

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**GUILHERME FERREIRA DE LIMA**

**PROJETO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA COM  
BATERIAS PARA UM SISTEMA EÓLICO DE PEQUENO PORTE**

**PONTA GROSSA**

**2021**

**GUILHERME FERREIRA DE LIMA**

**PROJETO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA COM  
BATERIAS PARA UM SISTEMA EÓLICO DE PEQUENO PORTE**

**Design of a battery energy storage system for a small-scale wind system**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Prof. Dr. Carlos Henrique Illa Font

**PONTA GROSSA**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**GUILHERME FERREIRA DE LIMA**

**PROJETO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO COM BATERIAS PARA  
UM SISTEMA EÓLICO DE PEQUENO PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso de  
Graduação apresentado como requisito  
para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 06/dezembro/2021

---

Carlos Henrique Illa Font  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

---

Joaquim de Mira Junior  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

---

Hélio Voltolini  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

**Ponta Grossa**

**2021**

Dedico este trabalho a todos os professores que participaram da minha vida estudantil, em especial a dois, os quais tenho a honra de chamar de pai e mãe.

## **AGRADECIMENTOS**

Deixo neste trecho o meu agradecimento a inúmeras pessoas e instituições que fizeram parte da minha jornada acadêmica.

A Deus pela oportunidade de conhecimento e paciência, as quais consegui sempre com muito esforço.

Aos meus pais pelo imenso apoio e dedicação a minha educação.

A toda minha família sempre me apoiando e incentivando.

Ao professor Carlos Henrique pela confiança e paciência em me guiar até o fim deste trabalho e revelar um pouco de toda uma imensa área da engenharia.

Aos meus amigos de graduação pela paciência de me suportar até o fim do curso e agora para além dele.

A todos os professores da UTFPR que fizeram parte da minha vida acadêmica, os quais levo comigo nas minhas metodologias, análises, melhorias e o meu jeito de ser.

A secretaria do curso por todo auxílio.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná por todo suporte prestado na busca de conhecimento.

“Todo efeito tem uma causa. Todo efeito inteligente tem uma causa inteligente. O poder da causa inteligente está na razão da grandeza do efeito.”

(Allan Kardec)

## RESUMO

LIMA, G. F; **Projeto de um sistema de armazenamento de energia com baterias para um sistema eólico de pequeno porte**. 2021. 92 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, 2021.

O presente projeto propõe o estudo de um sistema de armazenamento de energia com baterias para aplicação em um sistema eólico de pequeno porte não ligado à rede. É proposto uma metodologia de projeto para o banco de baterias considerando baterias de chumbo ácido, o estudo da influência de variáveis de projeto no número total de baterias e a relação deste número com diferentes capacidades nominais de corrente. O dimensionamento do banco, teórica e numericamente, tem o objetivo de abastecer uma residência com um consumo médio de energia pré estabelecido. Como forma de controle do fluxo de energia é apresentado o projeto do conversor CC-CC Buck/Boost bidirecional em corrente, visando sua correta aplicação no carregamento e descarregamento de energia do banco de baterias. A alimentação do conversor, para carregamento das baterias, é dada pelo barramento CC do aerogerador de pequeno porte. As especificações de projeto do conversor são as seguintes: 1200 W a potência processada, tensão no barramento 250 V, tensão no banco de baterias 120 V e uma frequência de comutação das chaves do conversor de 50 kHz. São apresentados os resultados numéricos obtidos, de forma a validar os estudos teóricos.

Palavras-chave: armazenamento de energia; baterias de chumbo ácido; conversor bidirecional.

## ABSTRACT

LIMA, G. F; **Design of a battery energy storage system for a small-scale wind system**. 2021. 68 f. Final course work (Bachelor's degree in Electrical Engineering). Technology Federal University of Paraná, Ponta Grossa, Paraná, 2021.

This study aims to design a battery energy storage system for application in a small-scale wind turbine system. It is presented the design methodology for the battery bank considering lead-acid batteries, the study of the influence of design variables on the total number of batteries, and the relationship of this number with different current ratings. The battery bank design, theoretically and numerically, aims to supply a residence with pre-established average energy consumption. To control the power flow, it is also designed a bidirectional dc-dc Buck/Boost converter, for charging and discharging the battery bank. The energy for charging the batteries is provided by the dc bus of the small-scale wind turbine conversion system. The design specifications of the converter are as follows: 1200 W at rated power, bus voltage of 250 V, battery bank voltage of 120 V, and a switching frequency of 50 kHz. The numerical results obtained are presented in order to validate the theoretical studies.

Keywords: energy storage; Lead-Acid batteries; bidirectional converter.



## FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de blocos do sistema de geração eólica de pequeno porte.....	17
Figura 2 – Topologia do conversor Buck/Boost bidirecional.....	18
Figura 3 – Principais funções dos conversores estáticos.....	24
Figura 4 – Diagrama de bloco do conversor CC–CC.....	25
Figura 5 – Topologia para análise teórica.....	44
Figura 6 – 1ª Etapa.....	45
Figura 7 – 2ª Etapa.....	46
Figura 8 – Tensão e corrente teóricas no indutor.....	47
Figura 9 – Tensão e corrente teóricas no capacitor.....	49
Figura 10 – Tensão e corrente teóricas no transistor 1.....	50
Figura 11 – Corrente no indutor (Sentido Boost).....	58
Figura 12 – Tensão no barramento (Sentido Boost).....	59
Figura 13 – Corrente no indutor (Sentido Buck).....	60
Figura 14 – Tensão no banco de baterias (Sentido Buck).....	61
Figura 15 – Conversor em malha fechada.....	62
Figura 16 – Diagrama de blocos do sistema de controle.....	64
Figura 17 – Corrente no indutor em malha fechada.....	66
Figura 18 – Inversão no sentido de corrente.....	67
Figura 19 – Variações no sinal de referência da corrente.....	68
Figura 20 – Inversão de corrente para uma variação menor.....	68

