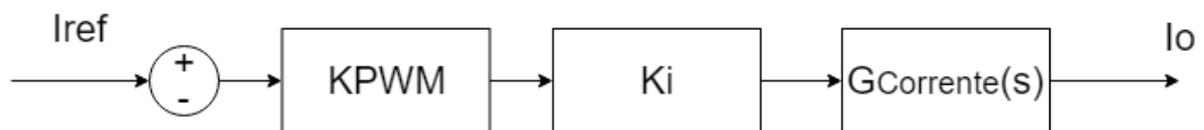
#### 4.2.2 Controle de Corrente

A resposta do modelo de corrente para o conversor *Buck* já é uma resposta estável por natureza, dessa forma, o controle da corrente visa apenas garantir que o conversor fornecerá para a carga a corrente necessária e constante até que a tensão atinja o valor limite para início do seu controle.

Para controlar a corrente será utilizado um controlador do tipo PI (Proporcional e Integral), de maneira a garantir uma resposta mais rápida e sem erro estático.

O controlador PI é composto de um zero em uma frequência a determinar e um polo na origem. Para representar o modelo em diagrama de blocos e garantir a fidelidade é necessário normalizar o valor de corrente com um ganho  $K_i$ , o sistema em malha aberta não compensado é apresentado na Figura 34.

**Figura 34 - Função de transferência em malha aberta.**



Para encontrar a frequência em radianos para o sistema, primeiro é definido a frequência de corte e a margem de fase desejada. Os valores de frequência de corte e margem de fase são encontrados na Tabela 3.

**Tabela 3 - Especificações de Projeto do Controle de Corrente PI.**

$\omega_c(\text{rad/s})$	Margem de fase ( $^\circ$ )
$41,888 \cdot 10^3$	$60^\circ$

O  $G_{\text{corrente}}(s)$  é encontrado quando se aplicam os dados da Tabela 2 na equação 45.

$$G_{\text{corrente}}(s) = \frac{1,2 \cdot 10^{-5} \cdot s + 4,174}{5 \cdot 10^{-10} \cdot s^2 + 0,0001739 \cdot s + 1} \quad (51)$$

O a frequência onde é alocado o zero  $\omega_z$  é encontrada com base na equação, que determina a partir da frequência de corte qual seria o zero necessário para garantir a resposta desejada. Conforme é apresentado na equação 52.

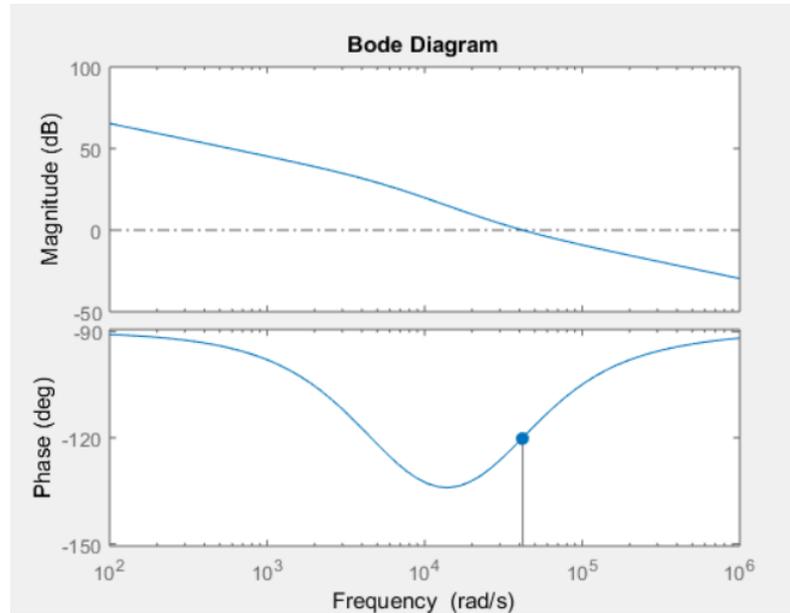
$$\omega_z = \frac{\omega_c}{|\text{margem de fase} - 90^\circ - \angle FTLA(j\omega_c)|} = 32,528 \cdot 10^4 \quad (52)$$

Para encontrar o ganho ( $K_{ci}$ ) que garante que para o sistema resultante a frequência de corte seja a escolhida quando a margem de fase é de  $60^\circ$  é utilizada a equação 53.

$$K_{ci} = \frac{\omega_c}{\sqrt{\omega_c^2 + \omega_z^2} \cdot |FTLA(j\omega_c)|} = 8,2116 \quad (53)$$

Para verificar se o projeto atende aos requisitos é verificada a resposta em frequência da função de transferência em malha aberta para os valores determinados na Figura 35.

