

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS – *CAMPUS* IPATINGA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Igor Ferreira Lopes

**ESTUDO DE UM CONVERSOR CC – CC PARA CARGA DE BATERIA
ESTACIONÁRIA POR ALTERNADOR DE VEÍCULO**

Ipatinga
2025

IGOR FERREIRA LOPES

**ESTUDO DE UM CONVERSOR CC – CC PARA CARGA DE BATERIA
ESTACIONÁRIA POR ALTERNADOR DE VEÍCULO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso Bacharelado em Engenharia Elétrica do
Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus*
Ipatinga para obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Willian Marlon Ferreira

Ipatinga
2025

L864e Lopes, Igor Ferreira.

Estudo de um conversor CC – CC para carga de bateria estacionária por alternador de veículo. Igor Ferreira Lopes. – 2025.

77f.;il.

Orientador: Willian Marlon Ferreira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus Ipatinga*, 2025.

1. Bateria estacionária. 2. Simulação computacional. 3. Bateria. I. Ferreira, Willian Marlon. II. Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus Ipatinga*. III. Título.

CDD 621.31242

Catálogo: Rejane Valéria Santos - CRB-6/2907



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Avançado Ipatinga
Rua Maria Silva, n.º 125, Veneza - Ipatinga - MG - CEP 35.164-261
(31) 3829-8615 / (31) 97133-4399 - gabinete.ipatinga@ifmg.edu.br

ANEXO III

ATA DA DEFESA DO TCC

Aos 16 dias do mês de dezembro de 2025, às 13h30 horas, na sala 203 do IFMG Campus Avançado Ipatinga, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) pelo(a)/pelos(as) aluno(a)/alunos(as), sendo aprovado com a nota 77 pela Banca Examinadora, que está condicionada ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa do TCC.

O(A)/Os(As) aluno(a)/alunos(as) deverá(ão) apresentar o trabalho com as devidas modificações e no formato solicitado em 05 de janeiro de 2026.

O(A)/Os(As) aluno(a)/alunos(as) está(ão) ciente(s) de que, caso não cumpra(m) os procedimentos pós-defesa de TCC até a data estipulada, sua(s) nota(s) será(ão) considerada(s) zero e a sua defesa será anulada. Também está(ão) ciente(s) de que o trabalho de conclusão de seu curso poderá ser divulgado pela instituição através dos seus meios de comunicação.

Observações pertinentes à defesa:

As alterações serão enviadas por e-mail e o
aluno enviará as devidas correções.

NOME COMPLETO E ASSINATURA DOS COMPONENTES
DA BANCA E DO DISCENTE ORIENTADO

Orientador:	<u>William Marlon Ferreira</u>	Assinatura:	<u>Wili</u>
Membro:	<u>Felipe Antunes</u>	Assinatura:	<u>Felipe Antunes</u>
Membro:	<u>Oseias de Paula Ferreira</u>	Assinatura:	<u>Oseias</u>
Aluno(a):	<u>IGOR FERREIRA LOPES</u>	Assinatura:	<u>Igor F. Lopes</u>
Aluno(a):	_____	Assinatura:	_____

Dedico este trabalho de conclusão de curso primeiramente a Deus, e também aos meus amados pais, Armando e Giselle, maiores incentivadores e fontes inesgotáveis de apoio, amor e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder força, saúde e sabedoria para chegar até aqui, me guiando e me dando coragem para continuar mesmo diante de todos os desafios.

Agradeço aos meus pais, que fizeram o possível e o impossível para que eu chegasse onde eu cheguei, mesmo com todas as dificuldades. Agradeço pelo apoio constante, principalmente nos momentos que eu mais precisei, me dando suporte para superar todas as adversidades e dificuldades com humildade e coragem.

Ao meu orientador Willian Marlon Ferreira, agradeço o todo o apoio, paciência e dedicação durante a elaboração deste trabalho. Sua orientação foi fundamental para o meu crescimento profissional e para que este trabalho acontecesse. Foi um processo desafiador, mas por fim, muito gratificante.

A todos os professores, minha sincera admiração e respeito. Agradeço por transmitirem conhecimento com tanta excelência e paixão pela profissão. Com ensinamentos tanto técnicos quanto pessoais que levarei para toda a vida.

Aos meus colegas de classe, que se tornaram verdadeiros amigos. Agradeço a todo conhecimento que pudemos compartilhar uns com os outros, além de todos os anos de convivência, superações e muitas risadas.

A elaboração desse trabalho representa o fim de mais um ciclo, e gostaria de expressar meu sentimento de gratidão, a todos que contribuíram de alguma forma para que este trabalho seja realizado. Difícil descrever em palavras o quanto eu sou realmente grato por tudo.

“Feliz o homem que persevera na sabedoria, que se exercita na prática da justiça, e que, em seu coração, pensa no olhar de Deus que tudo vê.”

Eclesiástico 14,22

RESUMO

Este trabalho compreende no desenvolvimento de um conversor CC-CC para que as baterias estacionárias de veículos de recreação possam ser carregadas de forma controlada, com a finalidade de aumentar a vida útil e evitar custos excessivos com manutenção dos acumuladores por um mau carregamento. O sistema proposto é composto por um conversor CC-CC Buck/Boost não inversor que controle os sinais de entrada provenientes do alternador do veículo e gere na saída sinais controlados para carregar a bateria estacionária de forma eficaz, podendo atuar tanto no modo buck quanto boost, intercalando de acordo com a tensão recebida pelo conversor. A fim de avaliar os modelos obtidos, são apresentadas as funções de transferência de ambos os modos de operação do conversor e, empregando técnicas de controle, é realizado o projeto em malha fechada para que possa ser atendido aos processos de carga da bateria garantindo a potência solicitada na saída e garantindo o aumento de vida útil das baterias, uma vez que o projeto do conversor junto ao sistema de controle garante uma ondulação suportada pelas fabricantes para o carregamento dos acumuladores. Os cálculos necessários para a elaboração do projeto do conversor e dos sistemas de controle empregados foram realizados através do software MATLAB. Concluindo, com os resultados obtidos e analisados através das simulações, os resultados são apresentados.

Palavras-chave: Conversor CC-CC. Bateria Estacionária. Sistema de controle. Simulação computacional.

ABSTRACT

This work involves the development of a DC-DC converter designed to allow the stationary batteries of recreational vehicles to be charged in a controlled manner, with the aim of increasing their lifespan and avoiding excessive maintenance costs due to improper charging. The proposed system consists of a Buck/Boost DC-DC non inverter converter that regulates the input signals coming from the vehicle's alternator and generates controlled output signals to effectively charge the stationary battery. The converter can operate in both buck and boost modes, switching between them according to the input voltage received. To evaluate the obtained models, the transfer functions of both operating modes of the converter are presented. Using control techniques, a closed-loop design is implemented to ensure the proper charging process of the battery, delivering the required output power and extending the batteries' lifespan, since the converter and control system design maintain the ripple levels within the limits specified by manufacturers for safe charging. The calculations required for the design of the converter and its control systems were performed using MATLAB software. Finally, the results obtained and analyzed through simulations are presented.

Keywords: DC-DC Converter. Stationary Battery. Control System. Computational Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Expo Motorhome 2024	13
Figura 2 - Esquema conceitual do sistema elétrico dos veículos de recreação	17
Figura 3 - Componentes de uma célula	18
Figura 4 - Processo de descarga	19
Figura 5 - Processo de carga.....	19
Figura 6 - Componentes básicos de uma bateria chumbo-ácido	20
Figura 7 - Corrente de carga em função do tempo	22
Figura 8 - Tensão de carga em função do tempo.....	23
Figura 9 - Curvas de carregamento CCCV.....	23
Figura 10 - Processo eletroquímico das baterias de íons de lítio.....	24
Figura 11 - Curva da tensão de circuito aberto.....	27
Figura 12 - Vida útil x Resistência interna da bateria	28
Figura 13 - Partes construtivas do alternador	30
Figura 14 - Diagrama de ligações do Relé sensível à tensão.....	32
Figura 15 - Relé sensível à tensão (VSR).....	32
Figura 16 - Conversor CC-CC básico e forma de onda da tensão de saída.....	33
Figura 17 - Conversor CC-CC buck.....	34
Figura 18 - Operação em chave fechada	35
Figura 19 - Operação em chave aberta	35
Figura 20 - Formas de onda do conversor CC-CC buck	37
Figura 21 - Conversor CC-CC boost	38
Figura 22 - Conversor boost em chave fechada	39
Figura 23 - Conversor boost em chave aberta	39
Figura 24 - Formas de onda do conversor CC-CC boost	41
Figura 25 - Conversor CC-CC buck-boost.....	42
Figura 26 - Conversor buck-boost em chave fechada	42
Figura 27 - Conversor buck-boost em chave aberta	43
Figura 28 - Formas de onda do conversor CC-CC buck-boost	44
Figura 29 - Conversor CC-CC <i>Fly-back</i>	45
Figura 30 - Formas de onda conversor CC-CC <i>Fly-back</i>	46
Figura 31 - Conversor CC-CC <i>Forward</i>	47
Figura 32 - Formas de onda do conversor CC-CC <i>Forward</i>	48

Figura 33 - Conversor CC-CC <i>push-pull</i>	49
Figura 34 - Conversor <i>buck-boost</i> modificado	51
Figura 35 - Implementação do modo <i>Buck</i>	51
Figura 36 - Implementação do modo <i>Boost</i>	52
Figura 37 - Circuito conversor CC-CC <i>buck-boost</i> não inversor simulado	56
Figura 38 - Fluxograma de operação do conversor	57
Figura 39 - Diagrama de blocos do controle do conversor CC-CC.....	58
Figura 40 - Malhas de controle do conversor	60
Figura 41 - Controle de chaveamento do conversor CC-CC.....	61
Figura 42 - Simulação (Etapa Buck)	62
Figura 43 - Simulação (Etapa Boost)	63
Figura 44 - Alternância de modos do conversor.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações de projeto	55
Tabela 2 - Funções de Transferência $i_L(s)/D(s)$	58
Tabela 3 - Funções de Transferência $V_o(s)/i_L(s)$	59
Tabela 4 - Ganhos do conversor	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Problema e justificativa.....	14
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo geral.....	14
1.2.2	Objetivos específicos.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	Sistemas elétricos de veículos de recreação	16
2.2	Estrutura e operação das baterias.....	17
2.2.1	Baterias de chumbo-ácido.....	20
2.2.1.1	Carregamento de baterias chumbo-ácido	21
2.2.2	Bateria de Íons de Lítio	24
2.2.3	Bateria de níquel-cádmio	25
2.2.4	Bateria de níquel-hidretos metálicos	25
2.3	Parâmetros característicos de baterias	26
2.4	Funcionamento do alternador	29
2.4.1	Partes construtivas do alternador	29
2.4.2	Carregamento das baterias através do alternador	30
2.4.3	Utilização do VSR.....	31
2.4.4	Utilização do conversor CC-CC	33
2.5	Topologias dos conversores CC-CC	33
2.5.1	Conversor CC-CC Buck	34
2.5.2	Conversor CC-CC Boost.....	38
2.5.3	Conversor CC-CC Buck-Boost.....	41
2.5.4	Conversor CC-CC Fly-back	45
2.5.5	Conversor CC-CC Forward	47
2.5.6	Conversor CC-CC push-pull	49
3	METODOLOGIA E IMPLEMENTAÇÃO	50
3.1	Conversor buck-boost não inversor	50
3.1.1	Implementação do conversor Buck.....	51
3.1.2	Implementação do conversor Boost.....	52
3.1.3	Cálculo do indutor	53
3.1.4	Cálculo do capacitor.....	53

3.2	Considerações finais.....	54
4	RESULTADOS	55
4.1	Especificações do projeto	55
4.1.1	<i>Controle do conversor CC-CC</i>	<i>58</i>
4.1.2	<i>Simulação do conversor CC-CC buck/boost não inversor.....</i>	<i>61</i>
5	CONCLUSÃO	66
5.1	Trabalhos Futuros	66
	REFERÊNCIAS.....	68
	APÊNDICE A – Código da realização dos cálculos dos componentes de projeto	73
	APÊNDICE B – Código referente aos cálculos dos ganhos do sistema de controle do conversor buck/boost.....	74
	APÊNDICE C – Código referente AO BLOCO MATLAB FUNCTION do sistema de controle do conversor buck/boost	76

1 INTRODUÇÃO

A liberdade de viver e trabalhar de onde quiser tem se tornado um atrativo para diversas pessoas ao redor do mundo. Atualmente o trabalho remoto é realidade para muitos, e isso acaba por intensificar o desejo que muitas pessoas têm de viajar, sem deixar de lado o trabalho. Visto isso, o mercado de motorhomes tem se intensificado no mundo, sobretudo no Brasil.

Segundo a PressWorks (2025), a organização Expo Motorhome, o seguimento de caravanismo e campismo movimentou no ano de 2023 cerca de R\$ 1,5 bilhão, registrando cerca de 30% de crescimento em relação a 2022 no mercado de caravanismo no país. Além disso, diversos fatores acabam por influenciar esse aumento, a pandemia do COVID-19 fomentou este aumento pela procura de um turismo independente, mantendo-se crescente a busca por esse tipo de programação mesmo após a pandemia. Na Figura 1 é mostrada a Expo Motorhome de 2024.

Figura 1 - Expo Motorhome 2024



Fonte: Prefeitura de Pinhais, 2024.

Entretanto, o setor ainda conta com muitos desafios. O custo elevado dos veículos e a dificuldade para encontrar mão de obra especializada para manutenção de equipamentos são alguns fatores que são levados em consideração na hora de buscar este tipo de turismo.

Dessa forma, a busca por tecnologias nacionais e mais acessíveis ao público para fomentar ainda mais o crescimento do setor de caravanismo no Brasil se faz cada vez mais necessária.

1.1 Problema e justificativa

Nos veículos de recreação, diferente dos veículos convencionais, para armazenamento de energia elétrica o motorhome é composto por dois tipos de baterias, as de arranque e as estacionárias, sendo a primeira responsável por ligar o veículo gerando energia para ligar o motor inicialmente, e a segunda responsável por fornecer energia elétrica para os componentes elétricos presentes no veículo, como tomadas, geladeira, ar condicionado e demais utensílios necessários em um veículo de expedição.

Caso as baterias estacionárias sejam recarregadas diretamente da energia gerada no alternador do veículo, problemas podem ser apresentados, uma vez que os alternadores podem gerar picos de corrente e tensão, além de não fornecer uma tensão não controlada para a bateria. Dessa forma, a utilização de um controlador de carga seria importante para limitar as tensões e correntes provenientes do alternador para que o mesmo carregue a bateria estacionária da forma mais eficiente possível, evitando complicações e a necessidade de trocar os acumuladores mais cedo do que o esperado.

Entretanto, atualmente há poucas fabricantes nacionais que produzam esses controladores com custos acessíveis para o cliente, sendo necessária a importação desses equipamentos. Isso dificulta sua obtenção, manutenção e reposição, uma vez que os controladores são provenientes de outros países, além de implicar elevado custo de importação. Esse cenário poderia ser mitigado com o desenvolvimento de um conversor CC–CC eficiente e financeiramente viável em território nacional, contribuindo para o crescimento do caravanismo no país.

1.2 Objetivos

Abaixo são apresentados os objetivos gerais e específicos do trabalho a ser desenvolvido.

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um conversor CC–CC para o carregamento da bateria estacionária de veículos recreativos através de seu alternador, de baixo custo e com objetivo de reduzir custos de manutenção dos acumuladores através do correto carregamento e aumento da vida útil.

1.2.2 Objetivos específicos

- Seleção da topologia do conversor CC – CC adequado;
- Desenvolvimento do projeto do conversor;
- Elaboração do diagrama de blocos do Software de funcionamento do conversor.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será introduzida a fundamentação teórica necessária para a elaboração do projeto, apresentando estudos referentes aos sistemas elétricos que compõem um veículo de recreação, estudo dos diferentes tipos de baterias, além dos conversores que podem ser utilizados para o desenvolvimento.

2.1 Sistemas elétricos de veículos de recreação

O conceito principal de um veículo de recreação é a independência e a liberdade. Portanto, o sistema elétrico precisa ser pensado deste modo. Os veículos recreativos utilizam um sistema de rede elétrica entre 12V/24V, sendo este o mesmo padrão nos automóveis, assim facilitando sua integração, com o sistema de baterias comumente alimentado pelo próprio motor ou de redes externas (ELBER AUTOMOTIVE, 2022).

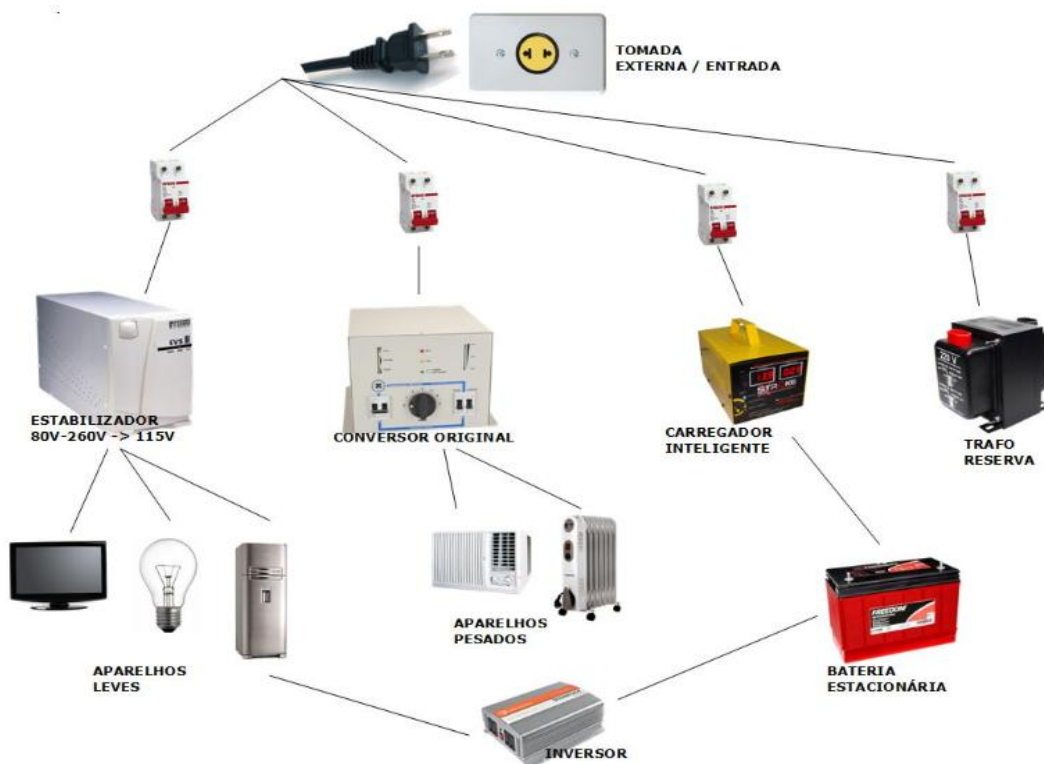
Ainda assim, pelo fato do motorhome ser um veículo recreativo utilizado com frequência em acampamento ou até como moradia temporária, é necessário que tenham outras conveniências além de um espaço para comer e dormir. Para o conforto dos donos, são adquiridos equipamentos como condicionadores de ar, equipamentos de entretenimento e quaisquer equipamentos que se tem em casa (PALHARES, 2002). A Figura 2 apresenta a composição mais comum de equipamentos elétricos presentes nos veículos de recreação.

Ademais, Pivari (2000) afirma que os sistemas elétricos dos mesmos são diferentes em cada caso, e define uma ideia-conceito da formação do sistema elétrico de um trailer ou motorhome, independente dos aspectos de modelo, ano e fabricante do veículo:

- a) um estabilizador automático full range para cargas baixas, como iluminação e equipamentos de TV;
- b) um conversor original para suportar cargas mais altas e equipamentos motorizados desde que sua potência seja suficiente para tal aplicação;
- c) um transformador 127/220V, utilizado para ajustar a tensão para que seja compatível com os aparelhos, além de ser utilizada para regular a tensão em caso de baixa voltagem, caso a tensão de entrada esteja abaixo da tensão suportada pelo estabilizador, é possível utilizar o transformador para elevar a tensão de entrada que chega no equipamento;
- d) um carregador inteligente, que faz o papel de regular a corrente para o valor necessário para carregar a bateria estacionária do veículo de forma eficiente;

- e) uma bateria estacionária, que funciona em sistema de “nobreak”, utilizada para energizar os equipamentos do veículo de recreação quando não está conectado à uma tomada externa;
- f) um inversor, que é utilizado para transformar a tensão da bateria estacionária (12V) na tensão necessária para alimentar os equipamentos do motorhome ou do trailer, em 127/220V

Figura 2 - Esquema conceitual do sistema elétrico dos veículos de recreação



Fonte: Pivari, 2000.

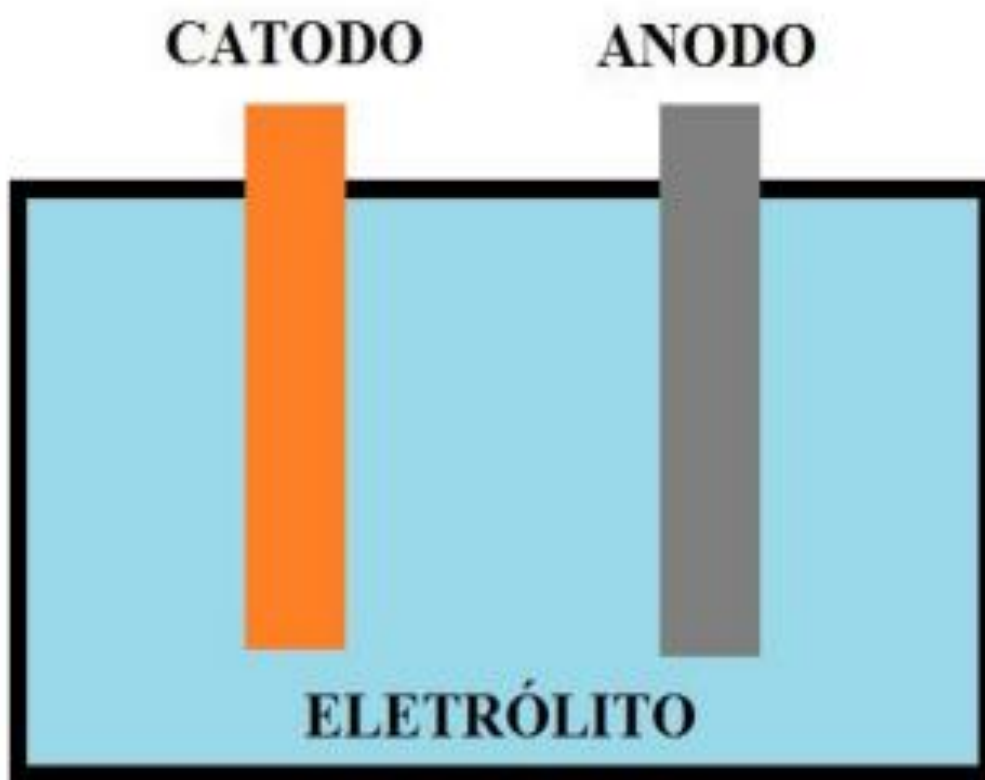
2.2 Estrutura e operação das baterias

As baterias são dispositivos eletroquímicos que convertem energia química em energia elétrica através dos processos de oxidação e redução. Estes processos ocorrem com a circulação de elétrons do material oxidante para o material redutor. Para as baterias recarregáveis, o processo ocorre com a inversão deste sistema (MICHELINI, 2017).