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Coeficiente de temperatura.....	29
Gráfico 2 – 1ª Configuração 45 Ah.....	31
Gráfico 3 – 1ª Configuração 63 Ah.....	31
Gráfico 4 – 1ª Configuração 80 Ah.....	32
Gráfico 5 – 1ª Configuração 150 Ah.....	32
Gráfico 6 – 2ª Configuração 45 Ah.....	33
Gráfico 7 – 2ª Configuração 63 Ah.....	34
Gráfico 8 – 2ª Configuração 80 Ah.....	34
Gráfico 9 – 2ª Configuração 150 Ah.....	35
Gráfico 10 – 3ª Configuração 45 Ah.....	36
Gráfico 11 – 3ª Configuração 63 Ah.....	36
Gráfico 12 – 3ª Configuração 80 Ah.....	37
Gráfico 13 – 3ª Configuração 150 Ah.....	37
Gráfico 14 – 4ª Configuração 45 Ah.....	38
Gráfico 15 – 4ª Configuração 63 Ah.....	39
Gráfico 16 – 4ª Configuração 80 Ah.....	39
Gráfico 17 – 4ª Configuração 150 Ah.....	40
Gráfico 18 – Peso e volume por capacidade de corrente.....	42
Gráfico 19 – Diagrama de Bode.....	65

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Controladores básicos.....	26
Tabela 2 – Capacidades analisadas.....	30
Tabela 3 – 1ª Configuração.....	30
Tabela 4 – 2ª Configuração.....	33
Tabela 5 – 3ª Configuração.....	35
Tabela 6 – 4ª Configuração.....	38
Tabela 7 – Resultados de causa e efeito obtidos.....	40
Tabela 8 – Configuração do banco de baterias.....	43
Tabela 9 – Correntes e tensões impostas sobre os transistores.....	51
Tabela 10 – Especificações do conversor bidirecional.....	52
Tabela 11 – Especificação dos valores numéricos dos componentes.....	52
Tabela 12 – Especificações do núcleo do indutor.....	54
Tabela 13 – Especificações do condutor.....	55
Tabela 14 – Especificações IPW65R019C7.....	55
Tabela 15 – Perdas nos componentes.....	57
Tabela 16 – Comparação dos resultados teóricos e simulados 1.....	59
Tabela 17 – Comparação dos resultados teóricos e simulados 2.....	61
Tabela 18 – Grandezas de controle.....	67

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Corrente contínua
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
NBR	Norma Brasileira
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
SAE	Sistema de Armazenamento de Energia
CA	Corrente alternada
MCC	Modo de condução contínuo
MCD	Modo de condução descontínuo

## LISTA DE VARIÁVEIS

$E_d$	Energia média consumida em uma residência
$N_d$	Número de dias de autonomia
DOD	Profundidade de descarga
$\alpha_T$	Coefficiente de temperatura
T	Temperatura
K	Coefficiente de compensação de temperatura
$\beta$	Fator de segurança
$N_{\text{série}}$	Número de baterias em série
$N_{\text{paralelo}}$	Número de baterias em paralelo
D	Razão cíclica
$V_1$	Tensão 1, banco de baterias
$V_2$	Tensão 2, barramento CC do aerogerador
$I_L$	Corrente no indutor
$f_s$	Frequência de comutação dos transistores
$K_p$	Constante proporcional
$K_i$	Constante integrativa
$K_d$	Constante derivativa
$V_L$	Tensão no indutor
G	Ganho estático do conversor
$\Delta V$	Ondulação de tensão
$\Delta I$	Ondulação de corrente
$\mu_r$	Permeabilidade relativa
$\mu_0$	Permeabilidade do ar/vácuo
$l_c$	Comprimento do caminho magnético
$d_{ef}$	Diâmetro eficaz
$B_{SAT}$	Densidade de fluxo magnético para saturação

$N_{m\acute{a}x}$	Número máximo de espiras
$d_{m\acute{a}x}$	Diâmetro máximo do condutor
$\rho$	Resistividade do cobre
$l_t$	Comprimento total do fio
$N_p$	Número de fios em paralelo
$Q_{litz}$	Quantidade de fios no fio Litz
$S_{litz}$	Seção transversal total do fio Litz

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Delimitação do tema.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Problema.....</b>	<b>18</b>
<b>1.3</b>	<b>Relevância do tema.....</b>	<b>18</b>
<b>1.4</b>	<b>Objetivos geral e específicos.....</b>	<b>19</b>
<b>1.5</b>	<b>Metodologia.....</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1</b>	<b>Eólica e Sistemas de armazenamento.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2</b>	<b>Energia média consumida em uma residência.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3</b>	<b>Conjunto de armazenamento de energia com baterias.....</b>	<b>22</b>
2.3.1	Autonomia.....	22
2.3.2	Capacidade.....	23
2.3.3	Profundidade de descarga.....	23
2.3.4	Temperatura.....	23
2.3.5	Fator de segurança.....	24
<b>2.4</b>	<b>Conversores Estáticos.....</b>	<b>24</b>
2.4.1	Conversores CC–CC.....	25
2.4.2	Conversores CC–CC Bidirecionais.....	25
<b>2.5</b>	<b>Controle por resposta em frequência.....</b>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>PROJETO DO SISTEMA ARMAZENADOR DE ENERGIA.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>Dimensionamento do banco de baterias.....</b>	<b>27</b>
3.1.1	Capacidade de corrente.....	28
3.1.2	Resultados numéricos.....	29
<b>4</b>	<b>PROJETO DO CONVERSOR CC–CC BUCK/BOOST BIDIRECIONAL. 44</b>	
<b>4.1</b>	<b>Etapas de operação.....</b>	<b>45</b>
<b>4.2</b>	<b>Equacionamento dos componentes.....</b>	<b>46</b>
4.2.1	Razão cíclica nominal.....	47
4.2.2	Indutor.....	48
4.2.3	Capacitores.....	48
4.2.4	Transistores.....	50

<b>4.3</b>	<b>Especificações do conversor.....</b>	<b>52</b>
<b>4.4</b>	<b>Projeto físico do indutor.....</b>	<b>52</b>
<b>4.5</b>	<b>Especificação dos transistores.....</b>	<b>55</b>
<b>4.6</b>	<b>Perdas e rendimento.....</b>	<b>55</b>
4.6.1	Perdas no indutor.....	56
4.6.2	Perdas nos transistores.....	56
4.6.3	Rendimento do conversor.....	57
<b>4.7</b>	<b>Simulações numéricas em malha aberta.....</b>	<b>58</b>
4.7.1	Simulação no sentido Boost.....	58
4.7.2	Simulação no sentido Buck.....	60
<b>4.8</b>	<b>Controle.....</b>	<b>62</b>
4.8.1	Modelagem do conversor.....	63
4.8.2	Projeto do controlador.....	65
<b>4.9</b>	<b>Simulações numéricas em malha fechada.....</b>	<b>66</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>70</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>72</b>
	<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>76</b>
	<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>84</b>
	<b>APÊNDICE D.....</b>	<b>88</b>
	<b>APÊNDICE E.....</b>	<b>90</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem o propósito de desenvolver um sistema de armazenamento de energia com baterias para atender a um sistema eólico de pequeno porte residencial. O projeto do sistema de armazenamento (SAE) inclui o dimensionamento do banco de baterias, a partir do pré estabelecimento de uma demanda energética residencial média, e com o estudo do conversor CC/CC Buck/Boost bidirecional, controlando o fluxo de energia no carregamento e descarregamento do banco de baterias para o barramento CC do sistema retificador/inversor do aerogerador.