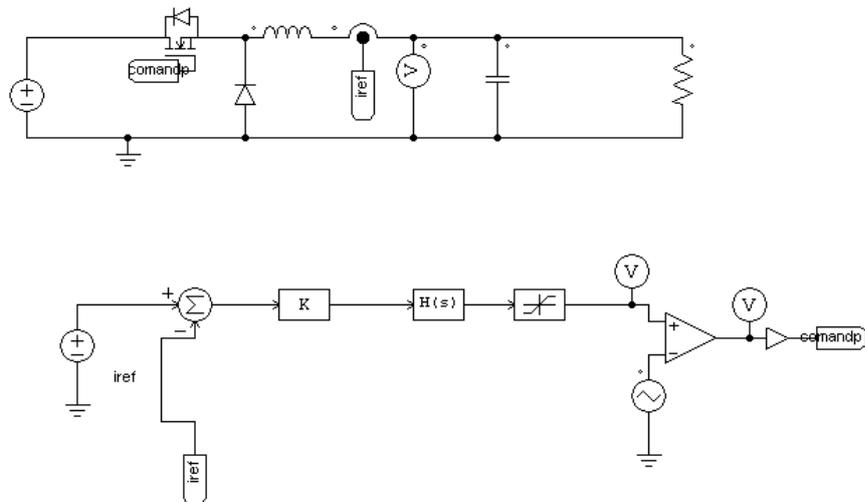
**Figura 35 - Resposta em frequência para o sistema de compensação de corrente projetado.**



Em sequência é necessário validar no circuito se o controle garante a operação desejada. Para isso, serão observados três cenários, o primeiro cenário se refere a partida do sistema para uma corrente de 4 A de referência, o segundo cenário é quando em 999 ms há uma diminuição na referência para 2 A. O terceiro cenário é quando se retorna de 2 A para 4 A.

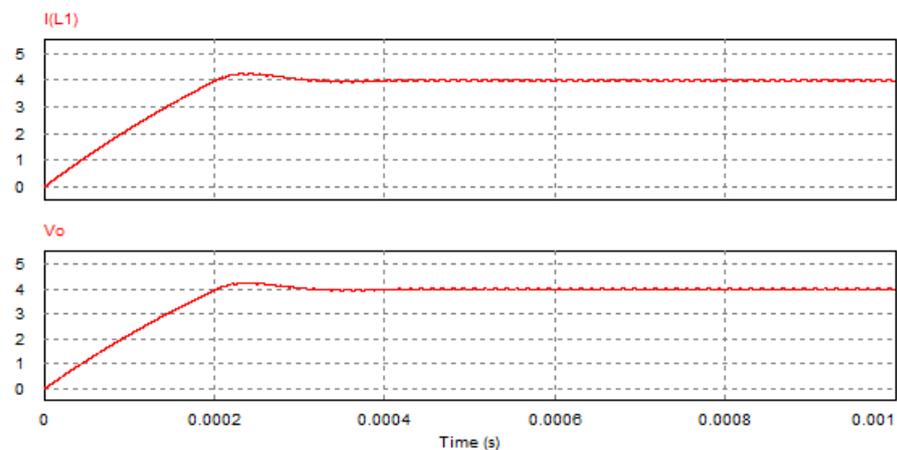
Para realização da simulação foi implementado o modelo da Figura 36 no PSIM.