Importante ressaltar que embora o termo “bateria” seja muito comum, a unidade em que ocorre o processo eletroquímico é chamado de “célula”. Além disso, uma bateria é também referenciada como “acumulador”. Uma bateria é um componente que constitui uma ou mais células, em série, paralelo ou ambos, de acordo com a tensão e capacidade dos dispositivos.

Cada célula presente nas baterias é constituída por três componentes: anodo, catodo e eletrólito. Em que o anodo é o elemento responsável por fornecer elétrons para o meio, o catodo por receber os mesmos, e o eletrólito fornece o meio para que ocorra esta transferência de carga (MICHELINI, 2017). A Figura 3 apresenta os componentes básicos de uma célula e como são organizados nos acumuladores.

Figura 3 - Componentes de uma célula



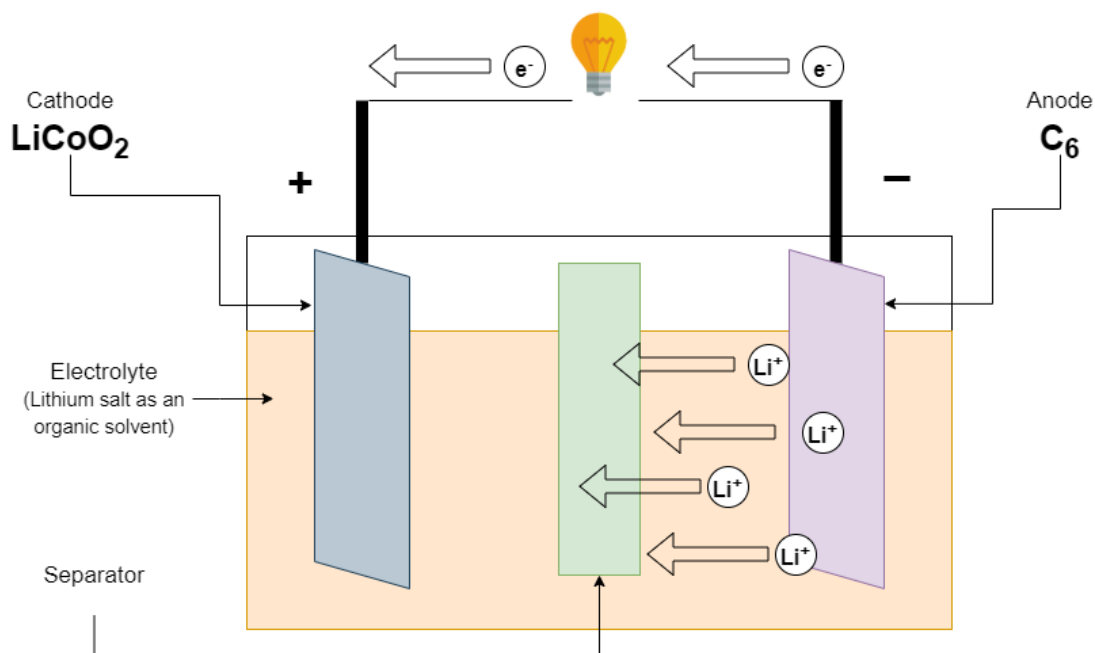
Fonte: Rontek, 2017.

Quando uma carga é conectada nesta célula, ocorre o processo de descarga do componente, uma reação de oxidação no anodo. Em que fluem elétrons do anodo para a carga, e da carga para o catodo, de forma que a carga consuma a energia fornecida pela célula.

De outra forma, para a carga da bateria, quando o acumulador é conectado a uma fonte, o processo contrário ocorre com o fluxo de elétrons, indo desta vez do anodo para a fonte, e da fonte para o catodo.

O circuito elétrico é completo através do eletrólito, responsável pelo transporte de ânions (íons negativos) para o anodo e cátions (íons positivos) para o catodo (LINDEN, 2002). A Figura 4 apresenta o fluxo de elétrons durante o processo de descarga do acumulador de Íons de Lítio.

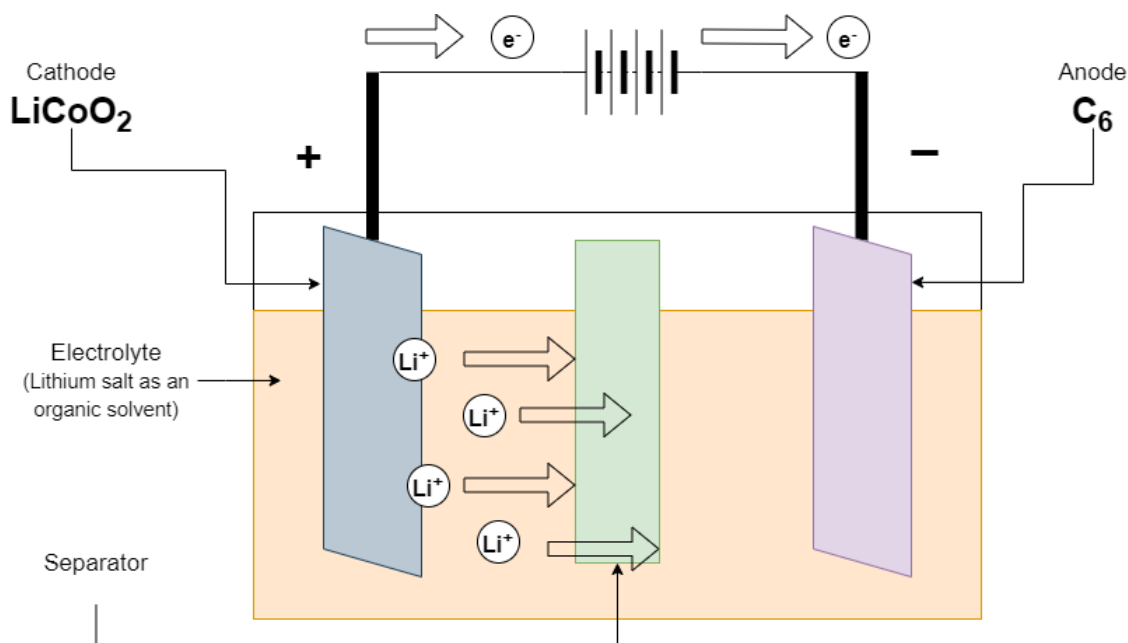
Figura 4 - Processo de descarga



Fonte: Compraco, [2024].

Ademais, durante o carregamento destas células a corrente flui reversamente e a oxidação que antes acontecia no eletrodo negativo, ocorre no eletrodo positivo. Já a redução nesta etapa ocorre no eletrodo negativo (LINDEN, 2002). A Figura 5 apresenta o fluxo de elétrons durante o processo de carga dos acumuladores de Íons de Lítio.

Figura 5 - Processo de carga



Fonte: Compraco, [2024].

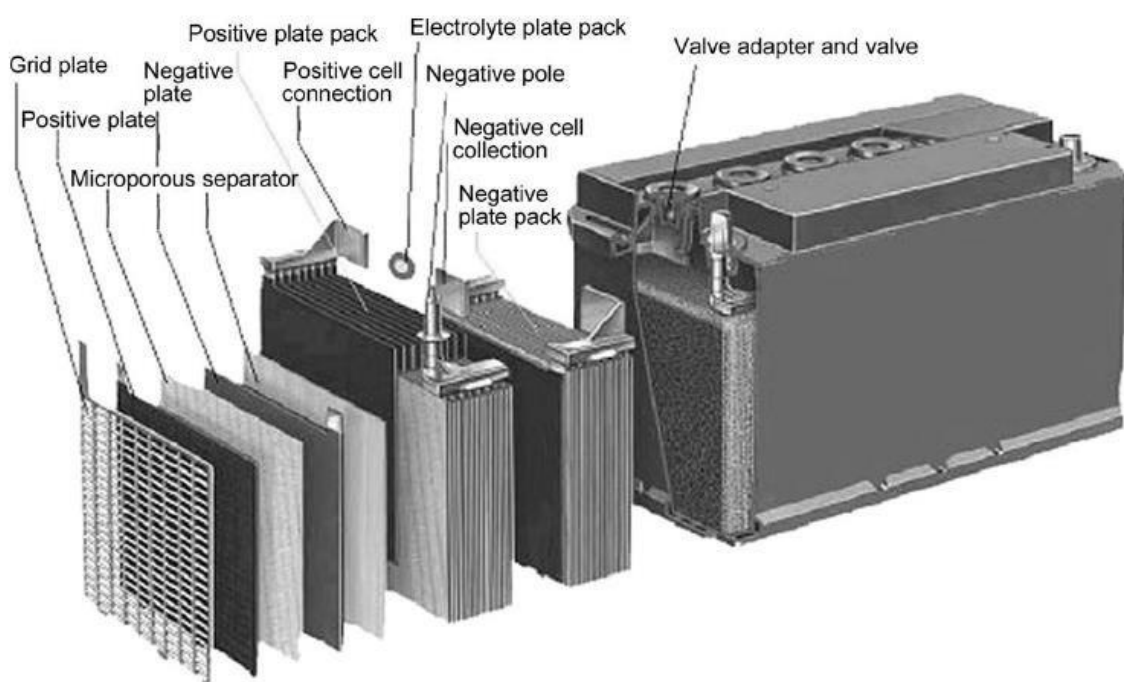
Este processo de carga e descarga ocorre de forma diferente de acordo com o tipo da bateria, os materiais utilizados e a capacidade das mesmas.

2.2.1 Baterias de chumbo-ácido

As baterias de chumbo-ácido são principalmente aplicadas em sistemas automotivos, não só para alimentação dos motores e demais componentes veiculares, mas também para sistemas auxiliares presente nos veículos (PINTO et al., 2017). Com isso, estas baterias podem ser divididas em quatro grandes classificações: baterias de arranque, baterias tracionárias, baterias estacionárias e baterias VRLA.

As baterias de arranque, também chamadas de baterias automotivas, são responsáveis pelo fornecimento de energia para o motor e para o sistema elétrico do veículo quando o motor não está operando. A bateria de arranque é recarregada a partir do alternador do veículo. Entretanto, a bateria VRLA é uma versão melhorada da bateria de arranque, o que difere as mesmas é o material utilizado no eletrólito. Enquanto as baterias de arranque possuem seu eletrólito líquido, as baterias VRLA possuem um material em gel ou absorvido por um separador de microfibra de vidro, desenvolvidas para diminuir a manutenção dos acumuladores deste tipo (PINTO et al., 2017).

Figura 6 - Componentes básicos de uma bateria chumbo-ácido



A Figura 6 detalha a construção convencional de uma bateria de chumbo-ácido, com os elementos presentes em todas as baterias deste tipo, como grades, eletrodos, separador, eletrólito, além das conexões e os terminais.

Já as baterias tracionárias são utilizadas em sistemas mais severos, operando sobre grandes potências e descargas mais longas em curto espaço de tempo, comumente utilizado nas indústrias, rebocadores e veículos elétricos de grande porte (MOSELEY, 2004).

As baterias estacionárias são utilizadas como fonte reserva de energia, muito aplicadas em *nobreaks*, hospitais e sistemas *off-grid* (PINTO et al., 2017). As baterias estacionárias, diferente das baterias de arranque, são utilizadas para fornecer uma energia estável e contínua (POWERSAFE, 2024).

2.2.1.1 Carregamento de baterias chumbo-ácido

As baterias de chumbo-ácido utilizam do método de carregamento por corrente e tensão constante (CCCV – *Constant Current, Constant Voltage*), em que pode ser dividido em três etapas: carga em corrente constante, carga de pico e carga de flutuação (BUCHMANN, 2016).

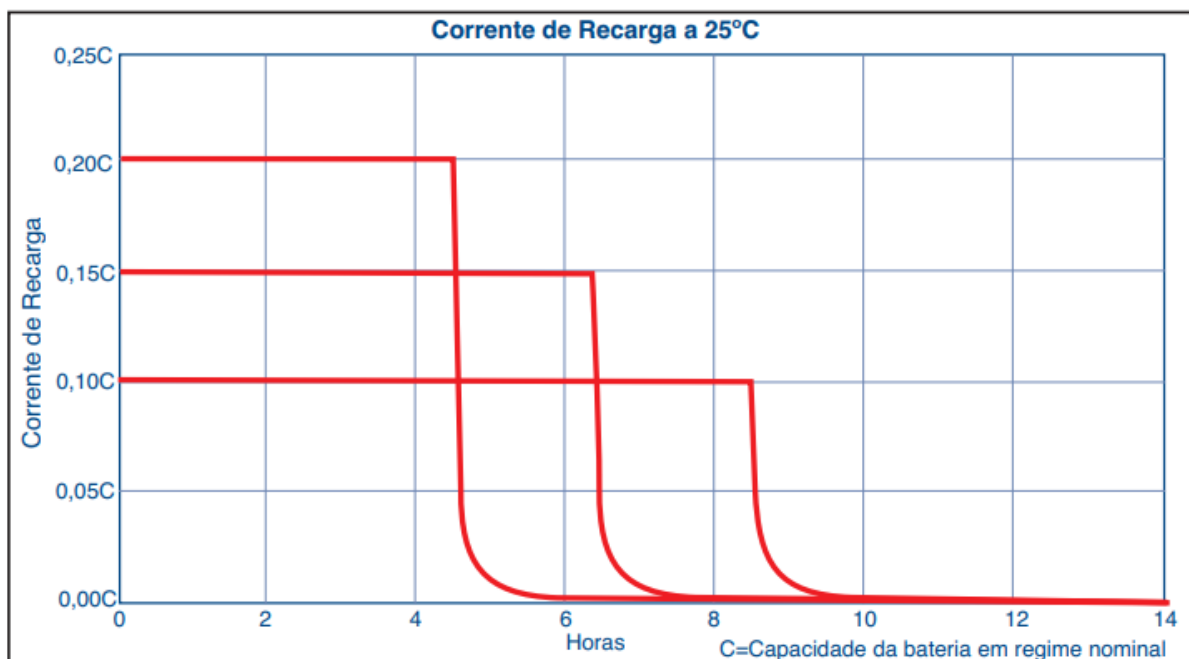
Na primeira etapa, é aplicada uma corrente constante na bateria até que o limite de tensão seja atingido. Após isso, com o atingimento da tensão ao limite definido, a bateria satura e a corrente do acumulador tende a resultar em valores muito baixos, de forma que a bateria não aceite uma carga adicional acima do limite que foi estipulado. Na terceira etapa, a etapa de flutuação reduz a carga da bateria para que seja compensada a autodescarga presente nas baterias (BUCHMANN, 2016).

O carregamento dos acumuladores de chumbo-ácido pode variar de 12 a 48 horas, dependendo do tamanho e capacidade das baterias. Durante o primeiro processo, a etapa de corrente constante pode levar de 5 a 8 horas de carregamento até que a bateria atinja o seu limite de tensão. Comumente, a etapa de corrente constante representa cerca de 70% do carregamento total dos acumuladores, os outros 30% restantes são referentes às etapas de tensão constante e flutuação, que podem levar de 7 a 10 horas para serem finalizadas (BUCHMANN, 2016).

A Figura 7 detalha a corrente durante todo o processo de carregamento do acumulador, em que, independentemente do estado de carga inicial da bateria, a corrente se mantém fixa em que a corrente deve ser limitada impedindo que o acumulador receba uma corrente superior ao que é estipulado pelos fabricantes, evitando a redução brusca de vida útil por causa do carregamento inapropriado (MAGNETI MARELLI, [2017]).

Este comportamento faz com que durante o período inicial de carregamento das baterias estacionárias a corrente fique fixa em um valor mais elevado até atingir a tensão alvo, e quando atingir esse limite a corrente cai, resultando em um carregamento mais lento, porém menos estressante para a bateria.

Figura 7 - Corrente de carga em função do tempo



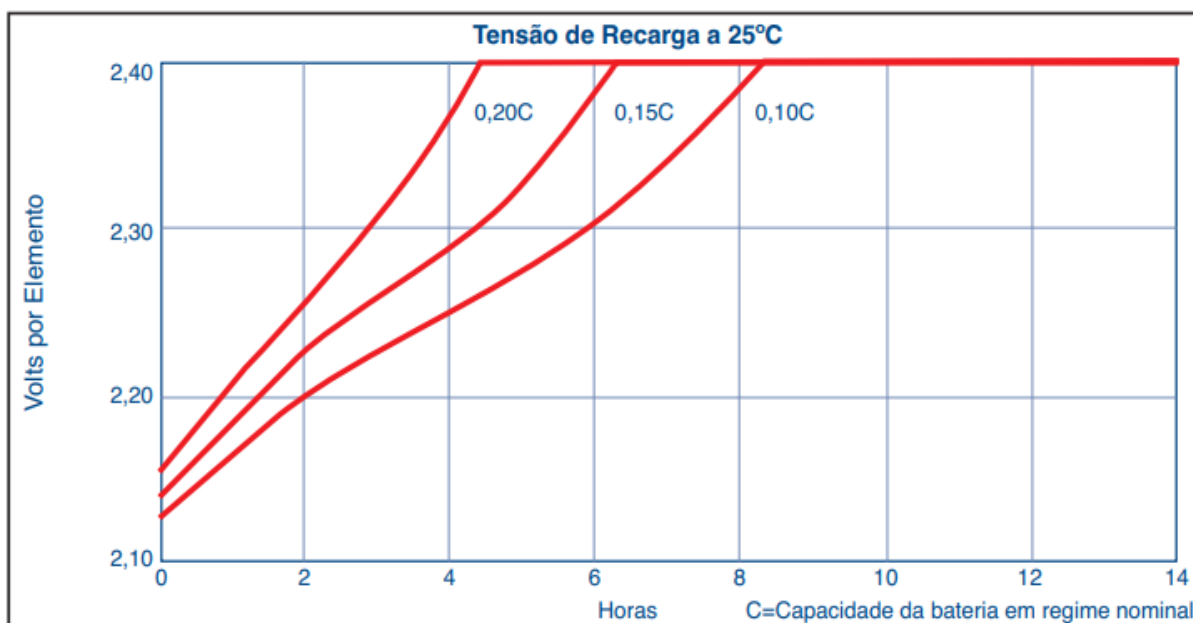
Fonte: Marelli Cofap do Brasil Ltda, [2017].

Assim é possível perceber que, em complemento ao gráfico presente na Figura 8, quando a tensão atinge o valor estipulado para carregar a bateria, a corrente tende a ficar próxima de zero, de forma que a corrente seja suficiente apenas para manter a tensão no valor constante estipulado afim de manter a bateria carregada.

A Figura 8 apresenta as curvas de carregamento por célula de uma bateria estacionária de acordo com a utilização da capacidade em regime nominal, em que o correto carregamento das baterias deve manter o valor de tensão de circuito aberto da bateria constante em um valor que não prejudicará o acumulador (LINDEN, 2002).

Mesmo que a tensão se mantenha constante, a bateria continua absorvendo carga. Porém, à medida que o estado de carga do acumulador se aproxime de 100%, o carregamento se torna mais lento, evitando o estresse da bateria e a degradação acelerada dos componentes presentes na bateria podendo assim reduzir a necessidade de trocas antecipadas, exemplificado na Figura 7 (LINDEN, 2002).

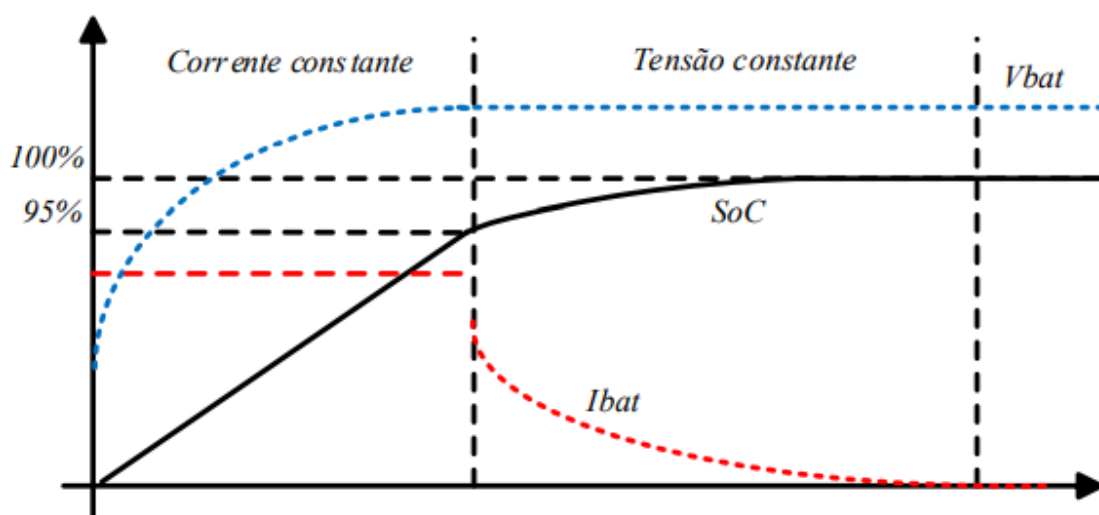
Figura 8 - Tensão de carga em função do tempo



Fonte: Marelli Cofap do Brasil Ltda, [2017].

A Figura 9 detalha as etapas de tensão durante o processo de carregamento das baterias. Inicialmente, durante a etapa de corrente constante, a tensão se eleva até atingir a tensão de absorção. A transição entre as etapas de corrente constante (CC) para a etapa de tensão constante (CV) ocorre quando a tensão atinge a tensão de absorção, em que nesta segunda etapa a tensão passa a ser regulada em um valor fixo, isso garante que o acumulador não seja submetido a uma tensão superior à permitida (SERÔDIO, 2018).

Figura 9 - Curvas de carregamento CCCV



Fonte: SERÔDIO, 2018.