A crescente demanda por energia elétrica e a busca por um desenvolvimento sustentável na redução da emissão de poluentes, trazem ao cenário atual diversidades para a geração elétrica, e alguns motivos que acompanham este tópico são a redução de custos na obtenção e na conta de energia elétrica, e ainda a independência energética.

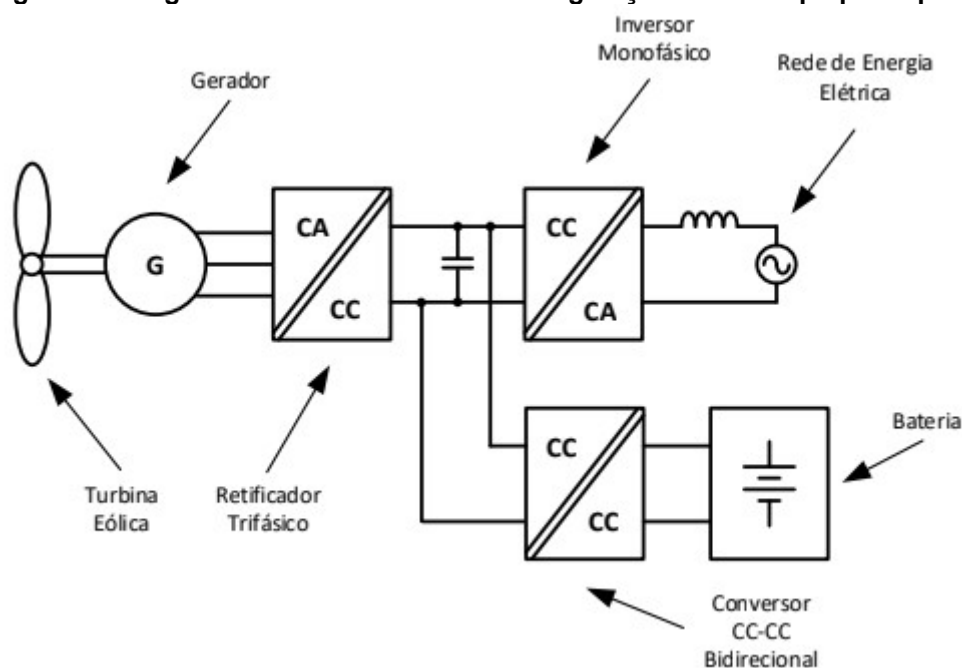
A independência energética quando associada a grandes indústrias e empresas, está sempre ligada a horários de ponta, considerados pelas concessionárias vigentes, ou em situações emergenciais, e assim é também para as residências. Para tanto o presente trabalho tem como premissa estudar como um SAE com baterias pode ser dimensionado para atender a um período fixo em que o consumidor residencial necessita do uso emergencial, ou em horários de tarifa mais alta, ou ainda atender uma carga específica durante um período de tempo pré estabelecido. Além da geração de energia, o uso de baterias, recentemente, está intimamente ligado a veículos elétricos e híbridos, outro tema de suma importância na busca por um desenvolvimento sustentável.

Atualmente, com o crescimento expansivo do uso da energia solar, a população em geral aderiu à ideia, contudo a geração eólica de pequeno porte não é recebida da mesma forma por boa parte destes investidores, pois necessita um estudo da região de instalação e por sua vez pode se tornar inviável. No entanto, com a Resolução Normativa Nº 482 de 2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), para microgeração em sistemas On Grid, a geração eólica de pequeno porte continua ganhando espaço no mercado, seja ligada a rede ou Off Grid, atuando sozinha ou complementando a geração solar fotovoltaica.

## 1.1 Delimitação do tema

O projeto é parte integrante da eletrônica de potência envolvida na conversão de energia elétrica de um sistema de geração de energia eólica. O diagrama de blocos para geração eólica de pequeno porte é ilustrado na Figura 1, sendo o atual trabalho desenvolvido no domínio da corrente contínua (CC), portanto o presente projeto atua no conjunto contínuo e não conectado a rede elétrica.

**Figura 1 – Diagrama de blocos do sistema de geração eólica de pequeno porte**

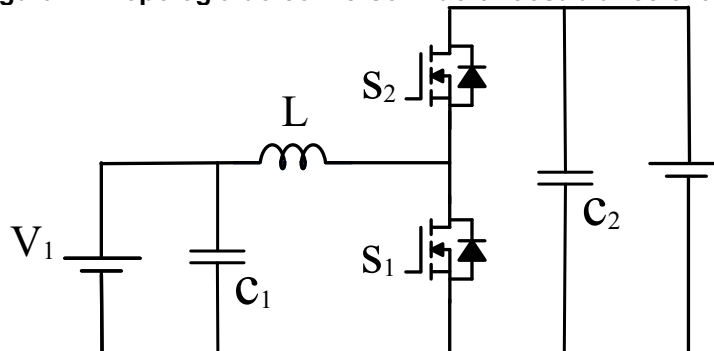


Fonte: Autoria própria (2021)

O projeto estabelece uma energia média de consumo para uma residência e a partir desta o sistema de armazenamento de energia, que como já mencionado, deve ser capaz de supri-la. No entanto, foi estudado e analisado também, a influência de algumas variáveis neste dimensionamento, entre elas a capacidade de corrente, a temperatura, a profundidade de descarga.

O fluxo de energia que flui da bateria para o barramento CC, e vice-versa, deve ser controlado de forma a garantir o correto abastecimento da carga e mais ainda prolongar a vida útil das baterias, sendo esse controle feito através do conversor CC/CC Buck/Boost bidirecional, exposto na Figura 2.

**Figura 2 – Topologia do conversor Buck/Boost bidirecional**



Fonte: Autoria própria (2021)

## 1.2 Problema

O maior problema deste projeto reside no controle da corrente por parte do conversor, pois a corrente garante a demanda para o barramento CC, ou seja, para a carga, mais ainda, quando devidamente ajustada, garante a saúde e prolonga a vida útil das baterias.