**Figura 36 - Modelo para validação do controle de corrente.**



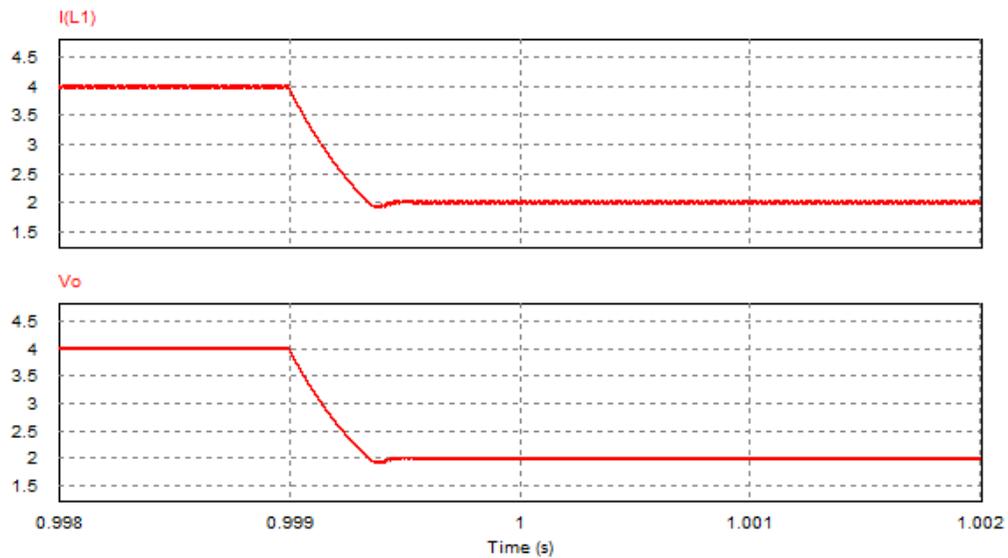
Para o primeiro cenário, analisando dentro de um período de 1 ms depois da operação do circuito até a chegada em 4 A, a corrente ( $I_L$ ) e a tensão ( $V_o$ ) respondem conforme a Figura 37.

**Figura 37 - Resposta a ação de controle corrente de saída  $I_L$  e Tensão de saída  $V_o$  1º Cenário.**



O tempo de adequação do circuito partindo do repouso é de 0,3 ms, resposta rápida e com sobressinal de 6,75%. Em seguida foi verificado para o segundo cenário, no horizonte de observação de 998ms até 1,001s. O resultado para a corrente no indutor e a tensão de saída  $V_o$  são observados na Figura 38.

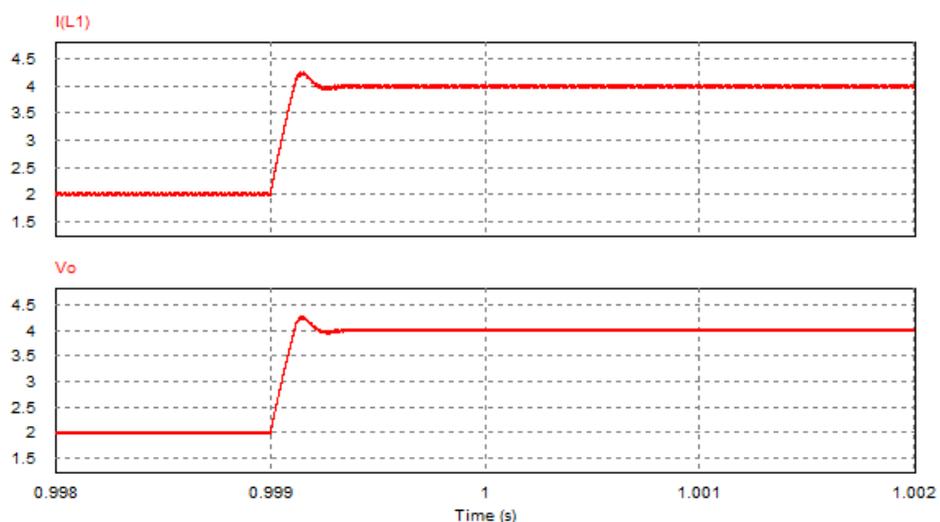
**Figura 38 - Resposta a ação de controle corrente de saída  $I_L$  e Tensão de saída  $V_o$  2º Cenário.**



Para a variação de 2 A na referência da corrente, o circuito se adequa a nova referência em 430  $\mu$ s. Como a variação de corrente no controlador de carga de bateria de Li-Ion apresenta uma variação linear da corrente até essa atingir o valor de corte, o controle é eficaz.

Por fim, foi inserido um acréscimo na corrente de referência do circuito, elevando esta para o patamar de 4 A, os resultados obtidos para corrente e tensão de saída são mostrados na Figura 39.