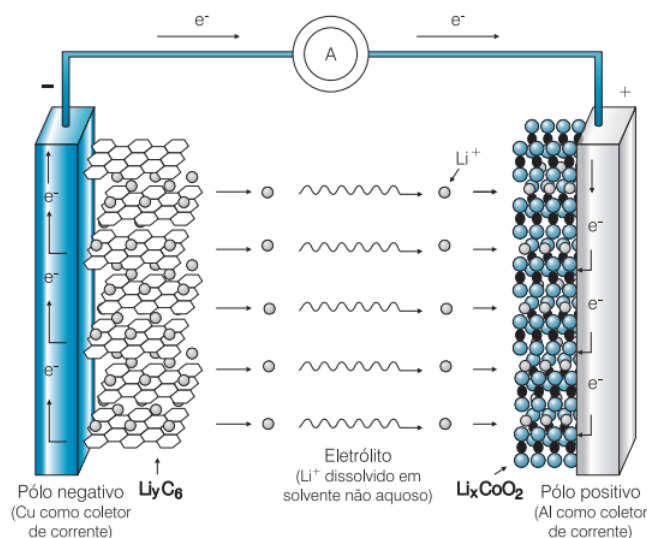
Assim, a Figura 9 apresenta um gráfico com a junção das curvas de corrente, tensão e estado de carga da bateria de acordo com o que foi explicado anteriormente, de forma a realizar o carregamento de forma segura sem prejudicar a saúde do acumulador.

Conforme explicado, é possível afirmar que o melhor equipamento para se carregar os acumuladores de chumbo-ácido são os carregadores próprios de baterias, por serem inteligentes e carregarem os dispositivos com qualidade e de certa forma preservar sua vida útil. Mesmo que a bateria seja carregada por uma fonte de carga constante, esse fornecimento acaba por gerar sobreaquecimento no dispositivo reduzindo a sua vida útil (OLIVEIRA, 2019).

2.2.2 Bateria de Íons de Lítio

As baterias de íons de lítio possuem uma gama de vantagens em relação às demais tecnologias de baterias do mercado. Estas são baterias com uma vida útil elevada, além da ausência do efeito memória, isto é, a bateria não vicia, não é necessário carregar a bateria até o total nem descarregar completamente, além de cargas mais rápidas. Importante ressaltar que as baterias de íons-lítio possuem diversas aplicações, como dispositivos eletrônicos, assistência a deficientes e sistemas de energia de emergência, tudo isso pelo fato de possuírem uma vida útil maior e terem uma capacidade superior às demais (ANTAS, 2012).

Figura 10 - Processo eletroquímico das baterias de íons de lítio



Fonte: Bocchi et. al., 2020.

Na Figura 10 é possível a análise do processo eletroquímico das baterias de íons de lítio, que se baseia na intercalação iônica. Durante o processo de descarga, os íons de lítio saem

do material do anodo para o interior do material do cátodo. A reação que predomina nesse processo é a oxidação do carbono-grafite, onde são liberados os íons de lítio para manter as características do material (BOCCHI et. al., 2020). E mesmo diante do exposto, as baterias de íons de lítio continuam por ser mais caras que as outras, além de que precisam seguir um padrão bem mais rigoroso de utilização, quando tratamos de segurança. (MICHELINI, 2020).

2.2.3 Bateria de níquel-cádmio

As baterias de Níquel-Cádmio são umas das mais antigas do mercado mundial, desenvolvidas por W. Jungner em 1899. Além disso, são baterias seladas e de longa vida útil, porém, diferente das baterias citadas anteriormente, são susceptíveis ao efeito memória, assim tendo a necessidade de carregar e descarregar completamente para evitar a diminuição da vida útil (BARANDAS et al., 2007).

Estas são robustas, pois acabam suportando sobretensão e correntes mais altas, além de serem resistentes a maiores variações de temperatura, porém com o preço superior ao das baterias tradicionais de chumbo-ácido (ANTAS, 2012).

Visto isso, com o avanço da tecnologia, as baterias de Níquel-Cádmio vêm sendo substituídas por baterias de íons de lítio e níquel-hidretos metálicos, pois estas não sofrem com efeito memória e geram menor impacto ambiental em comparação com os acumuladores de Níquel-Cádmio (LINDEN; REDDY, 2010).

2.2.4 Bateria de níquel-hidretos metálicos

As baterias de NiMh (Níquel-Hidretos Metálicos) vieram como uma alternativa de substituir as baterias de Níquel-Cádmio, substituindo o cádmio por um outro material que tenha um menor impacto ambiental (AMBROSIO; TICIANELLI, 2001).

Dessa forma, as baterias de níquel-hidretos metálicos são similares aos acumuladores de cádmio quando tratamos de características operacionais, como voltagem da bateria e controle de carga, apesar de apresentar uma maior densidade de energia (AMBROSIO; TICIANELLI, 2001).

Segundo Antas (2012), com a substituição do eletrodo de cádmio por hidretos metálicos, um dos maiores problemas relacionados à bateria de níquel-cádmio é resolvida, o efeito memória, evitando que no decorrer do tempo a bateria “vicie”.

As baterias de Ni-Mh são baterias mais caras do que as baterias Níquel-Cádmio, além de ter uma elevada taxa de auto descarga, descarregando cerca de 50% mais rápido do que as baterias de níquel-cádmio (STA ELETRÔNICA, 2025).

Os acumuladores de Ni-Mh normalmente são utilizados em veículos híbridos, devido a baixo custo de manutenção e flexibilidade de projeto. Porém, o efeito memória e complexibilidade de controle de carga destes tipos de bateria devem ser levados em consideração no momento de escolha (SILVA, 2021).

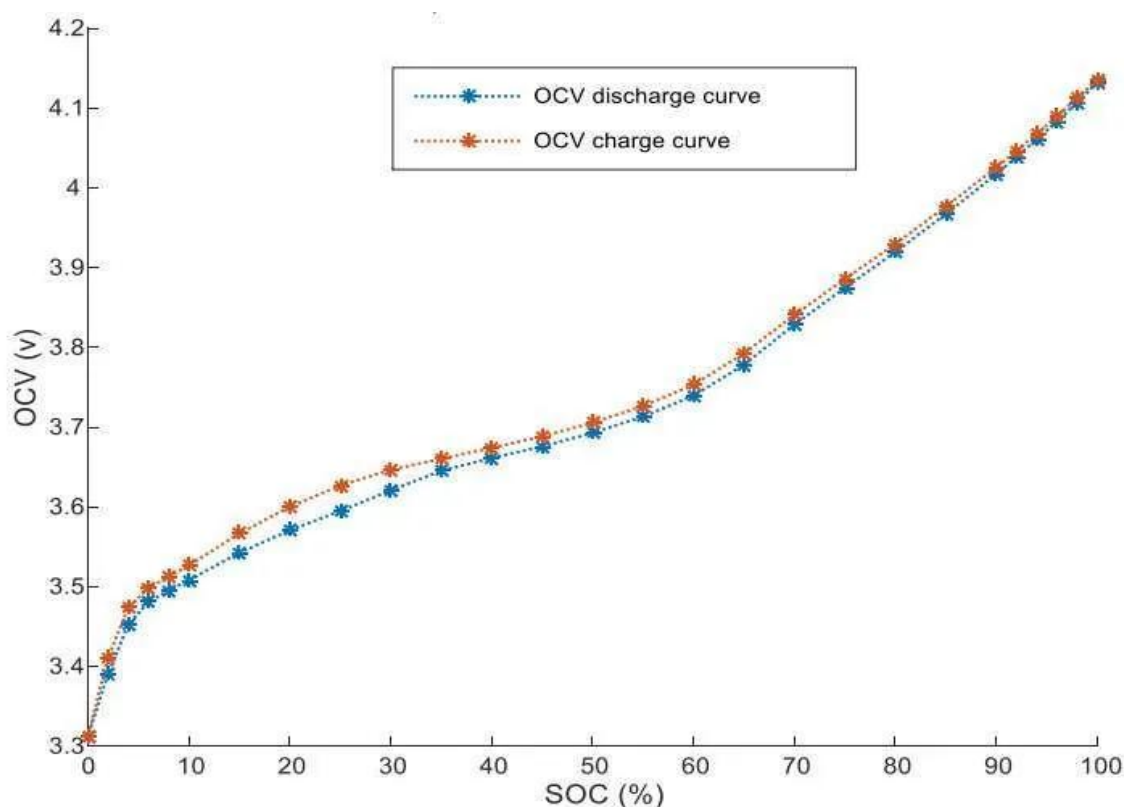
2.3 Parâmetros característicos de baterias

Para elaborar o projeto de um conversor CC/CC é necessário ter conhecimento dos parâmetros fundamentais dos acumuladores, para selecionar de forma precisa a melhor bateria para se adequar ao projeto. A seguir serão apresentadas as características que influenciam nesta escolha:

- a) Capacidade de carga: A capacidade de armazenamento das baterias se refere a capacidade do acumulador de fornecer uma dada corrente constante durante uma hora de descarga. Normalmente é medida em Ampére-hora (Ah) (ANTAS, 2012). Além disso, a capacidade das baterias depende de outros fatores, como a temperatura ambiente, a idade da bateria e a taxa de descarga do acumulador (ENERGSOFT, 2023).
- b) Tensão de corte: A tensão que uma bateria pode ser descarregada com segurança sem que sofra qualquer dano é chamada de tensão de corte. Esta tensão varia de acordo com os materiais e o tipo de cada bateria, se adaptando conforme sua utilização (RONTEK, [2025]).
- c) Ciclagens e sobrecarga: A cada ciclo de carga e descarga, a bateria sofre uma degradação físico-química que reduz a quantidade de energia que é armazenada, e considerando que a bateria é recarregada constantemente, essa degradação ocorre o tempo todo. Além disso, as baterias podem sofrer sobrecarga, por exemplo, em períodos de pouca utilização das baterias, ela continua a receber uma diferença de potencial mesmo completamente carregadas, gerando uma sobrecarga de tensão (ANTAS, 2012). Atualmente, os fabricantes fazem diversos testes de ciclagens e sobrecarga para avaliar o funcionamento das baterias, este fator que ditará a qualidade do acumulador de energia.

- d) Tensão de circuito aberto: A tensão medida entre os terminais do acumulador quando não há passagem de corrente elétrica é chamada de tensão de circuito aberto. Esta tensão varia de acordo com o estado de carga da bateria, sendo que quanto menor a tensão entre os terminais, mais próxima de 0% é o SOC do acumulador. O contrário ocorre quando maior é a tensão nos terminais, mais próxima de 100% está o nível de carregamento da bateria (BIRKL, 2015). A Figura 11 apresenta qual a tensão de circuito aberta tanto de descarga quanto carga de acordo com o estado de carga das baterias.

Figura 11 - Curva da tensão de circuito aberto



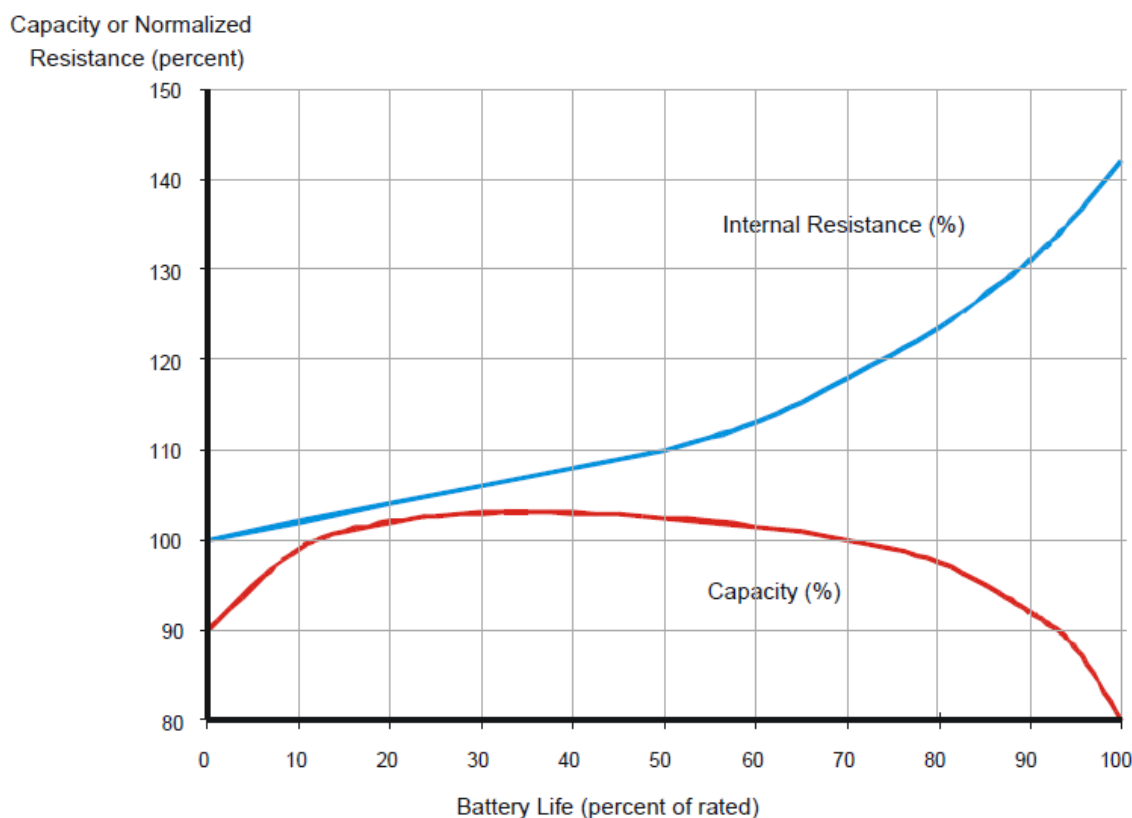
Fonte: ZHANG et al, 2016.

- e) Tensão da bateria: A tensão, ou diferença de potencial (d.d.p.), se refere a força eletromotriz responsável por deslocar um elétron em um determinado sentido em dois pontos de um circuito. A tensão é o trabalho (energia) requerido para deslocar estes elétrons entre uma diferença de potencial (ALEXANDER; SADIKU, 2013). Entretanto, nas baterias, quando tratamos de um circuito fechado, a diferença de potencial é a diferença entre os dois polos do acumulador.
- f) Profundidade de descarga: Normalmente denominado por DoD (*Depth of Discharge*), nada mais é do que o percentual que a bateria descarregou de sua capacidade total em

um certo ciclo de vida. Segundo a Federal Batteries (2020), o DoD é encontrado dividindo a capacidade descarregada da bateria totalmente carregada pela capacidade nominal da bateria.

- g) Estado de carga: O estado de carga de uma bateria, ou também SoC (*State of Charge*), diz respeito à capacidade da bateria em relação à capacidade total. Dependendo do tipo da bateria pode ser calculado de diversas formas. É representado em pontos percentuais de 0% a 100% (ENERGSOFT, 2023).
- h) Resistência interna: Segundo Antas (2012), a resistência interna é uma grandeza encontrada em todas as fontes de energia existentes, porém, quando muito baixa, estes sistemas podem ser considerados ideais. No comportamento normal de uma bateria, é comum que a sua capacidade reduza ao longo do tempo até o fim da sua vida útil, normalmente a bateria pode chegar a 80% de sua capacidade nominal (RAMPAZO, 2019). Além disso, pela Figura 12 percebe-se que no decorrer do tempo de uso da bateria, haja um acréscimo na resistência interna, em que ao final de sua vida útil ela atinja cerca de 150% do valor inicial de resistência da bateria (RAMPAZO, 2019).

Figura 12 - Vida útil x Resistência interna da bateria



Fonte: RAMPAZO, 2019.

- i) Taxa de autodescarga: A taxa de autodescarga de uma bateria é o fator que diz sobre a redução da capacidade da bateria quando estiver em circuito aberto. Podendo ser afetado pela temperatura ambiente, por curtos-circuitos e principalmente pelas propriedades eletroquímicas (ENERGSOFT, 2023).
- j) Ciclos de vida útil da bateria: A contagem de ciclos de vida de uma bateria nada mais é do que a quantidade de carga/descarga do acumulador antes de começar a influenciar na vida útil da bateria. A quantidade de ciclos de uma bateria pode variar de acordo com o fabricante e o tipo de bateria a ser tratada, sendo que em média ao final destes ciclos o componente atinge apenas 80% da capacidade nominal de carga. (MIDTRONICS, 2023).

2.4 Funcionamento do alternador

No presente capítulo são apresentadas as partes construtivas de um alternador veicular bem como o seu funcionamento e influência com a carga de baterias.

Antigamente, o sistema elétrico dos veículos era alimentado através do dínamo, um sistema semelhante ao alternador, porém mais simples, que era acionado pelo motor, fornecia uma tensão baixa e que passava por um regulador de tensão para alimentar os dispositivos eletrônicos dos carros. Entretanto, o dínamo é um equipamento que exige uma rotação mínima do motor para que ele produza tensão suficiente para alimentar os circuitos eletrônicos do veículo, o que compromete o sistema elétrico quando o automóvel está em baixas velocidades ou se encontra parado (BRAGA, 2002).

O alternador é um equipamento que pode ser classificado como uma máquina síncrona, em que o rotor, excitado pela corrente contínua produz um campo magnético que induz uma tensão alternada. De forma resumida, é responsáveis por converter a energia mecânica proveniente do motor em energia elétrica para carregar as baterias, armazenando energia para ser utilizada em casos que o alternador não será suficiente ou quando o veículo estiver parado, fornecendo energia elétrica para os equipamentos, e também fornecendo energia para o sistema de ignição dos veículos (BRAGA, 2002).

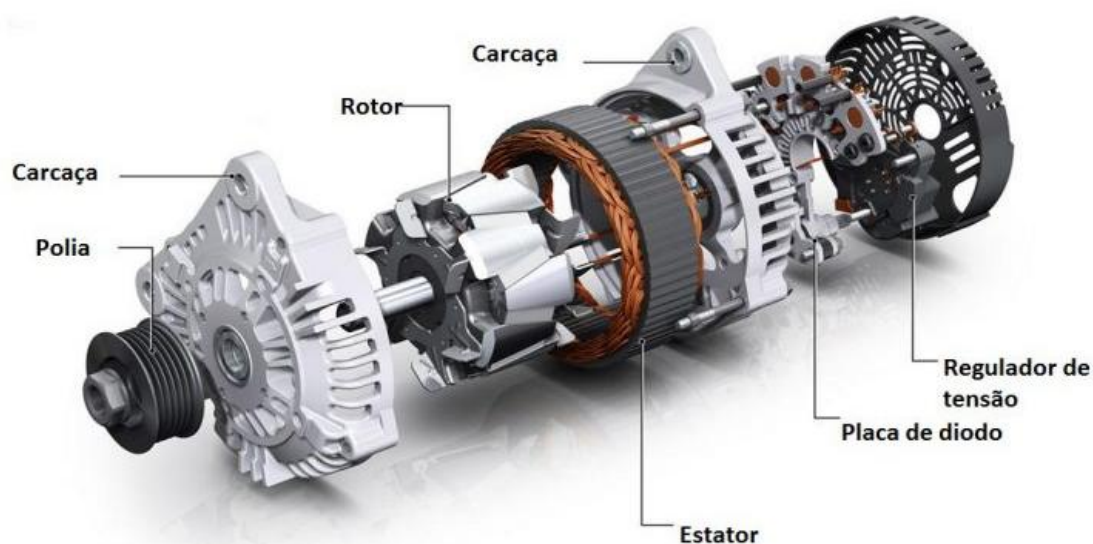
2.4.1 Partes construtivas do alternador

Visto como funciona os alternadores, é importante conhecer cada parte física que compõem o equipamento (HELIAR, 2025):

- a) Polia: é o equipamento responsável por transmitir a energia mecânica do motor para o alternador;
- b) Rotor: é a bobina, rotativa, que quando acionada pela polia através do motor produz um campo magnético;
- c) Estator: o estator é o conjunto de bobinas fixas do alternador, que, quando atravessadas pelo campo magnético do rotor geram uma corrente elétrica;
- d) Retificador de diodos: responsável por transformar a corrente alternada em contínua que vem do estator, para que possa alimentar o sistema elétrico do veículo;
- e) Regulador de tensão: é o equipamento utilizado para limitar a tensão proveniente do retificador de diodos, definindo quanto de carga será destinado a cada equipamento;
- f) Carcaça: parte externa do alternador, responsável por proteger os componentes internos do equipamento.

A Figura 13 detalha de forma ilustrada cada peça que compõem os alternadores de forma geral.

Figura 13 - Partes construtivas do alternador



Fonte: DIJO AUTO PEÇAS, 2019.

2.4.2 Carregamento das baterias através do alternador

Como visto, o alternador é o responsável por gerar a energia necessária para funcionar os equipamentos elétricos e a bateria presente no veículo. Entretanto, para o

carregamento das baterias, o alternador, em seu regulador, consegue ajustar a tensão de acordo com o acumulador do veículo, sendo da ordem de 10% a 15% da tensão nominal da bateria. Além disso, a corrente dos alternadores presentes no mercado são de 60 a 70 amperes.

Portanto, a corrente máxima dos equipamentos elétricos do veículo não deve ser maior do que a capacidade do alternador, pois dessa forma a bateria acabaria descarregando ao invés de carregar (SEG AUTOMOTIVE, 2021).

Apesar dos alternadores possuírem um regulador de tensão em sua composição, como apresentado anteriormente, para o carregamento de baterias estacionárias, deve haver um controle para o correto carregamento dos acumuladores.

No caso dos alternadores, os sinais de tensão e corrente são enviados à bateria de forma descontrolada, podendo gerar uma sobrecarga. De forma contrária, os fabricantes de acumuladores indicam que o carregamento deve ser feito de forma controlada, com o objetivo de manter a saúde e prolongar a vida útil da bateria (SEG AUTOMOTIVE, 2021).

2.4.3 Utilização do VSR

O VSR (*Voltage Sensitive Relay*) é um relé controlado de forma automática para liberar e impedir o carregamento de casos em que um veículo, um motorhome por exemplo, tenha mais de uma bateria em seu sistema elétrico.

Seu funcionamento consiste em auxiliar no carregamento simultâneo das duas baterias, em que a bateria de ignição carrega a bateria de lazer e os demais componentes elétricos do sistema, e de forma automatizada, quando um dos acumuladores atingir o nível de tensão que indica o completo carregamento, o relé impede que a corrente continue a passar para a bateria (YIS MARINE, [2025]).

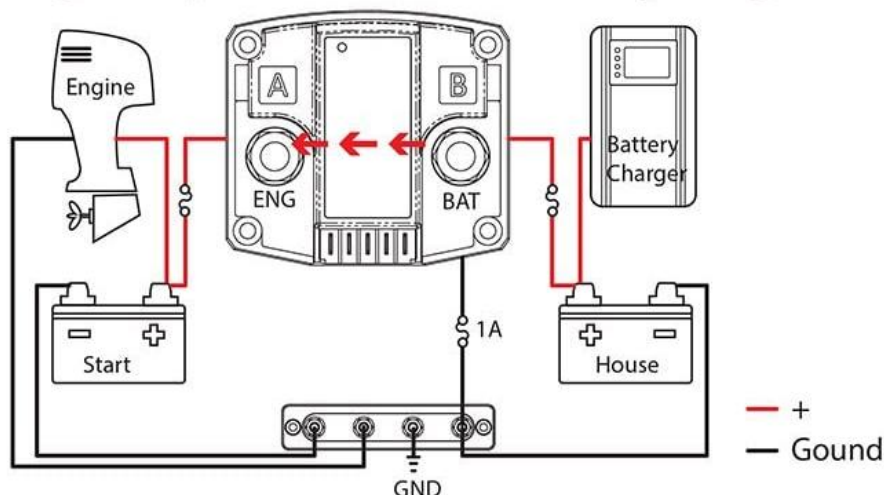
Ademais, quando o veículo está parado ou desligado, o VSR desconecta as baterias, impedindo que a bateria de partida seja utilizada para fornecer energia para a bateria secundária e as demais cargas do veículo (YIS MARINE, [2025]).