Na primeira parte, a corrente pré estabelecida, será garantida em regime permanente através do correto dimensionamento de potência do conversor, em específico, do indutor. Na segunda parte, a corrente deve ser garantida no regime transiente através de uma malha de controle, realimentando o sistema. Portanto o estudo do controle do fluxo de potência é de suma importância em sistemas de armazenamento de energia.

## 1.3 Relevância do tema

Apesar de o tema ser relativamente bem conhecido no planejamento e projeto energético residencial por muitas empresas relacionadas a geração solar e eólica ou por grandes empresas do ramo do armazenamento de energia, o conhecimento sobre dimensionamento de sistemas com banco de baterias no meio acadêmico ainda é pouco difundido.

Portanto, mesmo que o estudo tenha uma metodologia simples, ainda se faz necessário a avaliação deste tópico e os resultados apresentados tanto no planejamento do conjunto armazenador, quanto na eletrônica de potência envolvida, devem ser satisfatórios e conclusivos na relação possibilidade e utilidade.

## 1.4 Objetivos geral e específicos

O projeto do banco de baterias deve ser capaz de estabelecer como as diferentes capacidades de corrente e configurações de armazenamento influenciam no número total de baterias, influenciando assim em parâmetros comerciais, como o peso e o preço deste sistema.

Já o projeto do conversor deve ser responsável por submeter a bateria e o barramento CC a uma corrente suficiente e estável, delimitada pela potência deste conversor. Além disso, ser efetivo na delimitação do sentido de corrente. Para este efeito alguns objetivos específicos devem ser alcançados:

1) A partir da revisão bibliográfica, estabelecer um banco de dados, no caso planilhas e gráficos, de forma a verificar qual a influência real das variáveis, anteriormente vistas, no número total de baterias.

2) Definir qual a melhor capacidade de corrente (valor comercial) se ajusta a carga se baseando no banco de dados definido.

3) Definir uma configuração para o armazenamento e consumo da energia das baterias.

4) Realizar a análise teórica do conversor, com o objetivo de estabelecer as equações que regem seu funcionamento, da mesma forma, encontrar as equações para delimitar o valor das grandezas dos componentes.

5) Realizar a especificação do conversor.

6) Realizar a simulação numérica do conversor bidirecional, ainda em malha aberta, verificando assim se as especificações de projeto foram atendidas.

7) Realizar a análise teórica de controle do conversor.

8) Realizar a simulação numérica do conversor bidirecional, agora em malha fechada.

9) Por fim, avaliar a situação e verificar se os resultados obtidos serão viáveis a uma possível aplicação prática.

## 1.5 Metodologia

O trabalho foi desenvolvido no domínio computacional, através de softwares de planilhas matemáticas e simulações de circuitos elétricos. O estudo pode ser visto em duas frentes, o projeto do banco de baterias e o projeto do conversor bidirecional.

A metodologia adotada é exposta como segue:

1. Obter um valor numérico de energia média para uma residência através de pesquisas e estudos já consolidados.
2. O estudo, análise, equacionamento do conjunto armazenador de energia referenciados a partir de normas e manuais.
3. O estudo, análise, equacionamento, projeto dos componentes e simulação numérica, através de softwares de simulação de circuitos, do conversor Buck/Boost bidirecional.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem o intuito de introduzir os temas discutidos no trabalho, de forma a consolidar as referências e tornar o trabalho menos repetitivo e mais fluido.

### 2.1 Eólica e Sistemas de armazenamento

Neiva e Jasmin (2017, p. 2) acrescentam que “a necessidade de incentivar e fortalecer a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis já é um consenso na sociedade e na comunidade científica. A participação da energia eólica na matriz energética tem aumentado no Brasil e no mundo, e esta tendência deve prevalecer nas próximas décadas”.

Contudo Leite *et al.* (2017, p. 5) identificam que, “o problema do crescimento das fontes alternativas é que elas são também intermitentes, ou seja, produzem energia não necessariamente quando há demanda, mas principalmente, podem estar indisponíveis quando a demanda é alta”.

Através deste problema Silva e Bortoni (2016, p. 48) encontram as aplicabilidades dos SAEs, onde por meio destes é possível a disseminação efetiva do uso das energias solar, eólica e outras fontes de energia renováveis de maneira sustentável, devido ao fato de haver alívio no congestionamento na rede elétrica, contornando os problemas de disponibilidade de energia, aumentando a eficiência do sistema como um todo contribuindo para redução de impactos ambientais.

E mais ainda, Silva e Bortoni (2016) entendem que as aplicações dos sistemas de armazenamento, devido a alta demanda, não são direcionadas somente ao setor elétrico, mas também ao setor de transportes, como é o caso dos carros elétricos.

### 2.2 Energia média consumida em uma residência

Estabelecer o consumo médio de uma residência em um período de tempo, é a primeira parte do projeto. A obtenção de um valor numérico de energia, se deu através de uma pesquisa, desenvolvida pela Universidade Federal de Santa Maria, em que o pesquisador entrou em contato com diversas concessionárias, as quais cederam informações sobre o tema.

“A partir do contato estabelecido com a Companhia Paranaense de Energia (COPEL) e, considerando uma residência modelo, com consumo mensal de 165 kWh (média em 2009) e 16 horas de utilização, chega-se a uma demanda de aproximadamente 347 watts/hora no período entre 8 h até 24 h.” (CHAVES; ROGGIA, 2010).

### **2.3 Conjunto de armazenamento de energia com baterias**

Para o dimensionamento do sistema armazenador alguns parâmetros, associados ao comportamento das baterias, devem ser estabelecidos. Os parâmetros adotados no projeto tem como base a NBR14298, que, por sua vez, é baseada na IEEE Std 485–2020, as quais têm o objetivo de estabelecer de forma clara o projeto de armazenadores de energia para sistemas autônomos e com perfil de consumo diário constante. Vale destacar que os parâmetros mencionados influenciam na capacidade de corrente ideal e ajustada do projeto, alterando assim o número total de baterias.

#### **2.3.1 Autonomia**

O uso de baterias tem na maioria dos casos o objetivo de tornar energeticamente autônomo um sistema. Contudo a autonomia, propriamente dita, não reflete algo maleável e moldável, sua representação é feita através da variável tempo. O tempo em que o sistema consumidor leva para descarregar totalmente, ou parcialmente, a energia total armazenada nas baterias, sem necessitar uso de fontes auxiliares ou do barramento CC do aerogerador, é referenciado como tempo de autonomia. Assim sendo, o tempo de autonomia é uma variável intimamente relacionada ao sistema de geração e consumo de energia, sua projeção e análise são a base para todo o dimensionamento.