**Figura 39 - Resposta a ação de controle corrente de saída  $I_L$  e Tensão de saída  $V_o$  3º Cenário.**

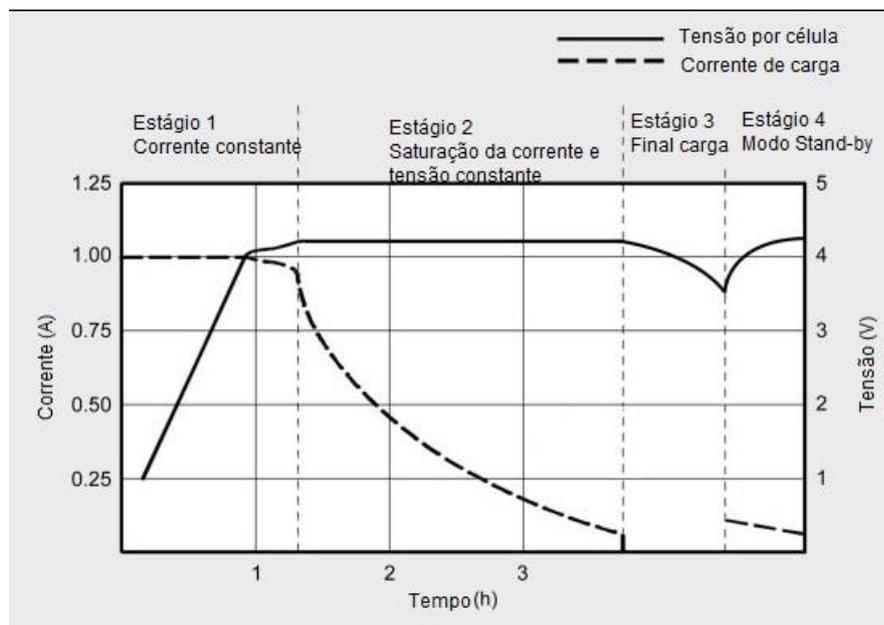


Foi validado o controle de corrente e garante-se que o circuito tem uma rápida resposta e baixo tempo de adequação. Resta juntar as duas estratégias de controle de forma a garantir as etapas de funcionamento descritas pela Figura 8.

#### 4.2.3 Estratégia para o controle de carga de bateria

Nas seções 4.2.1 e 4.2.2 foram apresentadas as malhas de controle para garantir que a tensão e a corrente se mantenham estáveis e obedeçam as características demandadas no projeto. Como abordado na seção 2.2.3.3, as baterias de íons de lítio apresentam a curva da Figura 8, que será repetida aqui para facilitar a compreensão.

**Figura 40 - Curva de Carga bateria de Li-Íon.**



Fonte: (BATTERY UNIVERSITY, 2018) (Adaptado).

Dessa maneira, a estratégia de controle deve prever que durante o primeiro estágio, a corrente seja mantida nos 4 A definidos na Tabela 2, quando a tensão sob a bateria alcançar os 4,2 V e a carga entrar no estágio 2, o controle de tensão deve atuar.

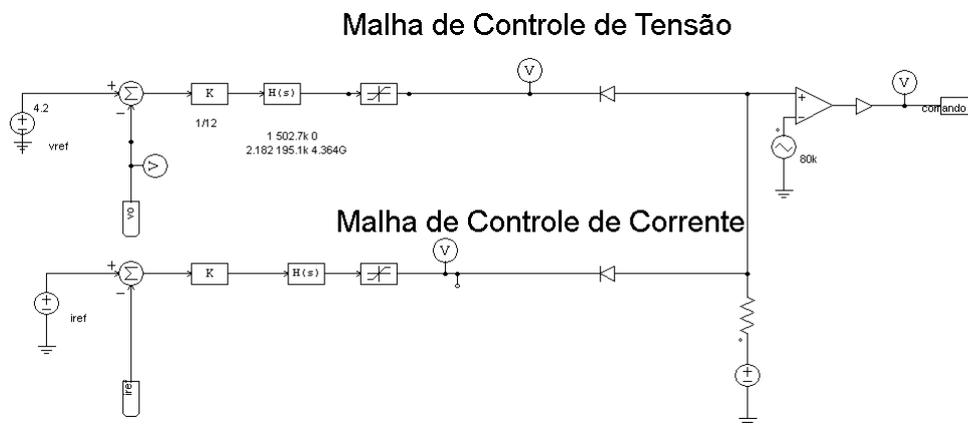
Deseja-se que os dois controles funcionem em momentos distintos, então as malhas não devem influenciar uma na outra, para a definição da lógica de acionamento foi utilizado o critério do comportamento das etapas da Figura 40. A

tensão da bateria no início da carga é inferior a referência e cresce em rampa, já a corrente deve atingir rapidamente a referência.