Dessa forma, o VSR garante que enquanto o veículo estiver parado ou desligado, a bateria secundária será responsável por alimentar as cargas do automóvel, evitando que a bateria primária continue carregando a bateria secundária e as demais cargas, enquanto se manterá carregada para ligar o motor.

A Figura 14 apresenta o diagrama de ligações do VSR montado de forma a auxiliar o carregamento simultâneo das baterias.

Figura 14 - Diagrama de ligações do Relé sensível à tensão

Wiring Example for SI-VSR with Battery Charger



Dual Port Sensing allows Battery Charger charging to Start Battery when engine is off.

Fonte: YIS MARINE, [2025].

Além disso, pode ser necessário dar partida no veículo com a bateria secundária em casos de emergência, em que a bateria de ignição esteja descarregada ou com algum problema, através de um interruptor de emergência presente em alguns relés sensíveis à tensão como apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Relé sensível à tensão (VSR)



Fonte: YIS MARINE, [2025].

2.4.4 Utilização do conversor CC-CC

Os conversores CC/CC possuem muitas vantagens para serem aplicados em sistemas de baterias em veículos. Por ser mais compacto, acaba simplificando o sistema de alimentação dos veículos, podem também reduzir o espaço utilizados pelas baterias, uma vez que se tem a possibilidade de utilizar baterias menores com tensões diferentes.

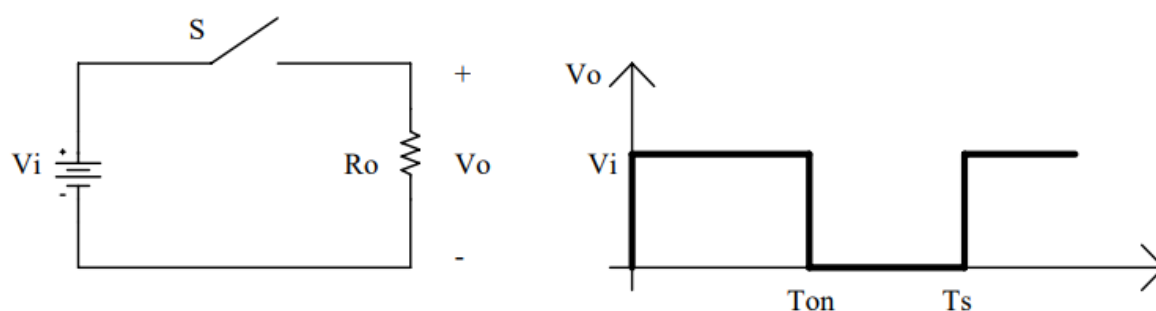
Os conversores podem fornecer uma tensão maior do que a disponível de forma eficiente com o conversor Boost. Assim, possuem tipologias isoladas, evitando interferência entre entrada e saída do sistema utilizando transformadores de alta frequência (KOSURU, 2023).

2.5 Topologias dos conversores CC-CC

Os conversores CC/CC são circuitos eletrônicos que consistem na conversão de uma tensão CC para outra tensão CC regulada nos terminais de saída do dispositivo (HART, 2011). Os conversores utilizam a técnica de comutação, e operam por chaveamento para transformar a tensão CC para outra de nível desejado, que, de acordo com a topologia, pode possuir um valor menor ou maior do que a tensão CC de entrada do circuito eletrônico.

A Figura 16 apresenta o circuito básico de um conversor CC-CC composto por uma fonte de tensão, um dispositivo de chaveamento e uma carga resistiva na saída, junto ao formato de onda gerado na saída.

Figura 16 - Conversor CC-CC básico e forma de onda da tensão de saída



Fonte: Petry, 2001.

Onde V_i e V_o representam, respectivamente, a tensão de entrada e saída do circuito, S se refere ao dispositivo de chaveamento, R_o é a resistência de carga do sistema, enquanto T_{on} é o intervalo de tempo que a chave permanece fechada e T_s é o período total de comutação.

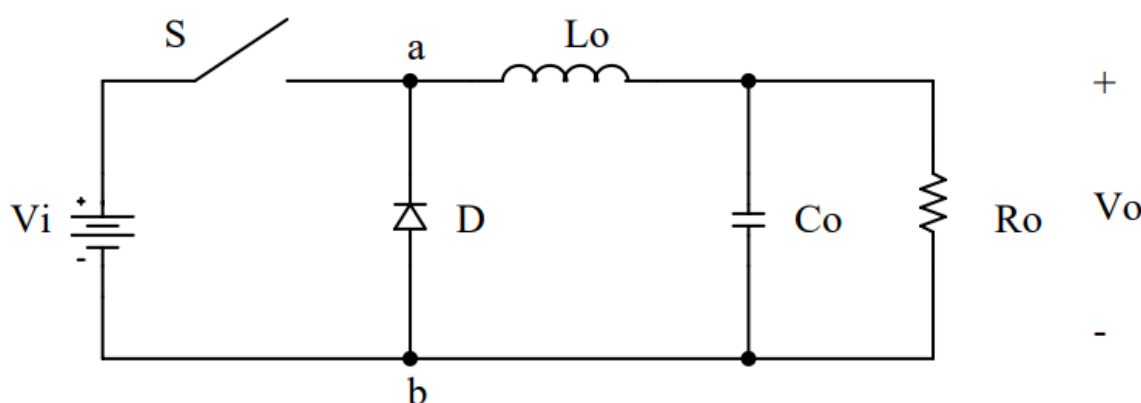
Ademais, nos circuitos são utilizados diversos componentes, como circuitos integrados (CIs), capacitores, indutores, etc., e que podem ser combinados para entregar uma melhor eficiência para a sua aplicação (KOSURU, 2023).

2.5.1 Conversor CC-CC Buck

Um conversor buck consiste em fornecer na saída uma tensão menor do que a componente de entrada do circuito. De forma a produzir um sinal de tensão menor do que a tensão de entrada, um dispositivo de chaveamento é adicionado em série com a fonte, funcionando como um interruptor, ligando e desligando o fluxo de corrente (HART, 2011).

Porém, como o objetivo nas aplicações de conversores CC-CC é produzir uma tensão puramente CC, é inserido um filtro LC passa baixas na saída do conversor, junto a um diodo que tem como objetivo servir de caminho para a corrente do indutor quando a chave está em aberto (HART, 2011). A Figura 17 apresenta a esquematização dos componentes de um conversor CC-CC buck.

Figura 17 - Conversor CC-CC buck



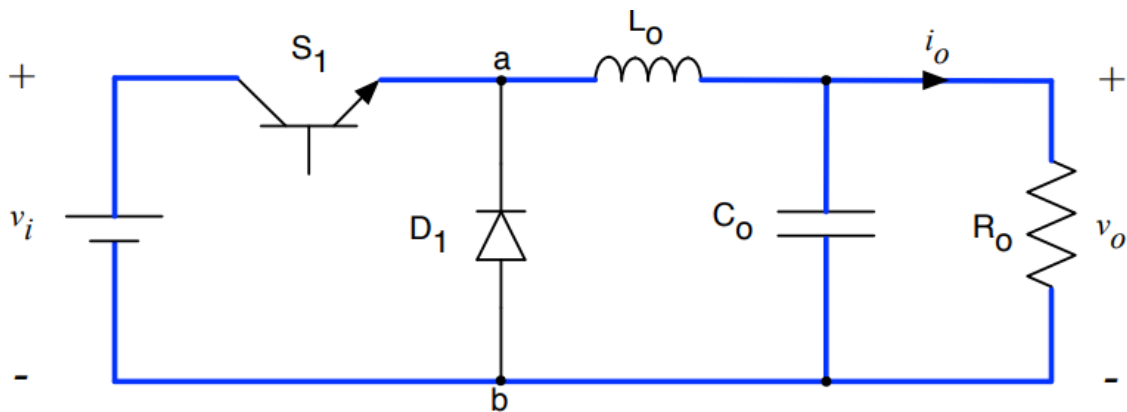
Fonte: Petry, 2001.

Onde D representa o diodo de roda livre do circuito, e Lo e Co representam o indutor e o capacitor de filtro, respectivamente.

Os dispositivos de chaveamento possuem dois modos de operação, quando estão abertos ou quando estão fechados. Ademais, a análise do circuito elétrico do conversor buck pode ser resumida em duas etapas definidas pelo estado da chave.

Inicialmente, com a chave fechada, a fonte de entrada fornece energia para a saída e para a magnetização do indutor de filtro, onde em um instante de 0 a DT_S , sendo este último instante o momento em que acontece a abertura da chave eletrônica. A corrente no indutor cresce linearmente (PETRY, 2014). A Figura 18 detalha em azul o caminho que corrente do circuito do conversor CC-CC buck percorre quando o dispositivo de chaveamento se mantém fechado.

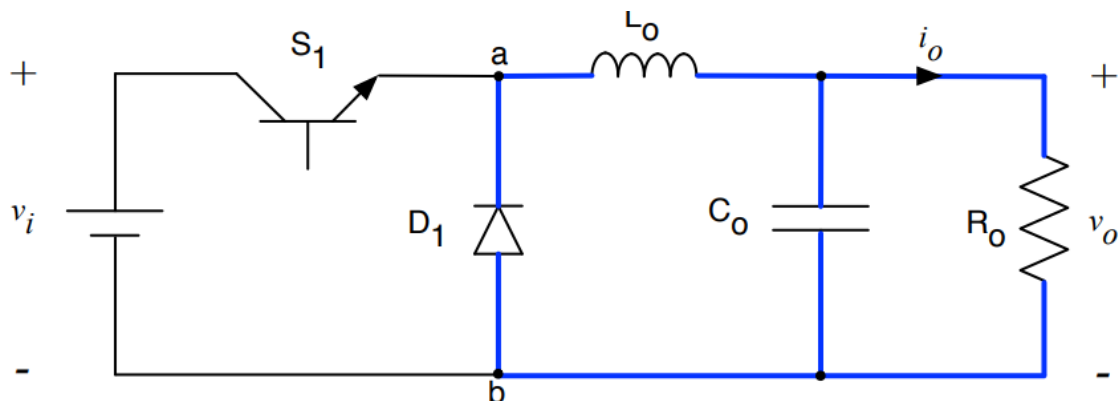
Figura 18 - Operação em chave fechada



Fonte: Petry, 2014.

Com isso, a segunda etapa de operação do conversor buck se refere ao momento em que a chave está aberta. Nesta etapa, o diodo D_1 entra em condução naturalmente para fornecer um caminho para o indutor de filtro, ocorrendo a desmagnetização do indutor nos instantes de DT_S a T_S com a corrente decrescendo de forma linear (HART, 2011). A Figura 19 apresenta a operação do conversor buck enquanto a chave está em estado aberto, detalhando o caminho da corrente de saída durante esta etapa.

Figura 19 - Operação em chave aberta



Fonte: Petry, 2014.

De forma análoga, quando a chave está em condução, a tensão no indutor é a diferença entre a tensão da fonte e a tensão de saída do circuito, uma vez que está conectado entre os dois, dessa forma:

$$v_L = V_i - V_o \quad (1)$$

Enquanto isso, a corrente no capacitor de filtro pode ser representada pela diferença entre a corrente proveniente do indutor subtraída da corrente de saída, assim:

$$i_C = i_L - I_o = i_L - \frac{V_o}{R_o} \quad (2)$$

Durante a segunda etapa de operação, a chave é aberta e o indutor passa a reduzir a energia magnética acumulada, formando um circuito fechado com o diodo. Considerando os componentes ideais, a tensão no indutor agora é o inverso da tensão de saída do circuito, assim:

$$v_L = -V_o \quad (3)$$

Enquanto isso, a corrente no condutor mantém um valor constante, matematicamente igual ao primeiro modo de operação do conversor:

$$i_C = i_L - \frac{V_o}{R_o} \quad (4)$$

Segundo Hart (2011), a condução no modo contínuo exige que a soma das correntes de magnetização e desmagnetização no indutor seja igual a zero. Dessa forma, através do desenvolvimento matemático das equações acima é possível calcular o ganho estático do conversor e concluir que a diferença da tensão de saída em relação a tensão de entrada representa o ganho do conversor.

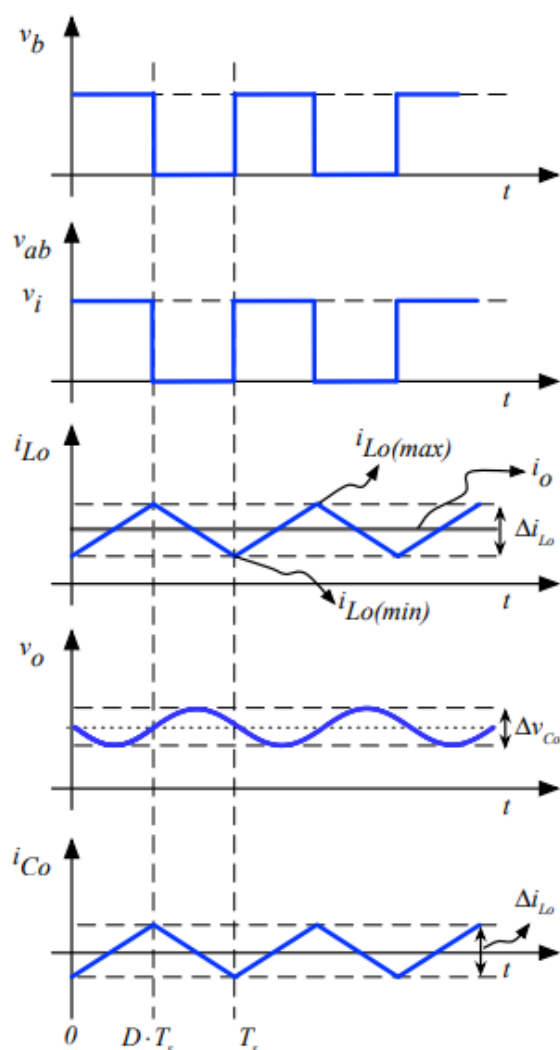
$$\frac{V_o}{V_i} = D \quad (5)$$

Com isso, os modos de operações se repetem continuamente estas duas etapas. A Figura 20 apresenta os formatos de onda dos sinais gerados durante o processo de chaveamento do conversor buck.

Com a chave em estado fechado, a energia é armazenada no indutor e transferida para a carga. Os gráficos da Figura 20 apresentam que, quando a tensão é aplicada diretamente ao indutor, o diodo fica reversamente polarizado, fazendo com que essa tensão aplicada diretamente sobre L resulte no aumento linear da corrente sobre o dispositivo, enquanto parte da energia alimenta diretamente a carga, o capacitor também contribui para manter a tensão estável na saída, recebendo ou fornecendo corrente conforme a demanda da carga.

Além disso, entre DT_s e T_s a chave se mantém em estado aberto, em que o indutor força a condução do diodo, que entra em condução direta. Nesta etapa ocorre a desmagnetização do indutor, fazendo sua corrente decrescer linearmente, transferindo toda energia armazenada para a carga e o capacitor, que garante que a tensão se mantenha estável na saída, e uma vez que o capacitor também ajuda a suprir a carga, sua corrente também decai linearmente.

Figura 20 - Formas de onda do conversor CC-CC buck



Fonte: Petry, 2014.

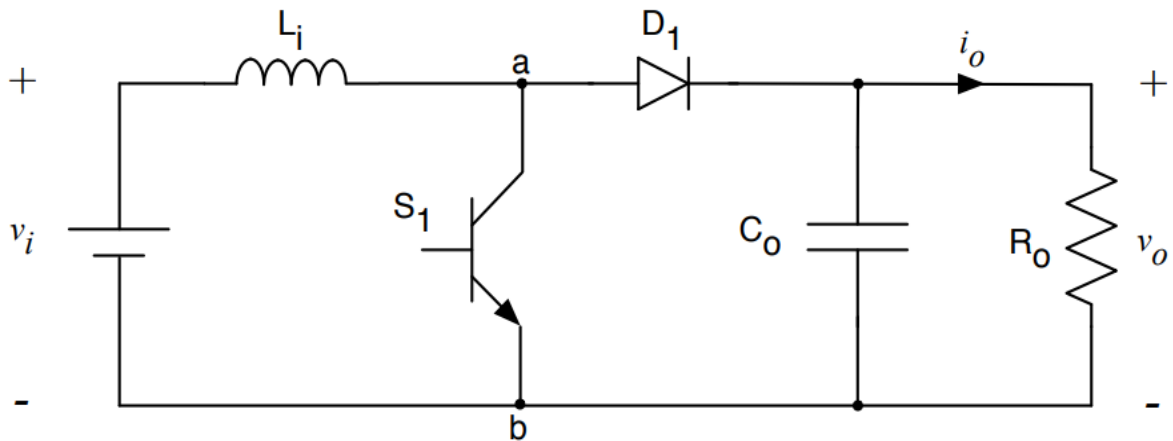
É importante destacar que na Figura 20 tem-se o sinal de comando do interruptor S1, descrito como v_b , e em seguida a diferença de potencial entre os pontos “a” e “b” com o sinal de tensão v_{ab} , além da corrente no indutor denominada i_{Lo} , a tensão de saída do conversor sendo v_o e a corrente que passa pelo capacitor como i_{Co} .

2.5.2 Conversor CC-CC Boost

De forma similar ao conversor buck, o conversor boost utiliza de uma chave junto a um filtro LC para alterar uma tensão contínua de entrada em uma componente contínua na saída, porém com a comutação da chave sua componente de tensão de saída é maior do que a de entrada (HART, 2011).

A Figura 21 apresenta o diagrama do circuito do conversor CC-CC boost detalhando os componentes presentes para seu funcionamento.

Figura 21 - Conversor CC-CC boost



Fonte: Petry, 2014.

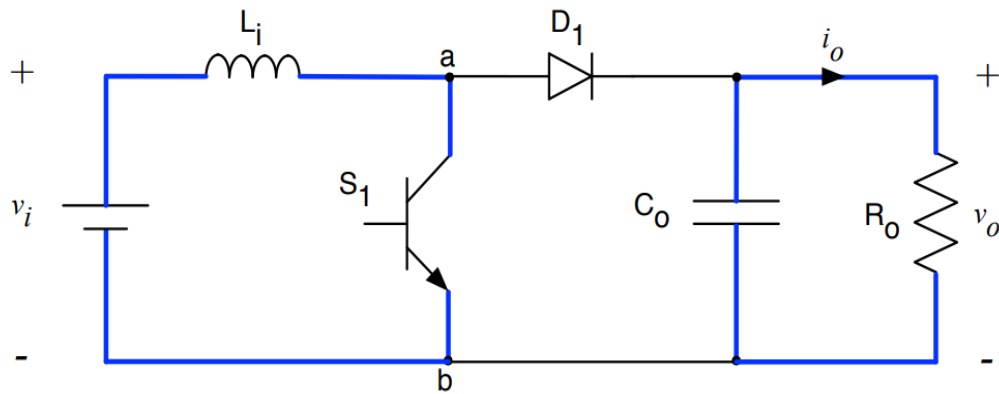
Em que a tensão de entrada e saída do sistema são v_i e v_o , respectivamente. O indutor de filtro é representado por L_i , seguido pela chave eletrônica do circuito denominada S1, o capacitor de filtro como C_o , a corrente de carga como i_o e a resistência de carga denominada como R_o .

O conversor boost possui dois modos de operação, quando sua chave S1 está fechada e quando está aberta.

Com a chave fechada, a corrente no indutor irá crescer linearmente, sendo magnetizado. Como a tensão entre os pontos a e b é zero, a tensão da fonte retorna pela chave e a carga será alimentada pelo capacitor de filtro (PETRY, 2001).

A Figura 22 apresenta o caminho percorrido pelas correntes durante o período que a chave permanece em estado fechado com a análise do circuito do conversor em regime permanente.

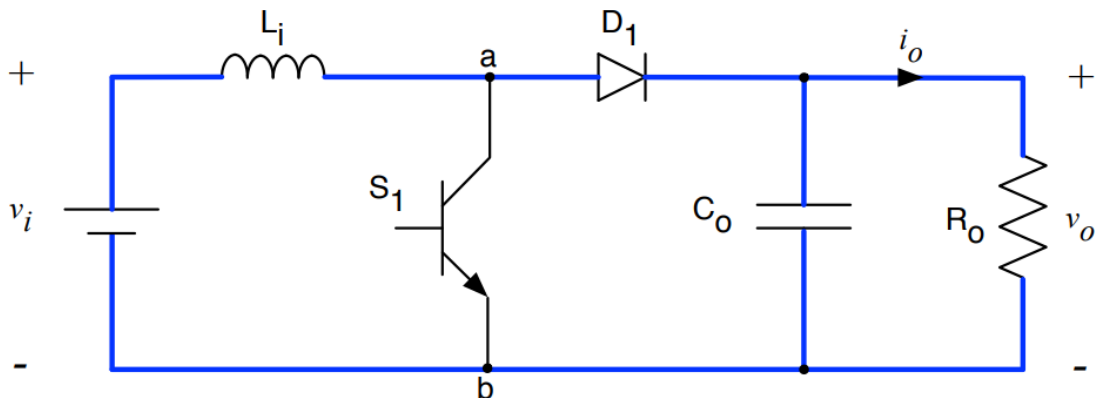
Figura 22 - Conversor boost em chave fechada



Fonte: Petry, 2014.

Já com a chave em aberto, a corrente armazenada no indutor é liberada para o diodo e indo para a carga, nesta etapa o indutor é desmagnetizado e sua corrente cai linearmente (PETRY, 2014). A Figura 23 apresenta o caminho percorrido pela corrente durante o período em que o dispositivo de chaveamento está em estado aberto, impedindo a passagem de corrente pelo mesmo.

Figura 23 - Conversor boost em chave aberta



Fonte: Petry, 2014.