O tempo de autonomia é elencado no projeto como o número de dias em que o banco pode suprir corretamente o conjunto de cargas, inicialmente sendo definido pelo projetista.

### 2.3.2 Capacidade

A capacidade de uma bateria é definida pela corrente que esta pode fornecer em um regime controlado de descarga, em um período de tempo. A capacidade é usada comumente como método de diferenciação das baterias, bateria com maior capacidade, por exemplo, além de poder suprir a carga em um regime de descarga maior, mantendo a potência na carga por um período de tempo maior, tem preço e peso mais elevados.

### 2.3.3 Profundidade de descarga

A profundidade de descarga é definida como a quantidade de energia retirada dos armazenadores completamente carregados, ela é expressa em porcentagem da capacidade total. Portanto, de forma sucinta, a profundidade de descarga estabelece o valor máximo de energia que deve ser retirada do sistema, resultando que existe um valor mínimo mantido nos armazenadores

Devido as reações químicas, derivadas da quantidade do fluxo de elétrons, esta grandeza é de suma importância quando se trata de manter a saúde e prolongar a vida útil das baterias. A profundidade de descarga é também referenciada por DOD (do inglês Depth of Discharge).

### 2.3.4 Temperatura

A capacidade de corrente das células de armazenamento de chumbo ácido varia com a temperatura. Quanto menor a temperatura, menor é a capacidade das baterias. Logo a capacidade de descarga aumenta com a temperatura. Porém, temperaturas muito altas reduzirão drasticamente o tempo de vida útil da bateria. A melhor temperatura de operação das baterias situa-se entre 20 °C a 25 °C.

Segundo WEG (2019), para estabelecer este comportamento diante da mudança de temperatura, é estabelecido o coeficiente de temperatura o qual relaciona a capacidade nominal da bateria a 25 °C com a capacidade na temperatura do ambiente de operação. Este coeficiente será evidenciado mais a frente no trabalho.



### 2.3.5 Fator de segurança

É prudente fornecer uma margem na capacidade de forma a permitir adições inesperadas no circuito CC e melhorar as condições de operação das baterias devido a manutenção inadequada, descargas constantes, temperaturas abaixo do esperado ou ainda a combinação de todos esses fatores. O correto método para projetar a margem de segurança está na adição de 10% a 15% para a capacidade determinada através dos cálculos. Se diferentes cargas são esperadas, é prudente um estudo de cada uma das cargas, a fim de projetar um ciclo de trabalho a partir dos resultados.

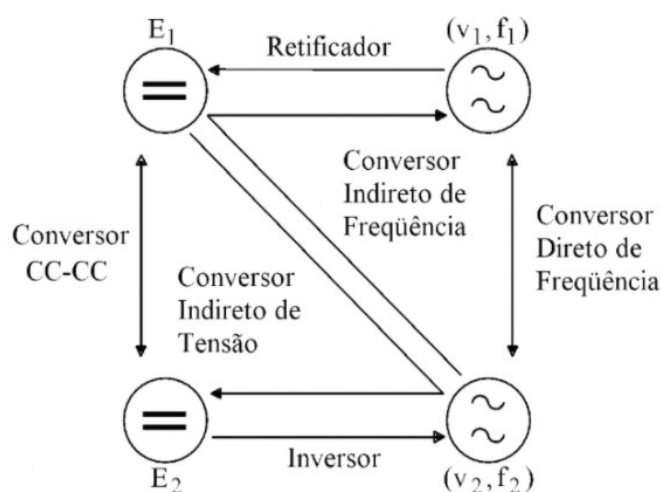
## 2.4 Conversores Estáticos

O uso de componentes interruptores sempre esteve relacionado ao desejo de uma maior eficiência energética e rapidez no fluxo de energia entre vários sistemas. E do estudo desta conversão e adaptação de energia, através dos componentes interruptores, emergiu a eletrônica de potência.

De acordo com Barbi (2000, p. 2) “um conversor estático pode ser definido como um sistema, constituído por elementos passivos, como resistores, indutores e capacitores, e elementos ativos, tais como Diodos, Transistores, GTO's, Triacs, IGBT's e MOSFET's, associados segundo uma lei pré estabelecida”.

A Figura 3 exibe as diferentes interações entre diferentes tipos de conversão.

**Figura 3 – Principais funções dos conversores estáticos**



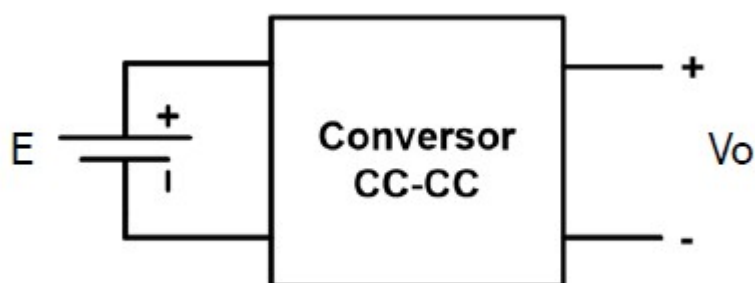
Fonte: Barbi (2000, p. 2)

### 2.4.1 Conversores CC–CC

Dentre os conversores de potência ilustrados na Figura 3, há o conversor CC–CC, o qual, de acordo com Font (2021, p. 4) “realiza a conversão de energia entre uma fonte de tensão contínua e uma carga alimentada em corrente contínua”.

Considerando toda eletrônica envolvida no projeto do conversor CC–CC como um sistema fechado, pode-se resumir a relação de entrada e saída em concordância com a Figura 4.

Figura 4 – Diagrama de bloco do conversor CC–CC



Fonte: Font (2001, p. 4)

### 2.4.2 Conversores CC–CC Bidirecionais

Adentrando ainda mais conversores CC-CC, encontram-se os conversores bidirecionais em corrente ou ainda chamados de conversores reversíveis em corrente. O conversor proposto para o presente projeto, exposto inicialmente na Figura 2, faz parte deste grupo.

O uso deste tipo de circuito é comumente relacionado aos sistemas de frenagem regenerativa em máquinas de corrente contínua, Martins e Barbi (2006, p. 324) “a passagem de motor para gerador ocorre através da inversão da corrente de armadura, mantendo a corrente de campo constante. Assim o torque do motor terá sentido invertido, o mesmo ocorrendo com a potência”.

Conseqüentemente, por comparação, o uso como um controlador do fluxo de energia entre baterias e um barramento CC é similar, com acréscimo de que o barramento é controlado por um retificador, que por sua vez, é preferencialmente alimentado de forma contínua, o que garante maior estabilidade de energia.