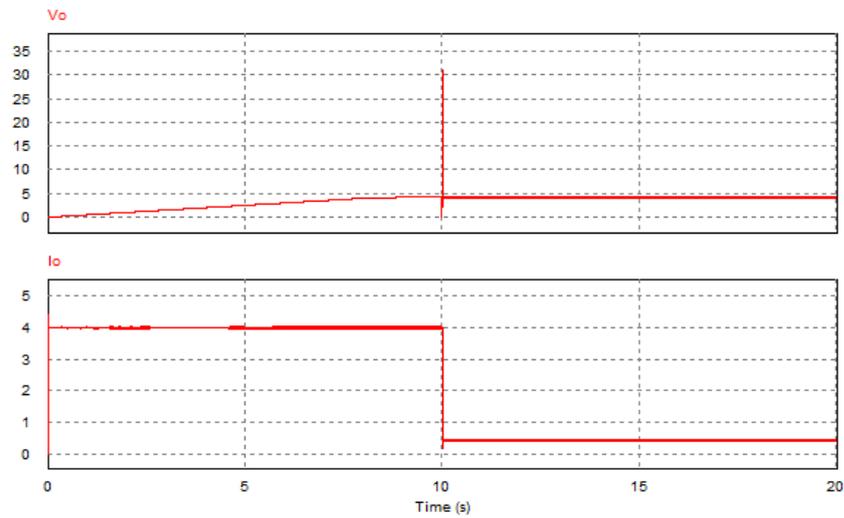
Para a corrente se manter em 4 A, os ajustes na razão cíclica são finos, enquanto no caso da tensão, o controle tentará aplicar o máximo de razão cíclica possível. Da mesma forma, quando a tensão atingir a referência, a razão cíclica para manter ela em 4,2 V sofrerá ajustes finos, ao mesmo tempo que o controle de corrente estará com a referência maior.

De forma simplificada, é desejado que o controle que gera menor variação na razão cíclica e a mantém mais baixa seja acionado, sendo a razão cíclica um sinal de tensão que varia entre 0 V e 1 V, uma forma de bloquear um sinal e acionar o outro é utilizando uma fonte de referência externa em 1 V em série com um resistor de valor elevado e na saída de controle de cada malha inserir um diodo de sinal invertido. Causando a condução apenas do diodo que apresentar maior variação de potencial elétrico sob seus terminais. A lógica implementada está na Figura 41.

**Figura 41 - Lógica para acionamento da chave e controle utilizado.**



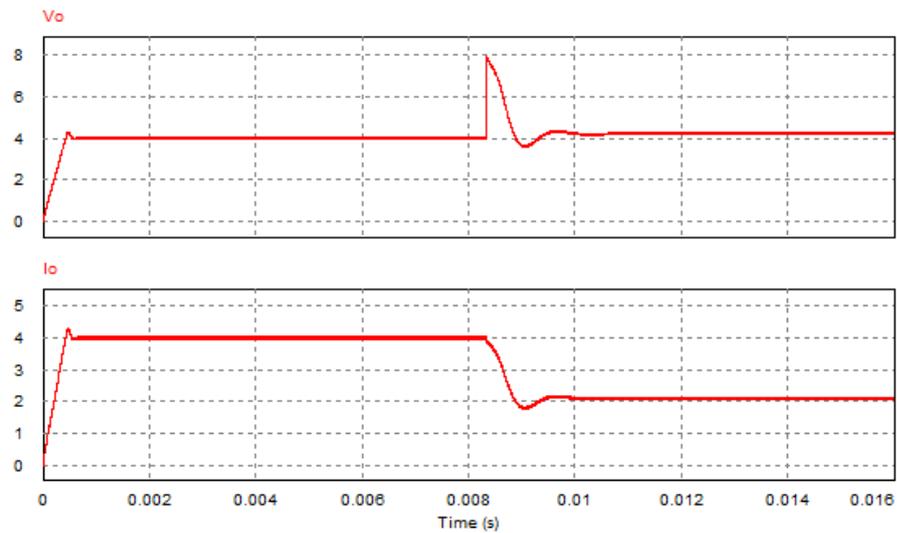
Para validar a estratégia, será inserido como carga um resistor de 1 ohm, em paralelo com uma fonte em rampa, que irá de 0 a 4,2 V ao longo de 20 segundos. Neste horizonte de análise, será validado o controle de corrente atuando. Em sequência, haverá uma comutação para uma carga de 10 ohm, trazendo como consequência uma queda na corrente, porém o controle de tensão atuará e manterá a tensão constante. O resultado obtido para o horizonte de tempo é mostrado na Figura 42.