De forma análoga, durante a primeira etapa de operação a tensão no indutor possui valor igual à tensão de entrada, desconsiderando as perdas pelos componentes do sistema:

$$v_L = V_i \quad (6)$$

Além disso, a corrente no capacitor i_C pode ser expressa pelo mesmo valor que a corrente de carga, uma vez que a corrente que passa pelo capacitor de filtro é a mesma que passa pelo resistor de carga:

$$i_C = -I_o = -\frac{V_o}{R_o} \quad (7)$$

Quando a chave está aberta, a tensão no indutor é a diferença da componente da fonte com a tensão de saída do circuito, uma vez que a chave não está mais em condução:

$$v_L = V_i - V_o \quad (8)$$

Uma vez que o indutor está desmagnetizando e transferindo corrente para a carga, a corrente do capacitor de filtro é a diferença das correntes do indutor e de carga. Dessa forma, a corrente no capacitor pode ser expressa como:

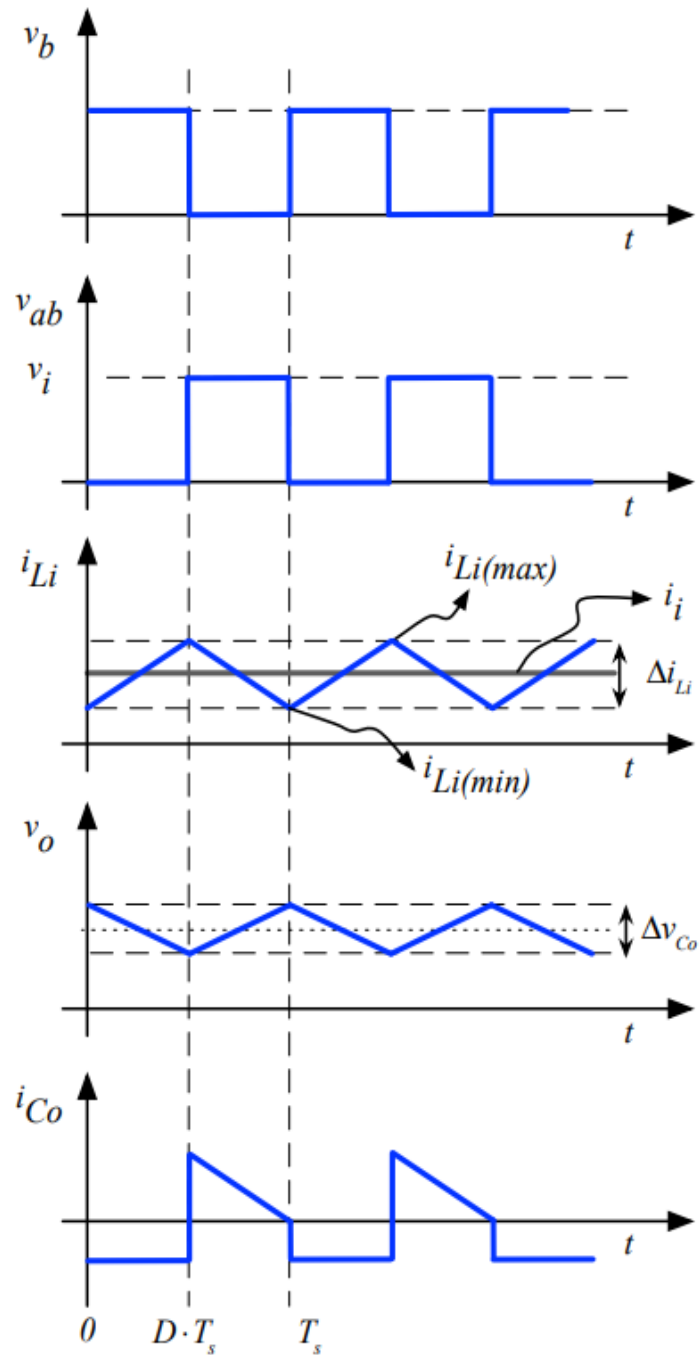
$$i_C = i_L - I_o = i_L - \frac{V_o}{R_o} \quad (9)$$

Matematicamente, semelhante ao conversor buck, no modo de condução contínuo, a soma das correntes de magnetização e desmagnetização deve ser igual a zero. Assim, através da manipulação das fórmulas apresentadas é possível relacionar as tensões médias de entrada e saída, uma vez que a equação considera o conversor boost em regime permanente e em modo de condução contínua, com o ganho estático do conversor boost (HART, 2011).

$$V_o = \frac{V_i}{1 - D} \quad (10)$$

Diante do que foi exposto, os formatos de onda referentes ao conversor boost são definidas na Figura 24, em que é importante ressaltar que a corrente no indutor i_{Li} é contínua, porem possui ondulação dada por Δi_{Lo} , e a tensão do capacitor de saída v_{Co} também é contínua, mas pode apresentar uma ondulação denominada por Δv_{Co} (PETRY, 2014).

Figura 24 - Formas de onda do conversor CC-CC boost

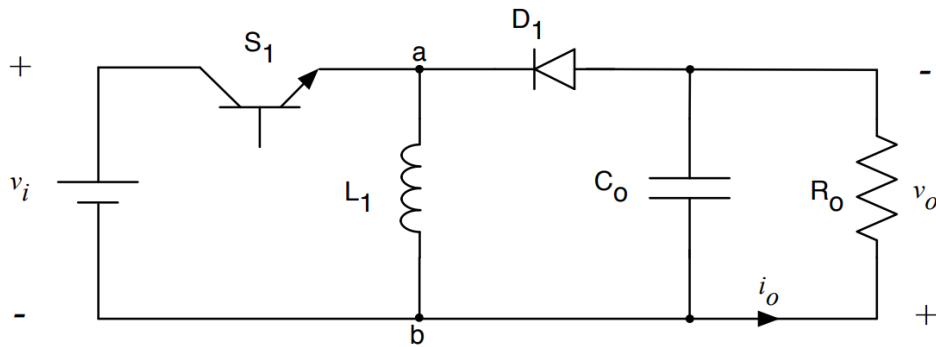


Fonte: Petry, 2014.

2.5.3 Conversor CC-CC Buck-Boost

Outra configuração de conversores CC-CC é o conversor buck-boost, em que sua tensão de saída pode ser maior ou menor do que a tensão de entrada (HART, 2011). A Figura 25 detalha o circuito do conversor buck-boost.

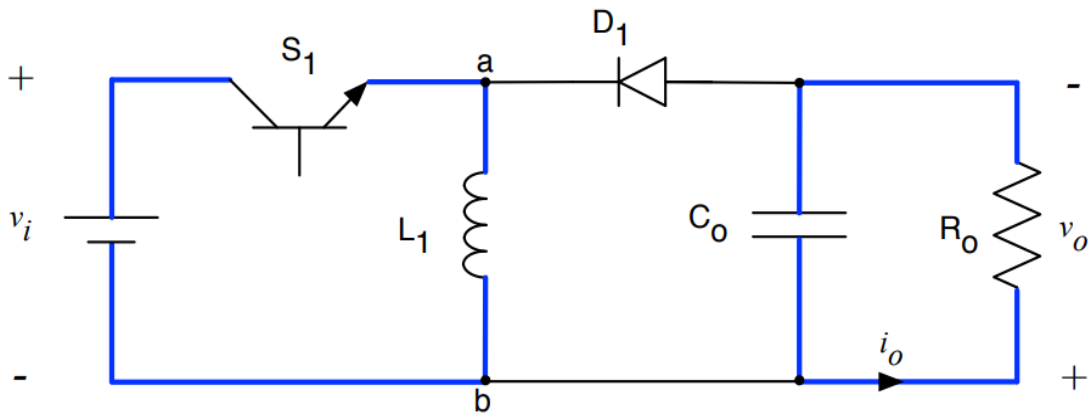
Figura 25 - Conversor CC-CC buck-boost



Fonte: Petry, 2014.

Assim como os conversores buck e boost, este conversor também possui duas formas de operação, se baseando na chave estando em aberto e fechada. Inicialmente, quando a chave está fechada, o diodo está polarizado reversamente e o circuito fica dividido em dois, e a tensão da fonte de entrada é utilizada para magnetizar o indutor, enquanto a carga é energizada pelo capacitor que foi carregado quando a chave está em aberto. A Figura 26 apresenta o caminho das correntes durante o tempo em que a chave permanece fechada.

Figura 26 - Conversor buck-boost em chave fechada



Fonte: Petry, 2014.

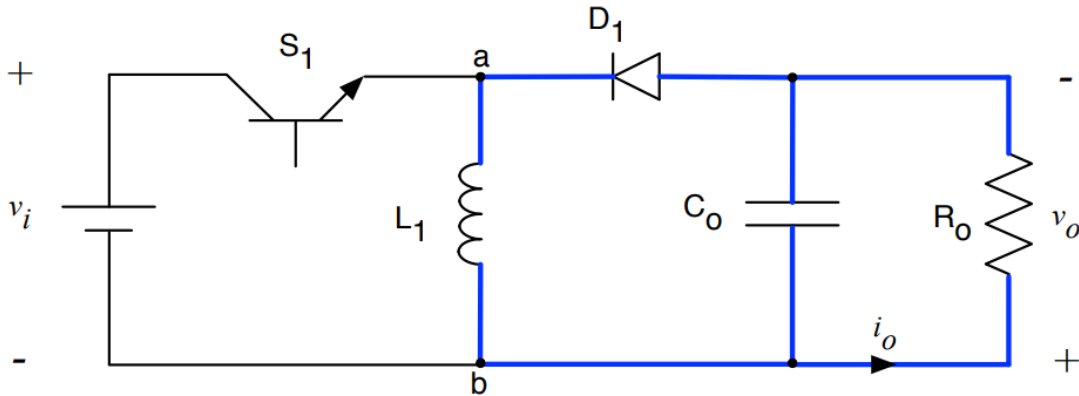
Dessa forma, temos que a tensão no indutor será a própria tensão da fonte de entrada, enquanto a corrente que passa no capacitor é a mesma que passa pela carga do circuito.

$$v_L = V_i \quad (11)$$

$$i_C = -I_o = -\frac{V_o}{R_o} \quad (12)$$

Além disso, quando a chave está aberta, a corrente passa do indutor de filtro para a carga formando um circuito fechado com o diodo polarizado diretamente, desmagnetizando o indutor. A Figura 27 apresenta o caminho que a corrente percorre quando a chave está em estado aberto.

Figura 27 - Conversor buck-boost em chave aberta



Fonte: Petry, 2014.

Assim, é possível deduzir que as equações referentes à tensão no indutor e a corrente no capacitor são as seguintes fórmulas:

$$v_L = -V_o \quad (13)$$

$$i_C = i_L - I_o = i_L - \frac{V_o}{R_o} \quad (14)$$

Analogamente, mais uma vez, em um sistema estável é possível concluir que a soma da variação líquida da corrente no indutor quando a chave está em aberto e quando fecha é igual a zero. Assim, o ganho estático do conversor CC-CC buck-boost é obtido através da equação:

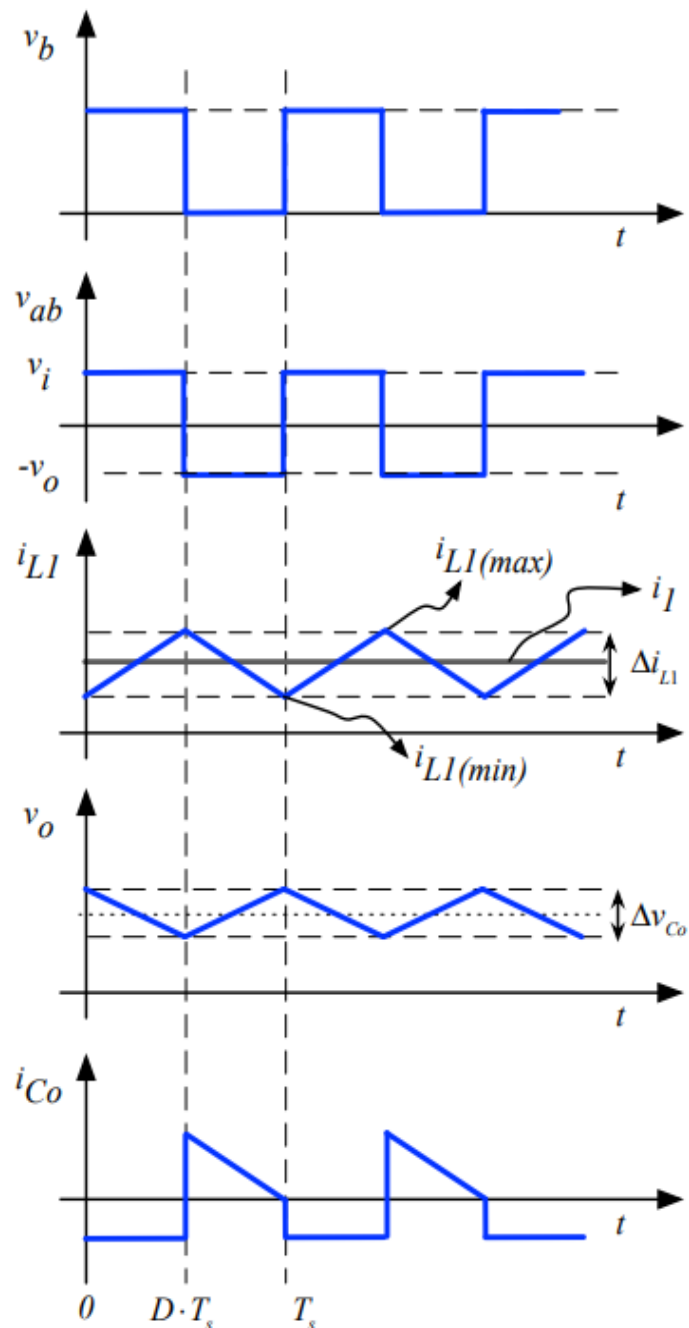
$$V_o = -V_i \left(\frac{D}{1-D} \right) \quad (15)$$

A equação do ganho do conversor diz que a polaridade da tensão de entrada é contrária a tensão de saída do circuito. Ademais, como o próprio nome diz, a tensão de saída do conversor pode ser maior ou menor do que a tensão de entrada do circuito, dependendo unicamente do valor do ganho estático. Quando este valor de ganho é maior do que 0,5, a tensão

de saída é maior que a tensão de entrada. E quando o ganho é menor do que 0,5, a tensão de saída possui uma componente de menor amplitude em relação ao valor de entrada (HART, 2011).

Com isso, o conversor alterna repentinamente entre chave aberta e fechada, produzindo os formatos de ondas referentes às grandezas então calculadas apresentadas na Figura 28.

Figura 28 - Formas de onda do conversor CC-CC buck-boost



Fonte: Petry, 2014.

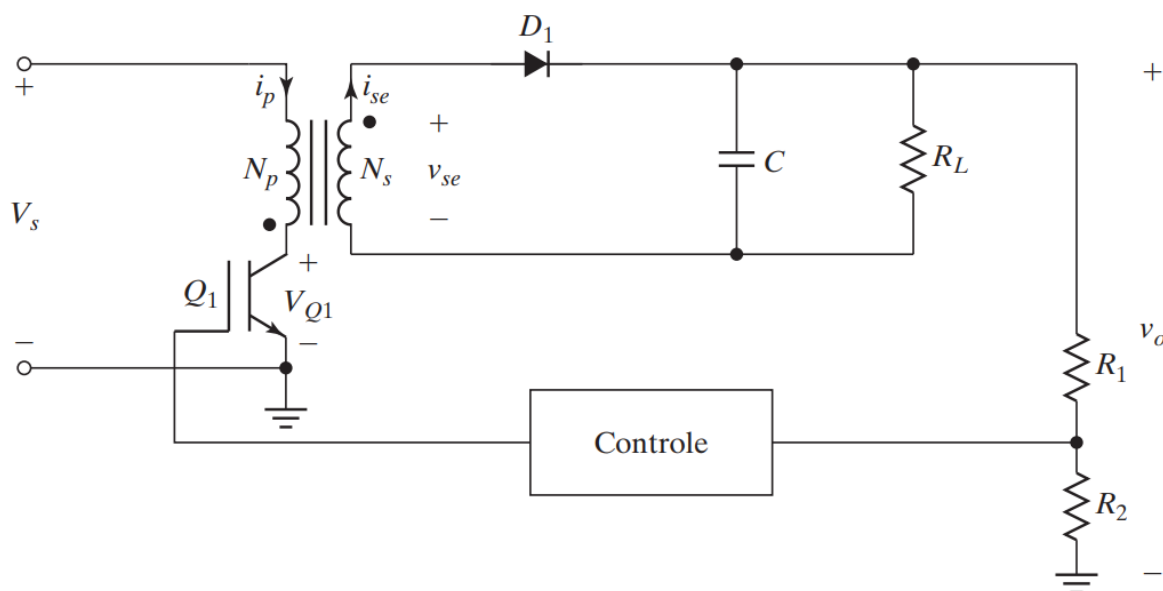
2.5.4 Conversor CC-CC *Fly-back*

Além dos conversores convencionais, existem uma gama de conversores isolados, que são comumente utilizados em sistemas *off-grid* por causa de sua adequação ao ciclo de trabalho e da segurança implementada em relação aos conversores não isolados (RASHID, 2014).

Segundo Rashid (2014), os conversores isolados, no entanto, são menos eficientes do que os conversores CC/CC não isolados por ter um transformador de isolamento no circuito.

Os conversores isolados utilizam um transformador de isolamento para separar a entrada do circuito com a saída. O conversor *Fly-back* é adaptado a partir do conversor buck-boost, e seu nome foi escolhido por causa do transformador *Fly-back*, que consiste em inverter a polaridade da corrente do transformador. Além disso, opera em dois modos, quando a chave (Q_1) no lado do primário do transformador está ligada e quando está desligada. A Figura 29 apresenta o circuito referente ao conversor CC-CC *Fly-back*.

Figura 29 - Conversor CC-CC *Fly-back*



Fonte: RASHID, 2014.

No primeiro modo de operação, com a chave em condução, inicialmente irá circular pelo primário do transformador uma tensão próxima de zero, passando somente uma corrente no primário do circuito.

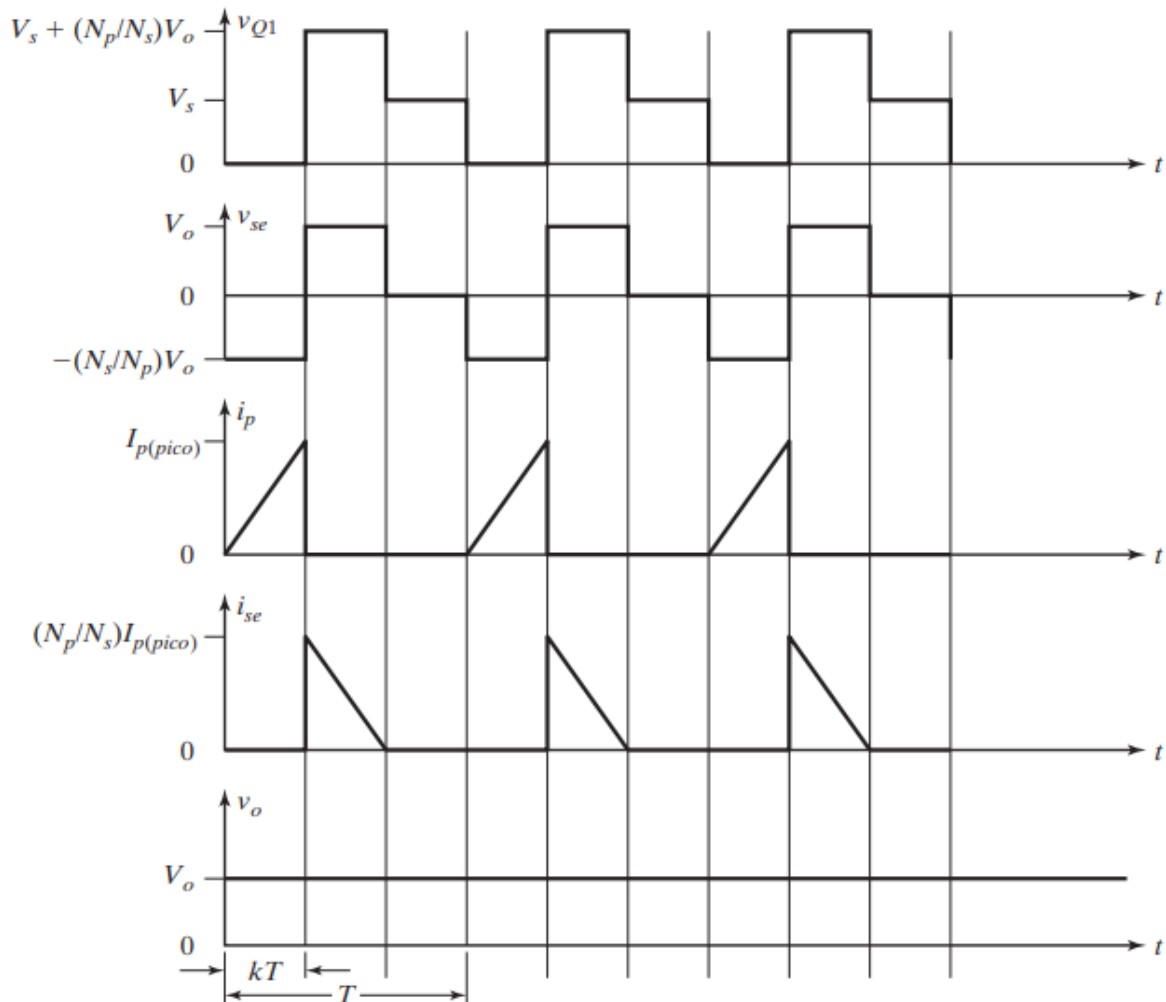
Já no secundário, haverá uma corrente nula acarretada pela inversão de polaridade do transformador *Fly-back*. Neste primeiro modo de operação, o transformador armazena energia no campo magnético no lado do primário (RASHID, 2014).

Já no segundo modo de operação, quando a chave está bloqueada, há uma tensão sobre o dispositivo, que é a tensão da fonte de entrada somada a tensão do secundário refletida na chave.

Ademais, a energia armazenada no transformador na primeira etapa de operação é transferida para o secundário, induzindo uma corrente no mesmo sentido que o diodo, fazendo ele entrar em condução, carregando também o capacitor de saída do circuito (RASHID, 2014).

A Figura 30 apresenta os formatos de onda da tensão sobre a chave, tensão no secundário, corrente no primário e corrente no secundário, respectivamente, durante os modos de operação do conversor *Fly-back*.