## 2.5 Controle por resposta em frequência

Primeiramente, para analisar o fechamento da malha do sistema é necessário estabelecer o comportamento do conversor em função da entrada pela saída, a razão cíclica pela corrente ou tensão. Houve o problema da não linearidade dentro do sistema, o chaveamento dos transistores.

Para contornar tais não linearidades e empregar ferramentas aplicáveis à análise de sistemas lineares, recorre-se a técnicas de linearização, que resultam em modelos médios de pequenos sinais válidos apenas para pequenas perturbações em torno do ponto de operação (BERGER *et al*, 2018) isto somente é possível devido ao fato da grandeza de frequência dos componentes serem menores que o chaveamento. (WESTER; MIDDLEBROOK, 1973)

Após contornado o problema de linearização, as técnicas de análise do projeto do controlador utilizadas são as mesmas da teoria clássica, sendo o controle por resposta em frequência uma das técnicas mais utilizadas em eletrônica de potência, em específico a análise por diagrama de Bode.

De acordo com Nise (2017, p. 439), em regime permanente, entradas senoidais aplicadas a sistemas lineares geram respostas senoidais de mesma frequência. Embora essas respostas tenham a mesma frequência das entradas, elas diferem em amplitude e em fase. Essas diferenças são funções da frequência.

Já as metodologias de controle para conversores CC-CC, estão dentro da teoria clássica de controle, assim como suas metodologias de projeto, com o uso de controladores P, PI, PD, PID, como apresentado na tabela 1.

<b>Tabela 1 – Controladores básicos</b>	
Controlador	Função de transferência
P	$K_p$
PI	$K_p + \frac{K_i}{s}$
PD	$K_p + K_d s$
PID	$\frac{K_p s + K_i + K_d s^2}{s}$

**Fonte: Autoria própria (2021)**

### 3 PROJETO DO SISTEMA ARMAZENADOR DE ENERGIA

O primeiro passo é o estabelecimento da energia média de consumo de uma residência, que segundo a seção 2.2 é definida por um período mensal como 165 kWh e 16 horas de utilização diária. No entanto, para o presente projeto, o tempo de consumo será contabilizado no período diário, esta decisão é tomada inicialmente adotando que o sistema armazenador deva ser capaz de suprir a carga durante um período mais curto, devido aos fatores, e continuamente, até atingir um estado de carga (SOC) pré-definido.

Considerando o mês com um período de trinta dias, encontra-se a equação (1), a qual mostra o valor de energia demandado em um dia. (CHAVES; ROGGIA, 2010).

$$E_d = 5,5 \text{ kWh} \quad (1)$$

O segundo passo é a definição das tensões elétricas do sistema, a tensão do barramento CC do aerogerador e a tensão do conjunto de baterias. O barramento CC tem 250 V, esta tensão recebe este valor de modo a comportar a energia de cargas CA estando assim apta a um conversor CA ou inversor. Por outro lado, a tensão das baterias será definida, a princípio, em 120 V (este valor é obtido considerando a associação em série de 10 baterias de 12 V).

Neste ponto é importante ressaltar dois efeitos destas tensões no trabalho. Primeiramente, a tensão escolhida para o *pack* de baterias influencia no número de baterias colocadas em série. Posteriormente, estas tensões de barramentos também estabelecem as tensões dos terminais do conversor CC–CC bidirecional, assunto que será discutido em seções futuras.

#### 3.1 Dimensionamento do banco de baterias

Determinados os parâmetros de projeto do sistema eólico e do conjunto armazenador como um todo, tem-se início a determinação numérica da relação das variáveis com o número total de baterias.

### 3.1.1 Capacidade de corrente

Se a relação de baterias em série é dada pela tensão que se deseja alcançar, logicamente dependendo da tensão unitária da bateria, então a capacidade de corrente será responsável pelo número de baterias em paralelo.

A capacidade ideal do sistema é demonstrada na equação (2). (NBR14298).

$$C_I = \frac{N_D E_d}{V_{pack}} \quad (2)$$

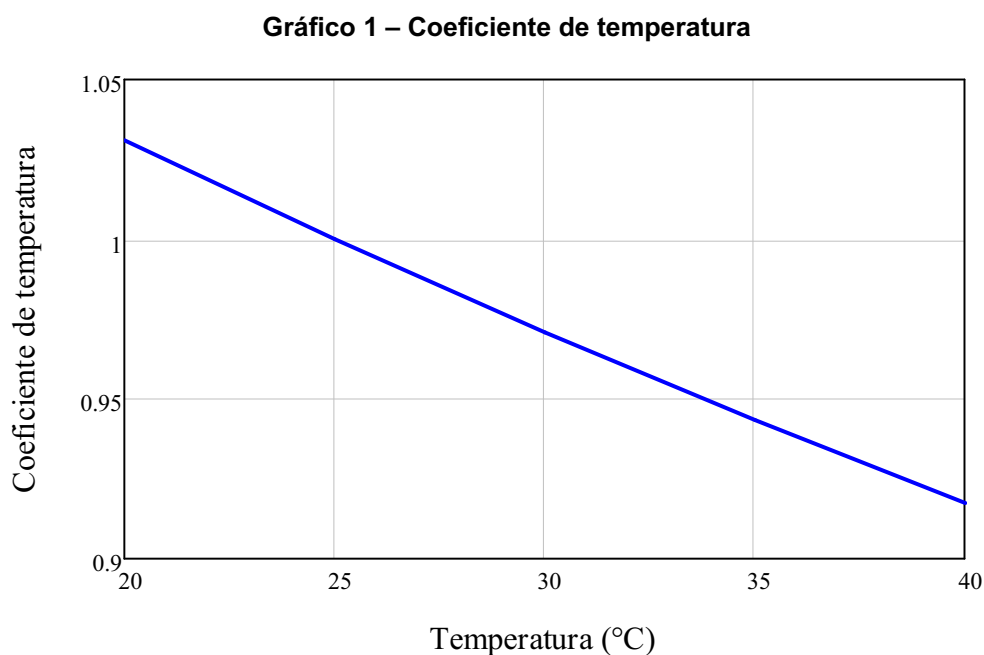
A capacidade ideal não leva em conta, temperatura, profundidade de descarga ou o fator de segurança. Contudo, a informação desta capacidade é de grande valia pois introduz uma ideia de comparação de capacidades. A capacidade real do sistema é mostrada na equação (3) (NBR14298).

$$C_R = \frac{\alpha_T \beta N_D E_d}{DOD V_{pack}} \quad (3)$$

Retomando a questão da temperatura dentro do sistema, a equação (3) indica como o parâmetro, coeficiente de temperatura, influência a capacidade total do sistema. Contudo se faz necessário estabelecer uma relação direta com a temperatura, esta relação está exposta na equação (4) (WEG, 2019).

$$\alpha_T = \frac{1}{1 + K(T_a - 25)} \quad (4)$$

Não apenas é definido esta relação numérica, como também gráfica, exibida no gráfico 1. Vale destacar que esta projeção de coeficiente por temperatura está referenciada por um *range*, pois na prática, altas temperaturas, como já mencionado, são prejudiciais às baterias, reduzindo a vida útil.