**Figura 42 - Resultado da estratégia de controle de carga de bateria.**

Note que foi escolhido um intervalo maior apenas para fins didáticos, observando a variação da tensão enquanto a corrente se mantém constante. Outro ponto de destaque é a sobretensão observada no momento da comutação, verifique que houve um corte de dez vezes na carga, o que não aconteceria no cenário real do modelo, garantindo uma transição suave entre estados.

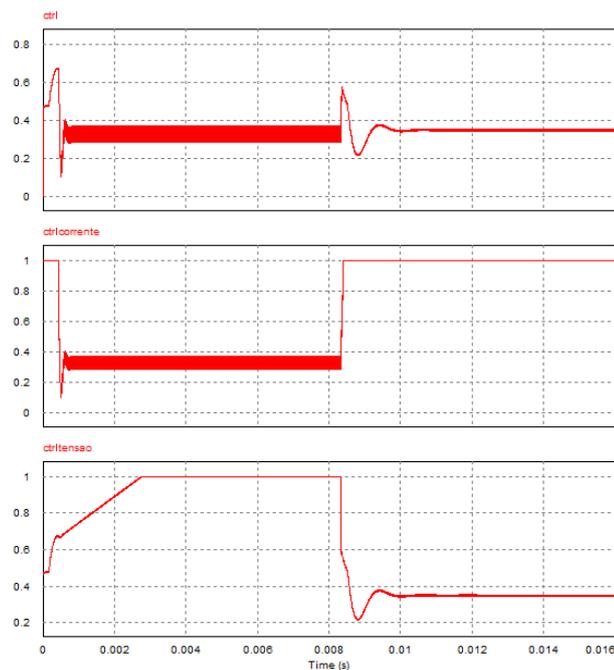
Para maiores análises, a simulação será simplificada para um estado onde o circuito alimenta a carga de 1 ohm que sofre corte de 50%. Isso é suficiente para verificar que o controle de corrente deixará de atuar enquanto quem atua é o controle de tensão. Nesta simulação, é encontrada a resposta para a tensão ( $V_o$ ) e a corrente ( $I_o$ ) da Figura 43.

**Figura 43 - Resposta da tensão e da corrente para corte de 50% de carga evidenciando a atuação dos controles.**



Destaca-se neste período menor de observação, que a resposta do circuito leva a corrente rapidamente para os 4 A da referência e quando há o corte, em função da estratégia demonstrando o comportamento desejado a tensão responde de maneira a manter-se constante. São analisados os sinais de controle da malha de tensão, corrente e o comando real da chave obtidos na simulação e encontrados na Figura 44, no mesmo período de análise.

**Figura 44 - Resposta do Controle de tensão, corrente e de comando.**



É verificado a partir da Figura 44 que por um breve instante, em função do modelo, atua-se o controle de tensão até estabilização da corrente, quando há a troca da malha em atuação. O sinal de comando só volta a ser representado pelo sinal da malha de tensão quando há o corte de carga, evidenciando assim, o funcionamento correto da estratégia.

## 5 CONCLUSÃO

Para o correto projeto do controle de carga de uma bateria é necessário conhecer sobre as características da sua tecnologia, visto que cada uma apresenta especificidades e curvas de cargas diferentes.

A bateria de Li-íon, diferente das demais, tem alta densidade de energia e são ideais para aplicações portáteis e de tamanho reduzido que necessitem de fornecimento de energia maiores. Porém, apresentam restrições físicas ao serem carregadas, não sendo possível aplicar tensões e correntes que excedam a nominal definida pelo fabricante.

Com a revisão sobre a tecnologia realizada, foi possível escolher a estrutura conversora que satisfizesse a curva de carga da bateria. Demonstraram-se os critérios de projeto e funcionamento em modo de condução contínua para o conversor *Buck*. Quando definidas as especificações, ficou evidente a escolha correta do conversor visto a sua facilidade de controle e estabilidade em baixas ou altas correntes.

Por fim, definiram-se as estratégias de controle para tensão e corrente, onde cada estratégia foi validada e analisada individualmente e constatado que uma não deveria interferir na outra, sendo necessário o desenvolvimento de uma lógica de escolha de controle. A lógica foi projetada e ao simular as condições operativas mais próximas as reais foi constatado o funcionamento do controlador de carga, atingindo satisfatoriamente o objetivo do trabalho.