Figura 30 - Formas de onda conversor CC-CC *Fly-back*

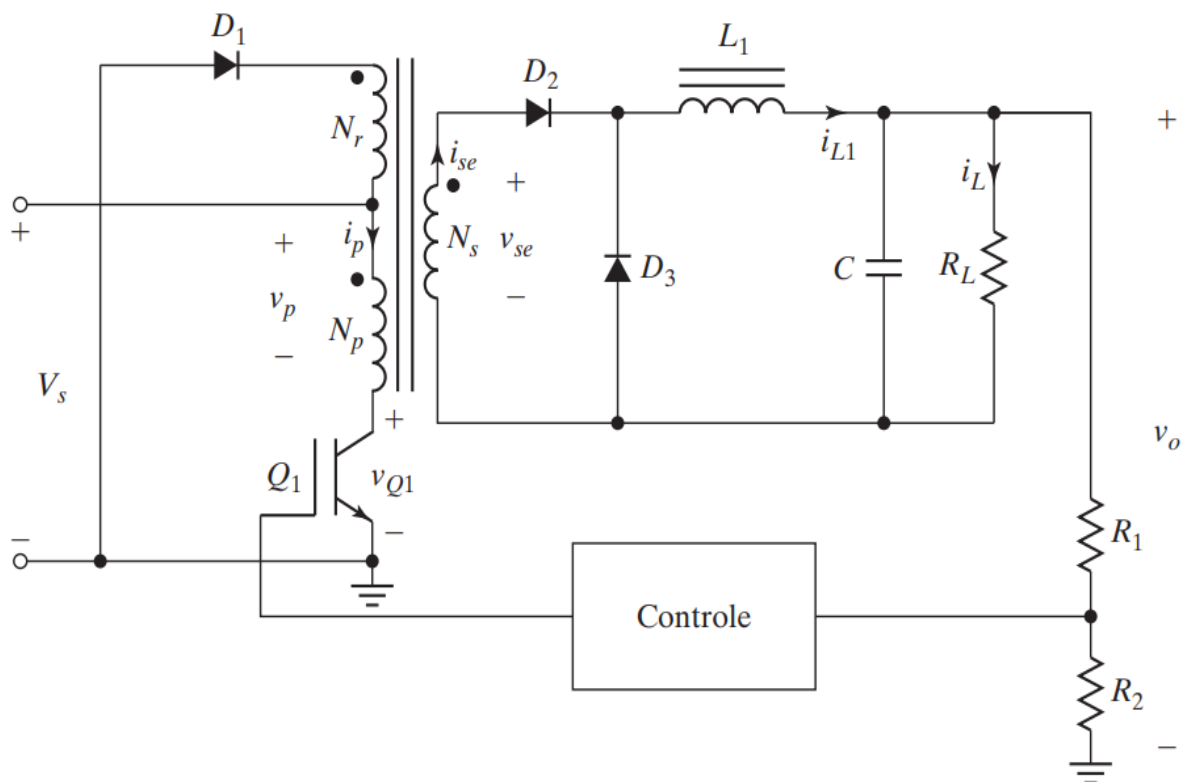


O conversor *Fly-back* é um dispositivo de baixo custo e relativamente simples quando comparado aos demais circuitos. Além disso, é comumente utilizado em aplicações que demandam potências inferiores a 100W e tensões elevadas de saída (RASHID, 2024).

2.5.5 Conversor CC-CC Forward

O conversor *Forward*, conhecido também como conversor direto, é um modelo de conversor isolado que foi elaborado a partir do conversor buck. Diferente do conversor *Fly-back*, o *Forward* possui um enrolamento de reinicialização, que consiste em devolver a energia armazenada nos enrolamentos do transformador para a fonte ao invés de transferir para o secundário como é feito no *Fly-back*, isso acaba por aumentar a eficiência do circuito (RASHID, 2014). A Figura 31 apresenta o circuito do conversor isolado CC-CC *Forward*.

Figura 31 - Conversor CC-CC *Forward*



Fonte: RASHID, 2014.

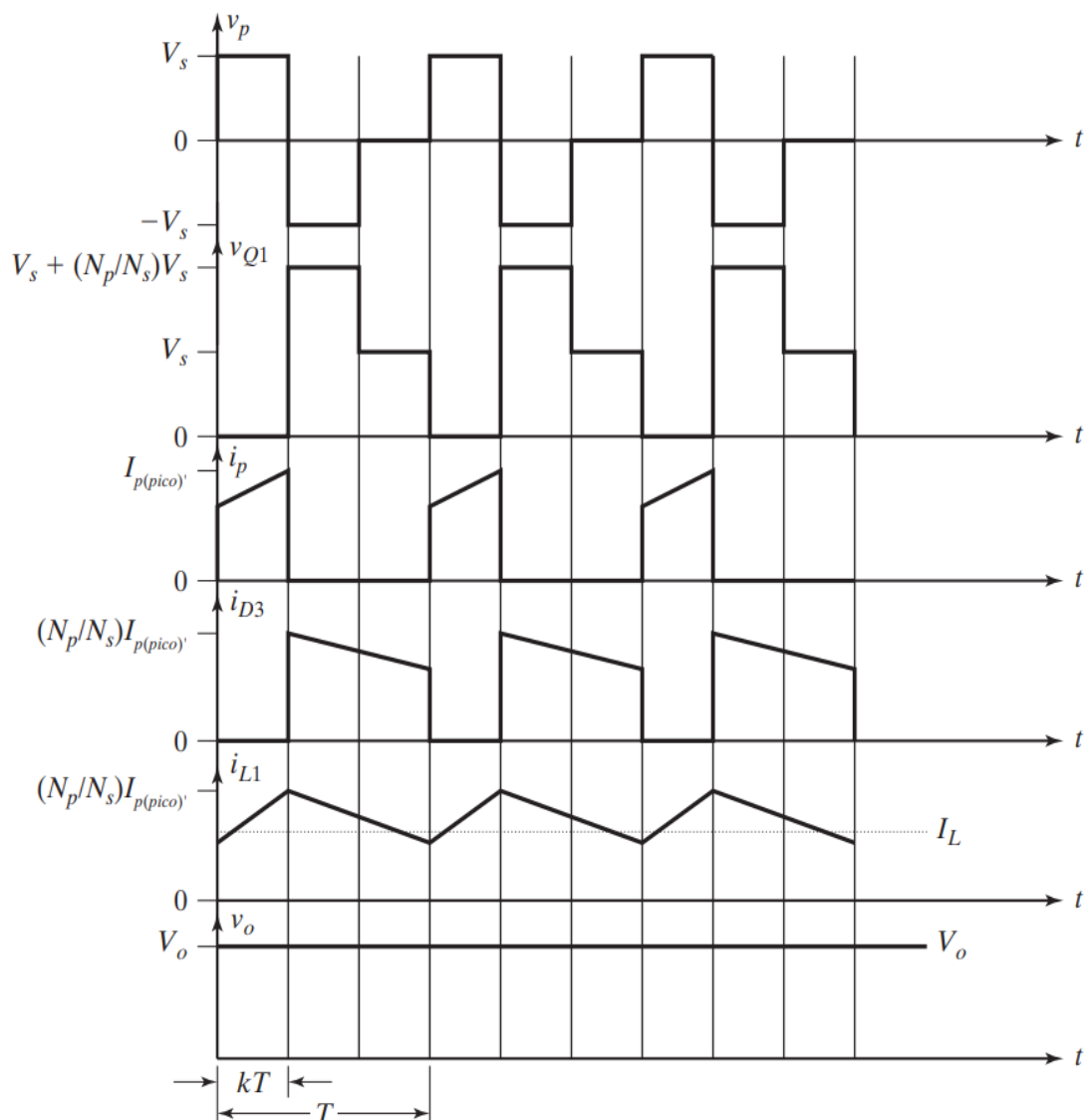
Em um primeiro momento, quando o transistor está em condução, a tensão no primário do transformador é a mesma tensão da fonte, com isso a corrente no primário irá aumentar, assim armazenando energia no primário do transformador. Ademais, a corrente no

primário transfere energia para o secundário através do diodo 2 que está polarizado diretamente (RASHID, 2014).

Já com o transistor em bloqueio, segundo Rashid (2014), os diodos 1 e 3 entram em condução, o diodo 1 com o objetivo de desmagnetizar o primário do transformador, e o diodo 3 manter a condução de corrente no secundário. Como o transformador não armazena energia como no *Fly-back*, quem irá realizar essa função no conversor *Forward* é principalmente o indutor de saída do circuito.

A Figura 31 apresenta os formatos de onda da tensão no primário do transformador, a tensão no transistor, a corrente no primário, corrente no diodo 3, a corrente no indutor e a tensão de saída do circuito, respectivamente.

Figura 32 - Formas de onda do conversor CC-CC *Forward*



Fonte: RASHID, 2014.

Além disso, vale ressaltar que para o conversor *forward* é recomendado em utilizações com potências de até 200W, pela incapacidade do transistor de lidar com esforços de corrente e tensão (RASHID, 2014).

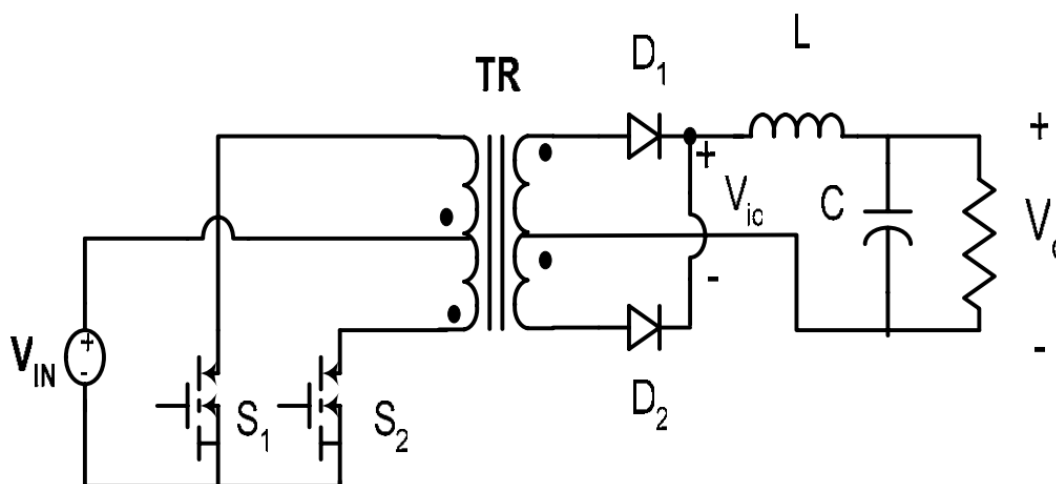
2.5.6 Conversor CC-CC *push-pull*

O conversor push-pull é, junto ao conversor *forward*, um derivado do direto, e tem sua operação típica de 150W a 500W de potência.

Quando a chave S2 está em operação, a energia é transferida para o secundário polarizando diretamente o diodo D1, que faz fluir uma corrente pelo indutor de filtro, quando a chave Q1 é fechada, há um período chamado off time, em que as duas chaves se encontram desligadas, dessa forma a energia armazenada no transformador é liberada e flui para o filtro.

Seguindo, quando a chave S1 está acionada, é induzida uma corrente sobre o diodo D2 que está polarizado diretamente, com a corrente assim sendo direcionada para o indutor de filtro (TODOROVIC, 2004). A Figura 33 apresenta o circuito elétrico referente ao conversor isolado CC-CC *Push-pull*.

Figura 33 - Conversor CC-CC *push-pull*



Fonte: TODOROVIC, 2004.

3 METODOLOGIA E IMPLEMENTAÇÃO

Neste capítulo é apresentada a topologia a ser utilizada para a realização do projeto de elaboração do conversor CC-CC.

O objetivo desta etapa é desenvolver um carregador de baterias eficiente através da modelagem de um conversor CC-CC de baixo custo do tipo *buck-boost* não inversor. Esta topologia combina as topologias *Buck* e *Boost* em um único circuito, permitindo tanto a redução quanto a elevação de tensão, de acordo com os parâmetros de entrada do sistema, com seu controle podendo ser realizado por sinais PWM de um microcontrolador, e por ser uma topologia de baixo custo, apresenta certa competitividade em relação aos dispositivos existentes para o controle de carga de baterias estacionárias.

Dessa forma, o projeto não se baseia somente nos fundamentos da eletrônica de potência, mas busca também soluções práticas e aplicáveis em sistemas em que o controle do correto carregamento de baterias é necessário.

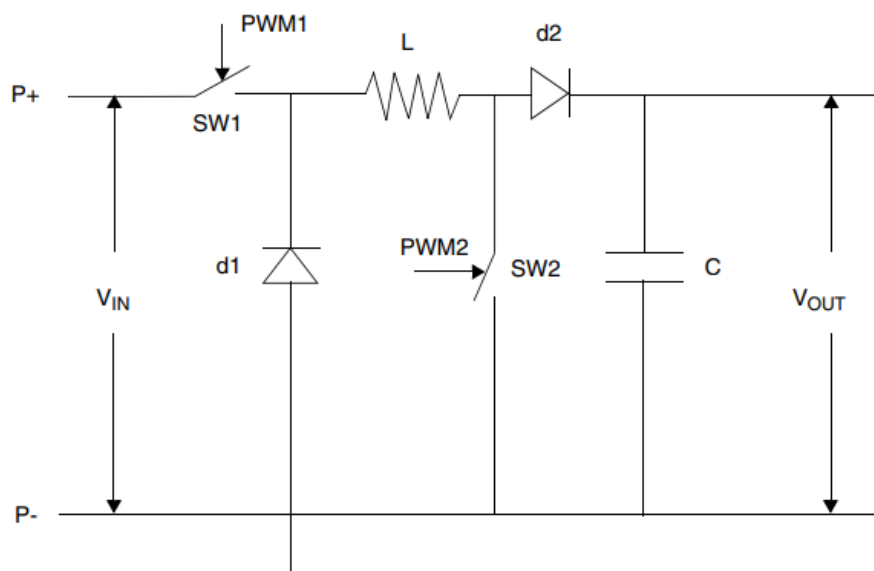
3.1 Conversor buck-boost não inversor

Como visto, os conversores CC-CC são dispositivos que consistem em converter determinada corrente ou tensão para um nível diferente, combinando normalmente um indutor e um capacitor. A topologia escolhida para elaboração do projeto é um conversor *buck-boost* modificado para adequar os parâmetros de saída de acordo com a variação dos parâmetros de entrada, porém de forma não inversa, diferente do conversor *buck-boost* tradicional.

Esta topologia por não inverter a tensão de saída, evita problemas de carregamento das baterias estacionárias relacionadas ao barramento CC, podendo ter uma ampla faixa de tensão de entrada podendo operar como buck ou boost de forma automática. A topologia do conversor *buck-boost* não inversor a ser implementado possui quatro diretrizes de operação:

- a) a frequência de chaveamento deve ser as mesmas nos dois sinais PWM;
- b) a razão cíclica da chave SW1 deve ser maior do que a razão da chave SW2;
- c) o sinal PWM1 deve ser habilitado antes do sinal PWM2;
- d) o sinal PWM1 deve ser desabilitado após o sinal PWM2.

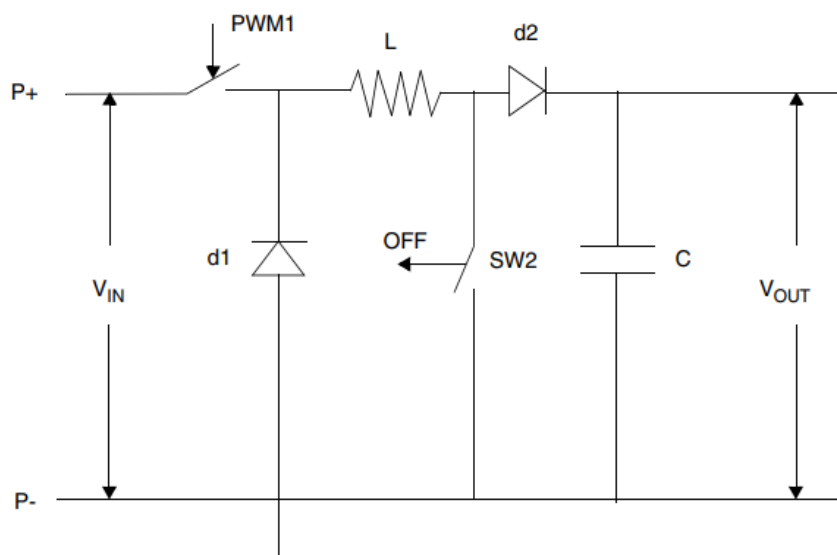
A Figura 34 apresenta o circuito elétrico do conversor adotado, destacando os dispositivos de chaveamento, que terão sua utilização de acordo com o modo de atuação, podendo ser *buck* ou *boost*.

Figura 34 - Conversor *buck-boost* modificado

Fonte: STMICROELECTRONICS, 2007.

3.1.1 Implementação do conversor *Buck*

Para a implementação do conversor *buck* na topologia escolhida, é preciso manter a chave SW2 em aberto durante toda a etapa de utilização, enquanto o dispositivo SW1 é chaveado com razão cíclica D1, de acordo com a definição dos parâmetros de projeto. A Figura 35 detalha o conversor atuando no modo *buck*.

Figura 35 - Implementação do modo *Buck*

Fonte: STMICROELECTRONICS, 2007.

A equação que relaciona a tensão de saída do conversor e a razão cíclica D_1 do sinal PWM do dispositivo SW1 é dada por:

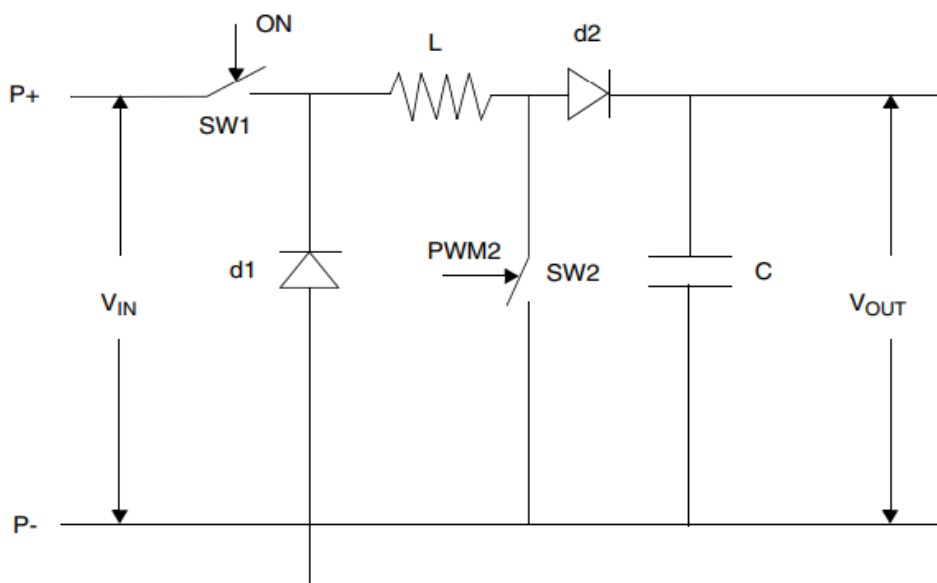
$$V_{out} = V_{in} \cdot D_1 - V_{d1}(1 - D_1) - V_{d2} \quad (16)$$

Nesta equação, V_{out} é a tensão de saída, V_{in} é a tensão de entrada, V_{d1} é a queda de tensão no diodo d1, V_{d2} é a queda de tensão no diodo d2, e D_1 é o ciclo de trabalho do dispositivo de chaveamento SW1. Dessa forma, é possível calcular os valores de razão cíclica máximos para o modo de operação do circuito elétrico proposto como *buck*.

3.1.2 Implementação do conversor Boost

Ademais, quando a tensão inicial do circuito for menor do que a tensão de saída, o conversor deve operar em modo *Boost*, mantendo a chave SW1 fechada durante todo o tempo, enquanto a chave SW2 é chaveada conforme a necessidade de saída do sistema. A Figura 36 apresenta o conversor utilizado atuando no modo *boost*, com destaque para a utilização das duas chaves.

Figura 36 - Implementação do modo *Boost*



Fonte: STMICROELECTRONICS, 2007.

A formulação para definição da razão cíclica de acordo com a tensão de saída do projeto é dada por:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{(1 - D_2)} - V_{d2} \quad (17)$$

Nessa equação, D_2 se refere ao ciclo de trabalho (*duty cycle*) do dispositivo de chaveamento SW2. Assim, conclui-se a definição dos ciclos de trabalho do conversor operando nos dois modos propostos.

3.1.3 Cálculo do indutor

De acordo com a STMicroelectronics (2007) , a indutância mínima do projeto deve ser calculada através de duas fórmulas diferentes, e após isso, selecionar a indutância com maior valor para garantir o correto funcionamento em ambos os modos de operação do sistema. A primeira equação leva em consideração a tensão de saturação nos transistores de potência, e é dada por:

$$L_{min} = \frac{T \cdot [(V_{in} - V_{sat1}) \cdot D_1 - V_{sat2} \cdot D_2 - V_{out} \cdot (D_1 - D_2)]}{2 \cdot I_{out}} \quad (18)$$

Nessa fórmula, T é o período do sinal de chaveamento, V_{sat1} é a queda de tensão de saturação no transistor SW1, V_{sat2} é a queda de tensão de saturação no transistor SW2, I_{out} é a corrente máxima de saída do circuito, e D_1 e D_2 são as razões cíclicas dos componentes de chaveamento 1 e 2, respectivamente. De forma complementar, a segunda formulação para calcular o valor mínimo do indutor de filtro é dada por:

$$L_{min} = \frac{T \cdot (V_{d1} + V_{out}) \cdot (1 - D_1)}{2 \cdot I_{out}} \quad (19)$$

Em que V_{d1} e V_{d2} são as quedas de tensão sobre os diodos 1 e 2, respectivamente. Para o modo de operação em condução contínua, é necessário que a corrente no indutor seja sempre positiva (HART, 2011).

3.1.4 Cálculo do capacitor

Segundo Hart (2011), os capacitores de projeto de eletrônica de potência devem ser escolhidos com o intuito de limitar a ondulação da tensão de saída conforme especificado no

projeto. A nota de aplicação do conversor a ser implementado garante uma variação menor ou igual a 1% da tensão de saída, sendo assim, mais do que suficiente para elaboração do projeto (STMICROELECTRONICS, 2007).

$$C_{min} = \frac{100 \cdot I_{out} \cdot (1 - D_1) \cdot T}{V_{out}} \quad (20)$$

Ademais, na prática, são utilizados valores acima do que foram calculados pelas fórmulas apresentadas, com o objetivo de melhorar a segurança e o desempenho do conversor (STMICROELECTRONICS, 2007).

3.2 Considerações finais

Este capítulo abordou o método de obtenção utilizado para calcular os valores das variáveis necessárias para a elaboração do projeto do conversor *buck-boost* modificado para o carregamento de baterias estacionárias através de um alternador. O conversor foi escolhido pelo fato de conseguir controlar a tensão de acordo com o sinal proveniente do alternador, que pode apresentar um valor regulado, porém não controlado.

Além disso, o correto dimensionamento dos componentes do circuito contribui para um carregamento eficiente dessas baterias, uma vez que o controle evita subcarga e sobrecarga no armazenador, o que protege a vida útil do componente.

Diante do que foi apresentado durante o capítulo, utilizando o software MATLAB foram calculados os valores do indutor e capacitor de filtro para o caso mais crítico de utilização do conversor, garantindo que os componentes serão eficientes mediante à variação dos parâmetros de entrada do sistema (APÊNDICE A).