**Fonte: Autoria própria (2021)**

Estabelecida a capacidade comercial de corrente das baterias e a configuração do sistema, o número de baterias em paralelo é calculado através da equação (5).

$$N_{paralelo} = \frac{C_R}{C_{comercial}} \quad (5)$$

Conseqüentemente o número total de baterias é encontrado pela equação (6).

$$N_{total} = N_{paralelo} * N_{serie} \quad (6)$$

### 3.1.2 Resultados numéricos

De acordo com as equações mencionadas foi montado uma planilha de cálculo, na qual, partindo de uma capacidade de corrente comercial como entrada foi possível realizar variações nas configurações de projeto; tempo de autonomia, temperatura, profundidade de descarga e com isso, numérica e graficamente, avaliar a relação destas com o número total de baterias, e verificar de que forma as diferentes capacidades influenciam o sistema.

A tabela 2 exhibe as diferentes capacidades vistas nas planilhas de cálculo, assim como dados de peso e volume.

**Tabela 2 – Capacidades analisadas**

Baterias de chumbo ácido 12 V	Peso (kg)	Dimensões [CxLxA (mm)]
45 Ah	11,8	212x175x175
63 Ah	16,1	282x175x175
80 Ah	21,6	306x172x203
150 Ah	39	509x211x219

**Fonte: Autoria própria (2021)**

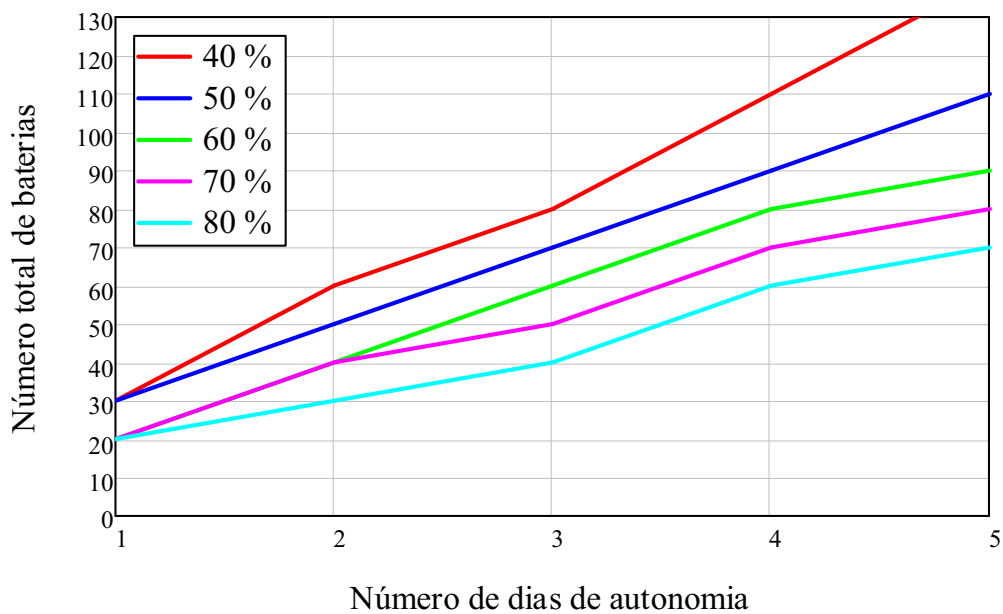
De forma a demonstrar, exemplificar e discutir, primeiramente será analisado as diferentes configurações de projeto para cada capacidade. Por fim há a escolha da capacidade para as baterias do sistema, exibindo assim uma justificativa. Além disso o APÊNDICE A apresenta as planilhas de cálculo.

A primeira configuração é exposta na tabela 3. Os gráficos 2, 3, 4 e 5 apontam o número total de baterias necessário para atender a carga nesta configuração.

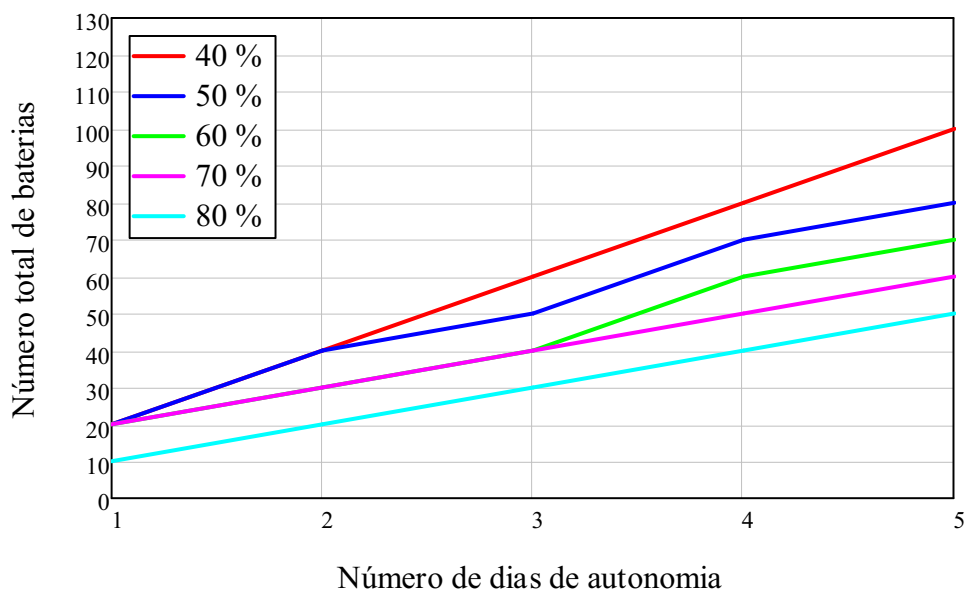
**Tabela 3 – 1ª Configuração**

Parâmetro	Valor configurado
Número de dias de autonomia ( $N_D$ )	Variável
Profundidade de descarga (DOD)	40, 50, 60, 70, 80 %
Temperatura (T)	35 °C
Fator de segurança ( $\beta$ )	10%