Como sugestão para futuros trabalhos fica a inserção de não idealidades nos componentes do circuito como a resistência ESR do capacitor e a resistência do indutor, que normalmente trariam maior estabilidade ao controle apesar de causarem perdas para o ambiente. Além disso, inserir como variável de instrumentação a

medição de temperatura tanto ao conversor quanto a bateria, cortando o fornecimento de carga em temperaturas elevadas a fim de evitar acidentes. Com essas adições realizadas seria possível implementar o conversor na prática e comparar os resultados obtidos nas simulações com a prática, além da validação do tempo de carga disponibilizado pelo fabricante.

## REFERÊNCIAS

BARBI, I. **Projetos de Fontes Chaveadas**. 2ª. ed. Florianópolis: Edição do Autor, v. 1, 2007.

BATTERY UNIVERSITY. Is Lithium-ion the Ideal Battery? **Battery University**, 201-. Disponível em: <[https://batteryuniversity.com/learn/archive/is\\_lithium\\_ion\\_the\\_ideal\\_battery](https://batteryuniversity.com/learn/archive/is_lithium_ion_the_ideal_battery)>. Acesso em: 20 jun. 2019.

BATTERY UNIVERSITY. Can the Lead-Acid Battery Compete in Modern Times?, 2010? Disponível em: <[https://batteryuniversity.com/learn/archive/can\\_the\\_lead\\_acid\\_battery\\_compete\\_in\\_modern\\_times](https://batteryuniversity.com/learn/archive/can_the_lead_acid_battery_compete_in_modern_times)>. Acesso em: 16 abr. 2019.

BATTERY UNIVERSITY. Charging Lithium-ion. **Battery University**, 2018. Disponível em: <[https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/charging\\_lithium\\_ion\\_batteries](https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/charging_lithium_ion_batteries)>. Acesso em: 15 maio 2019.

BATTERY UNIVERSITY. Charging Nickel Based Batteries. **Battery University**, 2019. Disponível em: <[https://batteryuniversity.com/learn/article/charging\\_nickel\\_based\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/charging_nickel_based_batteries)>. Acesso em: 01 maio 2019.

BATTERY UNIVERSITY. Types of Lithium-ion Batteries. Disponível em: <[https://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion)>. Acesso em: 13 maio 2019.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Modernos**. 8ª edição. ed. [S.l.]: LTC, 2001.

ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. **Fundamentals of Power Electronics**. 2ª. ed. New York: Springer, v. 1, 2001.

KIEHNE, H. A. **Battery Technology Handbook**. 2ª. ed. New York: Marcel Dekker, Inc., v. 1, 2003.

MIT ELECTRIC VEHICLE TEAM. **A Guide to Understanding Battery Specifications**. MIT. [s.L], p. 3. 2008. ([s.n]).

NGUYEN, A. et al. Study on Solar-Powered IoT Node Autonomy. **IEEE**, Porto, 2018. 2.

RONTEK. Conceitos Básicos Sobre Baterias Recarregáveis. **STA**, s.a. Disponível em: <<http://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-recarregaveis-em-geral/conceitos-basicos-sobre-baterias-recarregaveis>>. Acesso em: 01 mar. 2019.

SAAD, M. D. C. **Controlador de Carga e Descarga de Baterias, Microcontrolado com PIC, com Aplicação em Sistemas de Fornecimento de Energia em Geral, Incluindo Fotovoltáicos**. Trabalho de Conclusão de Curso. ed. Rio de Janeiro: PUC Rio, 2012. 53 p. Disponível em: <[http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca\\_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=20880@1](http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=20880@1)>.

SAMSUNG SDI CO., LTD. - ENERGY BUSINESS DIVISION. **Datasheet Samsung Lithium-Ion rechargeable cell for power tools (INR18650-25R)**. [S.l.], p. 17. 2014.

TERRA. Com um celular por habitante, cresce a demanda por carregador de celular portátil. **Terra**, setembro 2017. Disponível em: <<https://www.terra.com.br/noticias/dino/com-um-celular-por-habitante-cresce-demanda-por-carregador-de-celular-portatil,945391cf73699e6384c9527a34022ff6tqcjj08j.html>>. Acesso em: 20 jun. 2019.