De forma análoga, em relação aos dados obtidos pelo cálculo dos parâmetros do projeto, a indutância mínima a ser utilizada deve ser de 2,25uH, enquanto a capacitância mínima de filtro deve ter o valor de 7,8mF, em que os cálculos realizados junto aos parâmetros utilizados são apresentados no APÊNDICE A. Ademais, conforme solicitado pelo próprio autor da nota de aplicação do circuito, é recomendável ajustar para cima os valores dos componentes calculados, sendo assim, para a realização do projeto será utilizado um indutor de 3,6uH, enquanto o capacitor de filtro terá o valor de 8,8mF.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta a elaboração e o desenvolvimento do projeto proposto, com realização dos cálculos e dos sistemas de controle do carregador de baterias proposto, seguido dos resultados obtidos através das simulações realizadas através dos softwares MATLAB e *Simulink*.

4.1 Especificações do projeto

Como exposto inicialmente, a diferença de potencial fornecida pelos alternadores dos veículos, é uma tensão constante, não controlada adequadamente para o carregamento de baterias estacionárias, utilizada somente para o carregamento das baterias de arranque.

Quando tratamos de veículos recreativos, além da bateria de arranque, os motorhomes possuem uma ou um banco de baterias estacionárias para suprir as cargas da casa. Entretanto, estas baterias necessitam de um controle quanto ao seu carregamento, não é viável recarregar esses acumuladores com uma tensão e corrente constante do início ao fim, pois prejudicaria a vida útil da bateria necessitando de trocas em um tempo mais curto quando comparado ao correto carregamento.

Diante disso, o presente projeto visa com o conversor CC-CC junto ao controle do mesmo fornecer as grandezas necessárias para o correto carregamento das baterias estacionárias. O fluxograma da Figura 38 explica o funcionamento do projeto de acordo com o que foi explicado. A seguinte tabela apresenta as especificações de projeto, obtidas através dos cálculos realizados anteriormente com as informações obtidas da nota de aplicação do circuito escolhido.

Tabela 1 - Especificações de projeto

Parâmetro	Valor	Descrição
V_{in}	8~16V	Tensão de entrada
V_{out}	14,4V	Tensão de saída
I_{out}	60A	Corrente máxima de saída
f_{chav}	25000 Hz	Frequência de chaveamento
L_o	3,6uH	Indutor de filtro
C_o	8,8mF	Capacitor de filtro
BAT	Estacionária Chumbo-Ácido 220Ah	Modelo da bateria

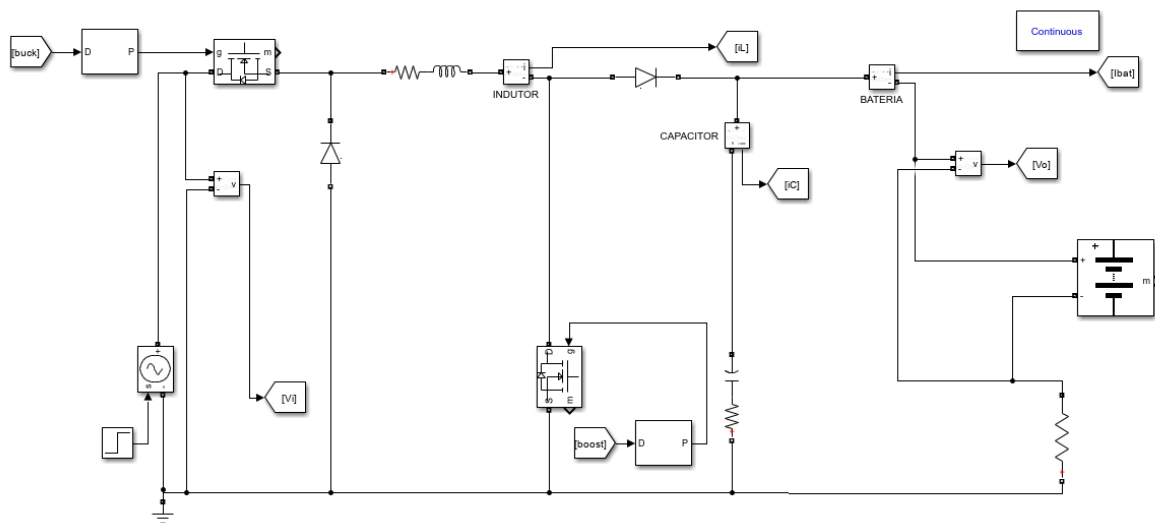
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Além da elaboração e dimensionamento do circuito de eletrônica de potência, para o controle do conversor foi necessário a elaboração das malhas de controle de acordo com os modos de funcionamento do conversor para que as baterias sejam carregadas de forma correta conforme orientação dos fabricantes.

Na prática, é fundamental controlar as componentes de saída do conversor a fim de garantir uma tensão e uma corrente controladas na bateria. O controle em malha fechada é um sistema fundamental para o desenvolvimento deste projeto, visto que para o correto carregamento das baterias estacionárias uma resposta dinâmica rápida e a precisão do sistema são fundamentais (RASHID, 2014). O método adotado para o conversor CC-CC é o controle em cascata, que combina um controlador primário e um secundário em série com a finalidade de controlar duas ou mais variáveis de um processo.

O sistema é composto por um controlador primário, também chamado de mestre, e um sistema secundário, conhecido como escravo. O controlador mestre possui uma referência independente enquanto o escravo depende do controlador primário para controlar a saída do processo (ELLER, 2025). A Figura 37 apresenta o esquema de montagem do conversor adotado no *software* Simulink utilizado para a simulação e obtenção dos resultados.

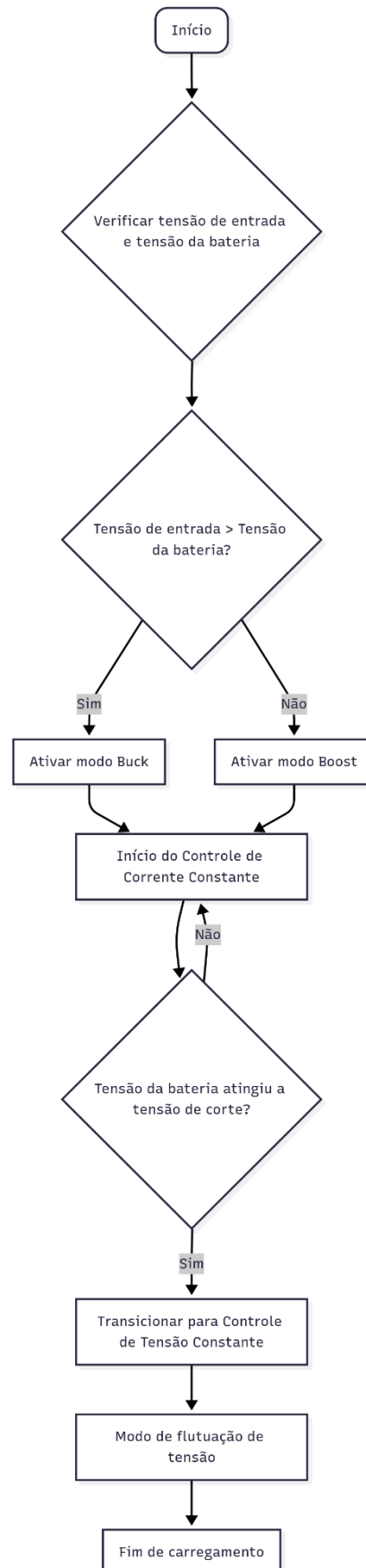
Figura 37 - Circuito conversor CC-CC *buck-boost* não inversor simulado



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A Figura 38 apresenta o fluxograma com as etapas de funcionamento do projeto do conversor realizado.

Figura 38 - Fluxograma de operação do conversor



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Além disso, as funções de transferências das plantas da malha externa, que relacionam a tensão de saída do conversor com a corrente de carga, são necessárias para completar o controle em cascata.

Do mesmo modo, devem ser elaboradas duas funções de transferências para o conversor, visto que pode atuar como *buck* e *boost*, apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Funções de Transferência $V_o(s)/i_L(s)$

Conversor	Equações
Buck	$G_i(s) = \frac{R}{sRC + 1}$
Boost	$G_i(s) = \frac{1}{(1 - D)} \frac{-sL + R(1 - D)^2}{sRC + 2}$

Fonte: Côrtes, 2021.

Após obter as funções de transferência no domínio de Laplace que representam as plantas, os controladores PI devem ser calculados a fim de se obter os ganhos referentes ao conversor CC-CC proposto para uma boa resposta dinâmica.

Inicialmente, para realizar os cálculos do controle das malhas do circuito, é necessário determinar a margem de ganho e fase desejadas. A malha interna do controle deve ser mais rápida em relação à malha externa, assim, uma margem de segurança usual é utilizar a frequência de corte desta malha uma década abaixo da frequência de chaveamento dos dispositivos comutadores do circuito do conversor CC-CC. Visto isso, para a malha externa, é usual utilizar uma frequência de corte uma década abaixo da frequência de corte da malha interna, visto que são mais lentas em relação à malha de corrente, ainda assim com uma boa margem de segurança evitando instabilidade e ruídos de comutação.

Ademais, a margem de fase dos circuitos de controle de corrente e tensão usualmente são definidas de 70°-90°, sendo um sistema mais estável e amortecido, evitando sobressinais, pois quanto menor a margem de fase do controle, mais rápida e maior o sobressinal atingido. Uma margem de 70° a 90° garante que não haverá nenhuma sobrecorrente e sobretensão no chaveamento do circuito.

Para determinar os ganhos integrais e proporcionais de acordo com as margens de ganho e fase desejados foi utilizado o software Matlab (APÊNDICE B). A magnitude e a fase dos sistemas foram calculadas inicialmente definindo a frequência de corte e a margem de fase desejadas. O código foi elaborado com base na definição da frequência em que o ganho é igual

a um, utilizando a frequência de corte desejada para definir um ganho unitário. Para isso, o atraso da fase da função de transferência de malha aberta é necessariamente menor do que 180° , tornando o sistema de malha fechada estável (MOHAN, 2018).

Com isso, através do código desenvolvido no software Matlab foi possível calcular os ganhos proporcionais e integrais para os dois modos de operação do conversor CC-CC em estudo, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.

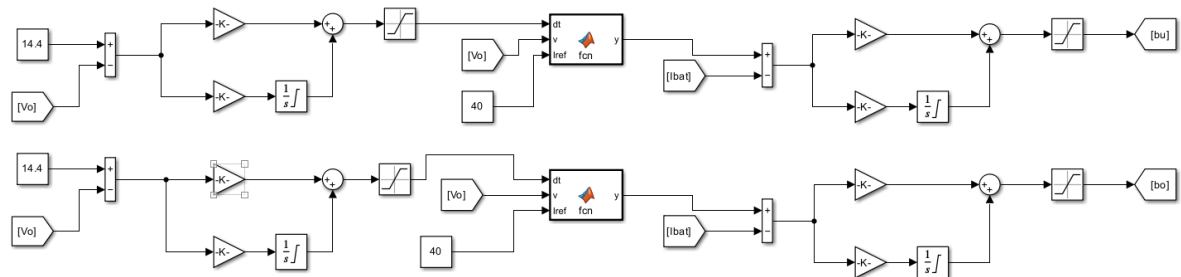
Tabela 4 - Ganhos do conversor

Conversor	Controle de corrente	Controle de Tensão
Buck	$K_p = 0.0015822$; $K_i = 4.2436$	$K_p = 3.1416$; $K_i = 6829.5$
Boost	$K_p = 0.0031234$; $K_i = 3.3936$	$K_p = 4.2731$; $K_i = 2.5745e+04$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Obtidos os ganhos do sistema, foi possível realizar a lógica de controle do circuito do conversor CC-CC para os dois modos de operação, tanto *boost* como *buck* de acordo com a Figura 40. Com isso, o circuito consegue alternar entre o controle de corrente e tensão para melhor atender a curva de carregamento da bateria.

Figura 40 - Malhas de controle do conversor



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

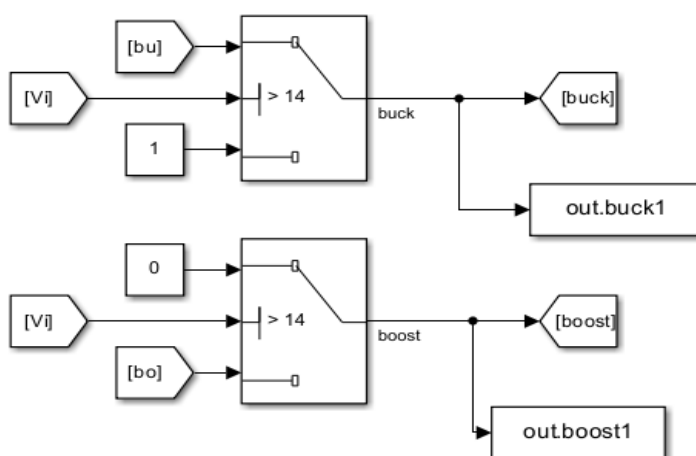
Pela Figura 40 é possível perceber que durante o controle de corrente, a bateria permanece com 40 amperes, escolhida dentro da faixa de corrente projetada, até o instante em que o estado de carga atinge 100%. Após isso, é ativado o modo de controle de tensão, em que o controle em cascata é implementado, utilizando a tensão de saída do circuito para a realimentação e seguir a tensão de referência em 14,4V. Importante ressaltar que foram utilizados blocos saturadores na simulação para evitar que as correntes e ciclos de trabalho

ultrapassem os limites estipulados no projeto, sendo 40 amperes de corrente máxima de saída e o ciclo de trabalho deve estar entre zero e um conforme a topologia adotada.

Para alternar entre o modo de controle de tensão e corrente foi utilizado o bloco MATLAB function para que seja adicionada a condição para alternar entre os modos (APÊNDICE C). Desse modo, quando a tensão na bateria atinge 14,4V o sistema de controle da tensão é ativado, e quando a tensão do circuito atinge um valor inferior a 14,1V, o sistema volta a controlar a corrente de carregamento da bateria.

Ademais, para controlar os dispositivos de chaveamento conforme sugere a topologia, foi criada uma lógica de alternância para os ciclos de trabalho que alimentam os blocos PWM das chaves, cujos diagramas de blocos são apresentados na Figura 41.

Figura 41 - Controle de chaveamento do conversor CC-CC



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4.1.2 Simulação do conversor CC-CC buck/boost não inversor

Durante os testes realizados com o conversor CC-CC, foi realizada a simulação com os dois modos de operação do circuito. Enquanto a tensão de entrada está entre 8V e 14V, o conversor atuou como *boost*, e enquanto a tensão é superior a 14V e inferior a 16V o modo de operação *buck* foi atuado. Além disso, para os dois modos, o método de carregamento da bateria escolhido foi corrente constante - tensão constante.

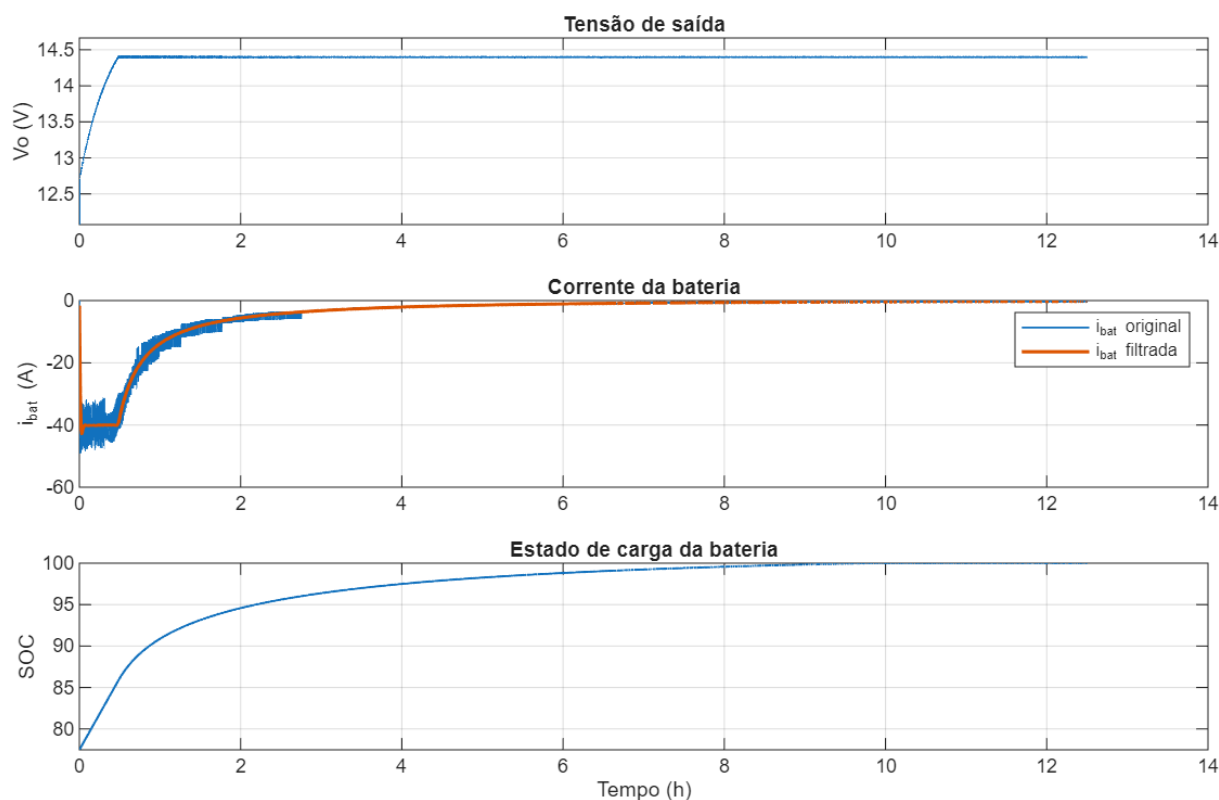
Durante o ciclo de carga com o conversor atuando no modo *buck*, o controlador tem como objetivo manter uma corrente constante até um valor de tensão de referência especificado, e a partir do momento que a tensão atinge este valor de referência o controlador passa a manter essa tensão constante, reduzindo a corrente do circuito.

Para a implementação do conversor foi utilizado o software MATLAB/Simulink. Durante os testes realizados foi verificado que a quantidade de dados gerada no modo contínuo junto ao tempo de execução, tornava-se inviável a simulação neste modo devido às limitações de memória do computador.

Dessa forma, foi utilizado o modo discreto, com um passo de tempo adequado de 5e-6 segundos para manter a estabilidade e fidelidade dos resultados em modo contínuo. Além disso, os sinais obtidos apresentavam ruídos por causa do circuito no modo discreto apresentar erros numéricos pela forma de simulação. Com isso, foi utilizado um filtro suavizador a fim de se obter a média móvel dos valores, permitindo a visualização dos valores das grandezas medidas com o objetivo de se obter o comportamento dos sinais sem a interferência do modo de operação.

A seguir na Figura 42 os sinais de tensão, corrente filtrada e estado de carga da bateria foram plotados para análise comparativa.

Figura 42 - Simulação (Etapa Buck)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

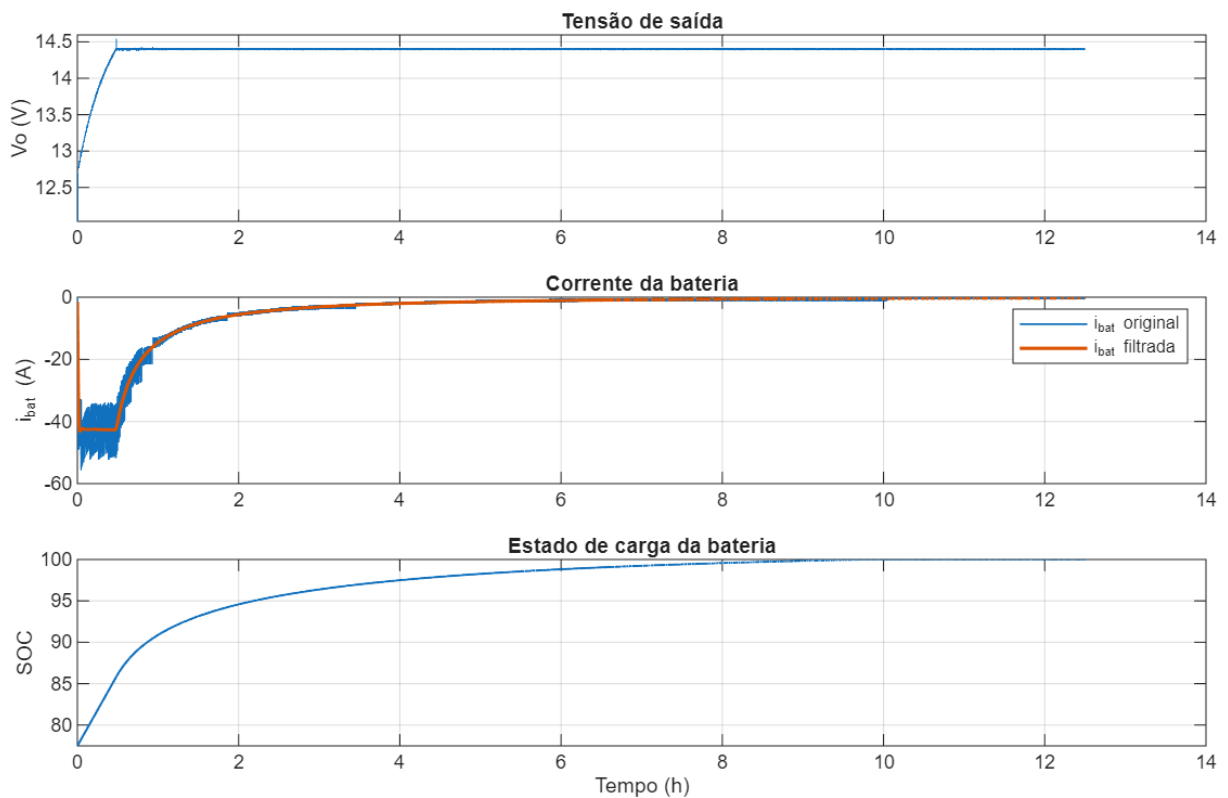
Vale ressaltar que o SoC inicial da bateria foi setada para 75% e a alternância entre os modos quando a tensão da bateria atinge 14,4V, momento em que as baterias estacionárias

de 220Ah apresentam seu carregamento completo, a partir disso a corrente vai para aproximadamente zero amperes, conforme dimensionamento do sistema de controle.

A tensão de entrada do circuito operando como *boost* foi fixada em 8V, sendo o limite máximo de tensão de entrada do circuito do conversor CC-CC. Dessa forma, quando a bateria é completamente carregada, o carregamento entra em modo de flutuação, mantendo a tensão da bateria constante ajustada através de uma corrente baixa.

Ademais, da mesma forma que o conversor carrega as baterias pelo modo *buck*, o modo *boost* também utiliza da mesma forma de controle e seus resultados são apresentados na Figura 43. Para realização da simulação no modo *boost* o estado de carga inicial da bateria foi de 75%, para que seja visualizado o tempo certo de transição entre os modos de corrente constante e tensão constante simulado diretamente no modo contínuo, diferente da simulação do conversor CC-CC no modo *buck*.

Figura 43 - Simulação (Etapa Boost)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

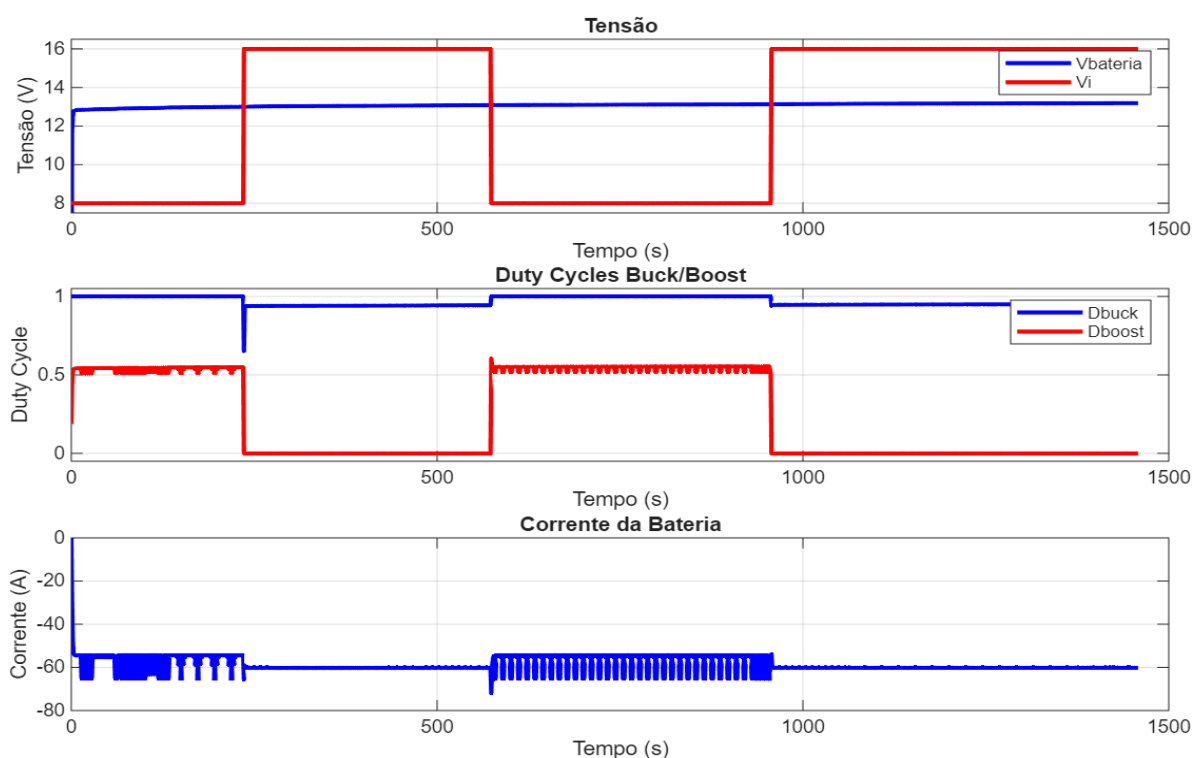
A operação no modo *boost* se apresentou satisfatória, controlando novamente os sinais de tensão e corrente do circuito do conversor para se manterem nos valores de projeto de modo a carregar o acumulador da forma correta. Ademais, para demonstrar a alternância entre

o chaveamento dos dois modos de operação, a tensão foi alternada entre os dois valores extremos para verificar a atuação dos dispositivos de chaveamento presentes no circuito.

Os testes foram realizados com a carga da bateria em aproximadamente 75%, enquanto o valor estipulado para a corrente foi de 40 amperes. Vale ressaltar também que as simulações tiveram 45000 segundos, o que equivale a 12,5 horas de simulação. Assim, com a bateria em aproximadamente 75% carregada até 100%, o tempo de carregamento foi 12,5 horas. Ademais, foi verificado que os comandos responsáveis pela troca do modo de operação funcionam corretamente conforme a alternância entre as tensões de entrada do sistema. De forma análoga, quando o conversor CC-CC atuar como abaixador, o *duty cycle* do PWM 1 irá controlar a tensão de saída enquanto o PWM 2 deve estar em aberto, ou seja, o ciclo de trabalho será zero.

Ademais, enquanto o conversor estiver no modo elevador, o PWM1 fica completamente fechado, com o ciclo de trabalho fixo em 1, enquanto o PWM 2 é utilizado para regular a tensão e a corrente de saída do circuito conforme o estipulado no início do projeto.

Figura 44 - Alternância de modos do conversor



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Importante ressaltar que a corrente utilizada para a simulação da Figura 44 foi de 60A, ainda dentro do limite máximo de corrente que foi projetado inicialmente. A simulação

dos dois modos de operação do conversor CC-CC *buck/boost* não inversor proposto é apresentada na Figura 44 e demonstra que o sistema funcionou conforme as entradas e comandos do circuito, apresentando resultados satisfatórios em sua aplicação para o carregamento de baterias estacionárias, cumprindo os requisitos comumente predefinidos pelas fabricantes, em que a tensão de carregamento deve ter no máximo 1% de ripple, enquanto a corrente pode atingir até 5%.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um conversor CC-CC para ser utilizado no carregamento de baterias estacionárias em veículos recreativos, utilizando o próprio alternador como fonte de entrada do circuito. Além disso, o desenvolvimento do projeto foi focado em buscar uma solução de baixo custo e que contribua com a redução dos custos de manutenção com o carregamento eficiente dos componentes.

Para a realização do carregamento das baterias estacionárias foi identificada a necessidade do desenvolvimento de um conversor CC-CC que possa carregar a bateria estacionária de forma correta, capaz de facilitar o fluxo de energia para o carregamento da bateria estacionária e adaptando de acordo com as demandas do sistema, com isso foi possível realizar a seleção correta de uma topologia adequada para a aplicação do sistema, considerando os parâmetros de entrada e demais requisitos de projeto.

Com isso, foi realizado o desenvolvimento do conversor CC-CC *Buck/Boost* não inversor, de forma que fosse realizado o correto dimensionamento dos principais componentes do sistema, além da análise do comportamento do circuito em regime permanente para ambos os casos de operação. As análises feitas em ambiente de simulação permitiram o estudo e a compreensão do funcionamento do sistema. A interação do conversor, da bateria e do sistema de controle permitiram a validação do projeto, apresentando que em ambos os modos de funcionamento do conversor, tanto *buck* quanto *boost*, o circuito apresentou resultados satisfatórios.

Com as simulações foi possível apresentar que o circuito obteve desempenho estável e seguro para realizar o carregamento de baterias estacionárias de chumbo ácido, o que é fundamental para a redução de custos relacionados à manutenção deste sistema em veículos de recreação além do aumento da vida útil das baterias.

Além disso, este estudo proporcionou a aquisição de competências em sistemas de armazenamento de energia, tecnologias de baterias, topologias de conversores CC-CC e sistemas de controle, além de aprimorar habilidades em sistemas de simulações computacionais utilizando o Matlab.

5.1 Trabalhos Futuros

Após a realização do projeto matemático e teste computacional do conversor *Buck/Boost* não inversor, as seguintes sugestões para trabalhos futuros são propostas.

- Desenvolvimento do protótipo do conversor, implementando o projeto para atuar como controlador de carga de uma bateria real, realizando testes de campo para validar o desempenho do sistema e identificar pontos de melhoria.
- Estudo de formas de melhorar a eficiência do conversor afim de reduzir perdas de energia durante o processo de carga dos acumuladores.
- Análise de controladores mais avançados, como controle PID digital, controle por modos deslizantes ou métodos de controle adaptativo, com o objetivo de aprimorar a resposta dinâmica e a estabilidade do sistema.
- Ajuste do conversor para uso em sistemas solares ou eólicos, permitindo o carregamento de baterias com energia originada de fontes sustentáveis.
- Análise experimental do efeito do método de carregamento na vida útil das baterias estacionárias, com o objetivo de encontrar estratégias para estender sua durabilidade.

REFERÊNCIAS

- ANTAS, K. C. **Análise sobre sistemas de gerenciamento de baterias**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.
- BARANDAS, A. P. M. G., VALVERDE JR., Ivam Macedo; AFONSO, Júlio Carlos; MANTOVANO, José Luiz; CUNHA, José Waldemar Silva Dias da. **Recuperação de cádmio de baterias níquel-cádmio via extração seletiva com tributilfosfato (TBP)**. Química Nova, v. 30, n. 3, p. 639-642, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000300035>. Acesso em: 01 abr. 2025.
- BIRKL, C. R. et al. **A parametric open circuit voltage model for lithium ion batteries**. Journal of The Electrochemical Society, v. 162, n. 12, p. A2271-A2280, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1149/2.0331512jes>.
- BOCCHI, N; FERRACIN, L.C; BIAGGIO, S.R. **Pilhas e Baterias: Funcionamento e impacto ambiental**. Química Nova Escola. Nº 11. 2020.
- BRAGA, N. C. **Como funcionam os alternadores**. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/automotiva/709-como-funciona-os-alternadores-art094.html>. Acesso em: 9 abr. 2025.
- BUCHMANN, I. **Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers**. 4. ed. Richmond, BC: Cadex Electronics, 2017.
- COMPRACO. **Como funcionam as baterias recarregáveis e os ciclos de carga e descarga**. Compraco – Soluções e Tecnologias, [2024]. Disponível em: <https://compraco.com.br/blogs/tecnologia-e-desenvolvimento/como-funcionam-as-baterias-recarregaveis-e-os-ciclos-de-carga-e-descarga>. Acesso em: 30 dez. 2025.
- CÔRTEZ, Luís Ricardo Cândido. **Modelagem de conversores CC-CC: funções de transferência para controle de corrente e/ou tensão das clássicas topologias de conversores CC-CC**. Uberlândia, 2021. Universidade Federal de Uberlândia (UFU).
- DIJO AUTO PEÇAS. **Qual a função do alternador? Para que serve?**. Dijo Auto Peças, 2019. Disponível em: <https://dijo.com.br/2019/06/26/dicas-alternador/>. Acesso em: 27 dez. 2025.

ELBER AUTOMOTIVE. **Sistema elétrico do motorhome: como funciona e o que precisa ter**. Elber Automotive, 2022. Disponível em: <<https://elber.ind.br/sistema-eletrico-do-motorhome/>>. Acesso em: 27 dez. 2025.

ELLER, D. **Controle em cascata: entenda o que é e como funciona esse sistema de regulação**. Velki – Instrumentos de Medição e Controle. Disponível em: <https://velki.com.br/pt/blog/aprenda-com-a-velki/controle-em-cascata---entenda-o-que-e-e-como-funciona-esse-sistema-de-regulagem>. Acesso em: 22 set. 2025.

ENERGSOFT. **How to choose the right battery for your battery parameters?** Energsoft Blog About AI and Batteries, 2023. Disponível em: <<https://energsoft.com/blog/f/how-to-choose-the-right-battery-for-your-battery-parameters>>. Acesso em: 27 dez. 2025.

HART, D. W. **Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos**. Tradução de Antonio Pertence Júnior e Romeu Abdo. Porto Alegre: AMGH Editora, 2011.

HELIAR. **Alternador de carro: entenda como funciona!**. Disponível em: <https://www.heliar.com/blog/heliar-blog/alternador-de-carro>. Acesso em: 9 abr. 2025.

INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS. Rede de Bibliotecas. **Manual de normalização de trabalhos acadêmicos**. Belo Horizonte: IFMG, 2020. Disponível em: <https://www2.ifmg.edu.br/portal/ensino/bibliotecas/manual-de-normalizacao-do-ifmg>. Acesso em: 24 de mar. 2025.

KOSURU, V. S. **DC-DC converter and its use in electric vehicles**. Power Electronics News, 28 mar. 2023. Disponível em: <https://www.powerelectronicsnews.com/dc-dc-converter-and-its-use-in-electric-vehicles/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

LINDEN, T. B. R. D. **Handbook of Batteries**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2002.

LINDEN, D.; REDDY, T. B. **Handbook of Batteries**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

MAGNETI MARELLI. **Manual Técnico Bateria Estacionária: nobreak estacionária**. [S.l.]: Magneti Marelli Parts & Services, [2017]. 33 p.

MICHELINI, A. **Baterias De Lítio**. Sistema E Tecnologia Aplicada. 2020. Disponível em: <<https://www.sta-eletronica.com.br/resources/downloads/ebookbateriasdelitio.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2025.

MICHELINI, E. **Baterias Recarregáveis para Equipamentos Portáteis**. [S.l.]: S.T.A. – Sistemas e Tecnologia Aplicada Ind. Com. LTDA., 2017.

MIDTRONICS. **A contagem de ciclos é importante para determinar a vida útil da bateria**. Midtronics, 5 jun. 2023. Disponível em: <<https://www.midtronics.com/pt/blog/is-cycle-count-important-in-determining-battery-life/>>. Acesso em: 27 dez. 2025.

MOHAN, Ned. **Máquinas elétricas e acionamentos: curso introdutório**. Rio de Janeiro: LTC, 2018. 239p.

MOSELEY, P. T.; GARCHE, J.; PARKER, C. D.; RAND, D. A. J.; **Valve-regulated lead-acid batteries**. 1a. Ed. Elsevier Science, 2004.

OLIVEIRA, G. **Fonte ou carregador? Qual produto utilizar na hora de carregar uma bateria**. *Proauto Electric*, 2019. Disponível em: <https://proauto-electric.com/fonte-ou-carregador-qual-produto-utilizar-na-hora-de-carregar-uma-bateria/>. Acesso em: 4 set. 2025.

PALHARES, G. L. **Transportes turísticos**. São Paulo: Aleph, 2002.

PAVLOV, D. **Lead-Acid Batteries Science and Technology: A handbook of leadacid battery technology and its influence on the product**. Amsterdam: Elsevier, 2011. 643 p.

PETRY, C. A. **Curso básico de eletrônica de potência**. Apostila. 2014. Disponível em: <<http://www.professorpetry.com.br/>>. Acesso em: 27 dez. 2025.

PETRY, C. A. **Introdução aos conversores CC-CC**. Instituto de Eletrônica de potência – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

PINTO, E. M., CARNEIRO, Rafael Luiz; MOLINA, João Henrique Alves; MAGDALENA, Aroldo Geraldo; ANTONIASSI, Beatriz. **Baterias chumbo-ácido**. Revista Virtual de Química, v. 9, n. 3, 08 jun. 2017. Disponível em: <<https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/1788>>. Acesso em: 27 dez. 2025.

PIVARI, M. **Esquema elétrico no RV**. MaCamp – Camping e Caravanismo, 2000. Disponível em: <https://macamp.com.br/esquema_eletrico/>. Acesso em: 27 dez. 2025.

POWERSAFE. **Bateria estacionária: para que serve e onde utilizar**. PowerSafe, 2024. Disponível em: <<https://powersafe.com.br/bateria-estacionaria/>>. Acesso em: 27 dez. 2025.

PRESSWORKS. **Viagem sobre rodas conquista o mundo: mercado de motorhomes cresce e impulsiona estilo de vida nômade**. Valor Econômico. [S.l.], 24 de jun. de 2025. Disponível

em: <<https://valor.globo.com/patrocinado/pressworks/noticia/2025/06/24/viagem-sobre-rodas-conquista-o-mundo-mercado-de-motorhomes-cresce-e-impulsiona-estilo-de-vida-nomade.ghtml>>. Acesso em: 29 de jul. de 2025.

RAMPAZO, D. **Análise da vida útil de baterias através da resistência interna**. LinkedIn Pulse, 2019. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/an%C3%A1lise-da-vida-%C3%BAtil-de-baterias-atrav%C3%A9s-resist%C3%Aancia-interna-rampazo/>>. Acesso em: 27 dez. 2025.

RASHID, M. H. **Power electronics: devices, circuits, and applications**. 4. ed. International edition. Harlow: Pearson, 2014.

RONTEK. **Tensão de corte: uma falsa sensação de segurança**. STA Eletrônica, [s.l.], s.d. Disponível em: <https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-em-geral/packs-de-baterias/tensao-de-corte-uma-falsa-sensacao-de-seguranca>. Acesso em: 6 set. 2025.

SEG AUTOMOTIVE. **Entenda como funciona a amperagem do alternador**. SEG Automotive Blog, 4 nov. 2021. Atualizado em: 16 nov. 2021. Disponível em: <<https://blog.seg-automotive.com.br/amperagem-do-alternador/>>. Acesso em: 27 dez. 2025.

SERÔDIO, P. M. S. B. e. **Desenvolvimento de um Conversor CC-CC Bidirecional Interleaved para Testes de Baterias de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO₄)**. 2018. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrônica e de Computadores, Universidade do Minho, Braga, 2018.

SILVA, C. T. da. **Baterias de Níquel-Metal Hidreto**. Embarcados, 12 jan. 2021. Disponível em: <https://embarcados.com.br/baterias-de-niquel-metal-hidreto/>. Acesso em: 4 set. 2025.

STMICROELECTRONICS. **An MCU-based low cost non-inverting buck-boost converter for battery chargers**. Geneva: STMicroelectronics, 2007. 16 p. Application Note AN2389.

TODOROVIC, M. H. **Wide input range DC-DC converter with digital control scheme**. 2004. Dissertação (Master of Science em Electrical Engineering) – Texas A&M University, College Station, 2004.

YIS MARINE. **O que são VSR e como instalar um VSR**. Disponível em: https://www.yismarine.com/pt/faq/faq_03_VSR.html. Acesso em: 22 dez. 2025

ZHANG, Caiping; JIANG, Jiuchun; ZHANG, Linjing; LIU, Sijia; WANG, Leyi; LOH, Poh Chiang. **A generalized SOC-OCV model for lithium-ion batteries and the SOC estimation**

for LNMCO battery. *Energies*, Basel, v. 9, n. 11, p. 900, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/en9110900>.

APÊNDICE A – CÓDIGO DA REALIZAÇÃO DOS CÁLCULOS DOS COMPONENTES DE PROJETO

```

clear
clc

% Parâmetros constantes
Vo = 14;
Io = 60;
dVc = 25e-3;
dIl = 0.1 * Io;
f = 25e3;
T = 1/f;
R = Vo / Io;
Vd1 = 0.7;
Vd2 = Vd1;
% Vetor de Vs de 8 a 16 com passo 0.5
Vs_values = 8:0.5:16;
% Pré-alocação dos vetores de resultados
Cmin_values = zeros(size(Vs_values));
Lmin_values = zeros(size(Vs_values));
D1_values = zeros(size(Vs_values));
D2_values = zeros(size(Vs_values));
for i = 1:length(Vs_values)
    Vs = Vs_values(i);
    D1 = (Vo + Vd1 + Vd2) / (Vs + Vd1);
    D2 = 1 - (Vs / (Vo + Vd1));

    Lmin = (T * (Vd1 + Vo) * (1 - D1)) / (2 * Io);
    Cmin = (100 * Io * (1 - D1) * T) / Vo;

    Lmin_values(i) = Lmin;
    Cmin_values(i) = Cmin;
    D1_values(i) = D1;
    D2_values(i) = D2;
end
% Exibição dos resultados
resultados = table(Vs_values', D1_values', D2_values', Lmin_values', Cmin_values',
    ...
    'VariableNames', {'Vs', 'D1', 'D2', 'Lmin', 'Cmin'});
disp(resultados)

Lmin2 = (T * ((16-1)*0.9222 - 1.2*0.4558 - 14*(0.9222-0.4558)))/(2*Io)

```

APÊNDICE B – CÓDIGO REFERENTE AOS CÁLCULOS DOS GANHOS DO SISTEMA DE CONTROLE DO CONVERSOR BUCK/BOOST

```

clc
clear
syms s z
%-----
% Construindo a função de transferência de malha aberta sem o controlador
R = 0.23;          % resistor
C = 8.8e-3;        % capacitor
L = 3.6e-6;        % indutor
E1 = 16;           % buck
E = 8;             % boost
D = 0.456;         % duty cycle boost

% CONTROLE DE CORRENTE BUCK
num_buI = [R*C*E1 E1];
den_buI = [R*L*C L R];

% CONTROLE DE TENSÃO BUCK
num_buV = R;
den_buV = [R*C 1];

% CONTROLE DE CORRENTE BOOST
num_boI = (E/(1-D)) * [R*C, 2];
den_boI = [R*L*C, L, R*(1-D)^2];

% CONTROLE DE TENSÃO BOOST
num_boV = (1/(1-D)) * [-L, R*(1-D)^2];
den_boV = [R*C, 2];

Gmaberta = tf(num_boI,den_boI)
bode(Gmaberta,{0.1,20000})
title('Malha aberta sem controlador')

%-----
% Projeto dos ganhos do controlador
fc = 2500; % Frequência de corte do controlador em Hz
PM = 80; % Margem de fase desejada em graus
Wc = 2*pi*fc; % Frequência de corte em rad/s
[amp, ph] = bode(Gmaberta, Wc); % plota o diagrama de bode e salva a amplitude e
fase da função de transferência de malha aberta na frequência de corte
GAIN_PI = 1/amp;
PHASE_PI = -ph-180+PM;
TauPI = (1/Wc)*tan((PHASE_PI+90)/180*pi);
KPI = GAIN_PI*Wc/sqrt(1 + (Wc*TauPI).^2);
Kp = KPI*TauPI
Ki = KPI
figure
Gcont = tf([Kp Ki],[1 0]); % Função de transferência do controlador
[Gm,Pm,Wgm,Wpm] = margin(Gcont*Gmaberta); % Calcula a margem de ganho e fase do
sistema em malha aberta com controlador
margin(Gcont*Gmaberta)
figure
Gmf = feedback(Gcont*Gmaberta,1); % Fechando a malha e verificando a resposta ao
degrau
step(Gmf) % Aplicando um degrau unitário

```

```
figure
bode(Gmf,{0.1,10^6})
title('Malha Fechada')
```

APÊNDICE C – CÓDIGO REFERENTE AO BLOCO MATLAB FUNCTION DO SISTEMA DE CONTROLE DO CONVERSOR BUCK/BOOST

```
function y = fcn(dt, v, Iref)
    persistent flag
    if isempty(flag)
        flag = 0;
    end
    if v>=14.4 && flag == 0
        flag = 1;
        y = dt;
    elseif flag == 1
        y = dt;
    elseif v<14.1 && flag == 1
        flag = 0;
        y = Iref;
    elseif flag==0
        y = Iref;
    else
        y = 0;
    end
end
```