**Fonte: Autoria própria (2021)**

**Gráfico 2 – 1ª Configuração 45 Ah**

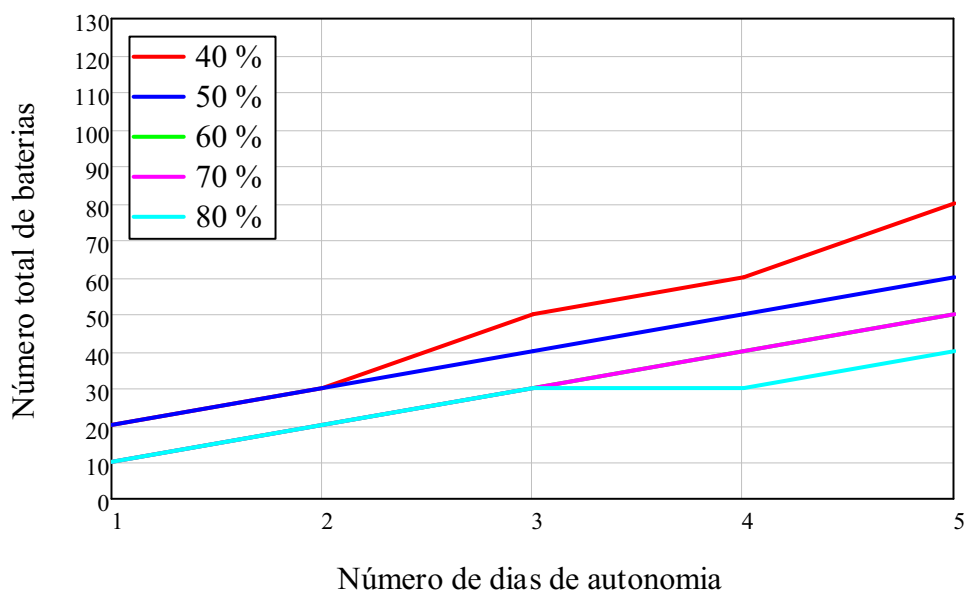
Fonte: Autoria própria (2021)

**Gráfico 3 – 1ª Configuração 63 Ah**

Fonte: Autoria própria (2021)

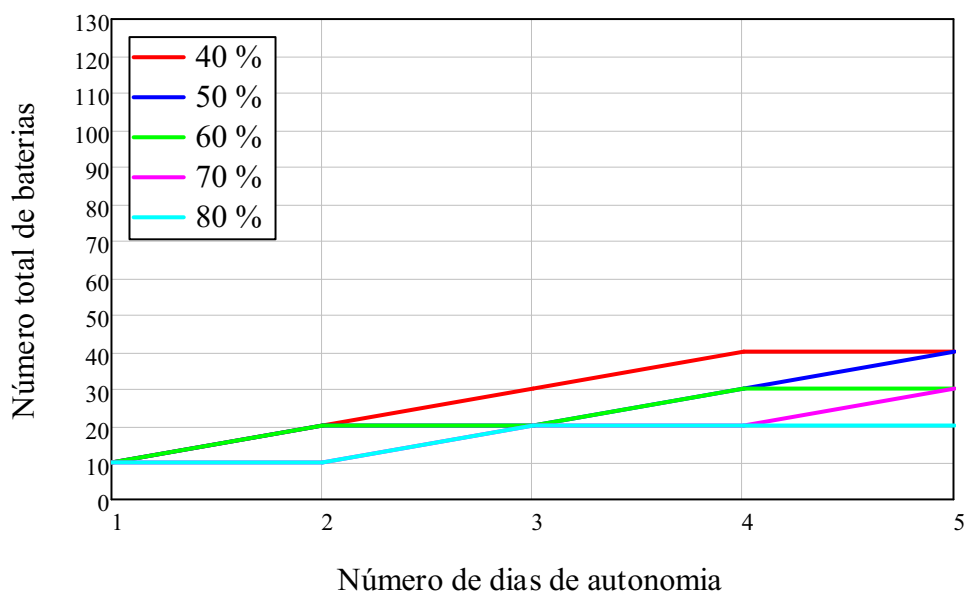


Gráfico 4 – 1ª Configuração 80 Ah



Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 5 – 1ª Configuração 150 Ah



Fonte: Autoria própria (2021)

Desta primeira configuração foi retirado duas informações, a primeira é que com uma profundidade de descarga maior é possível manter a carga alimentada por um maior período de autonomia com um número menor de baterias.

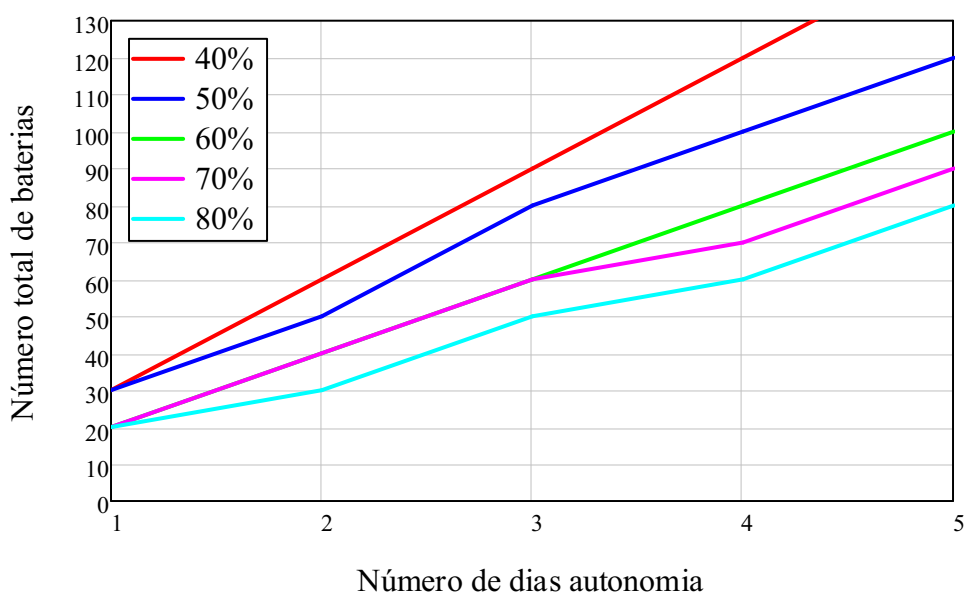
A segunda informação é fruto da comparação entre os quatro gráficos, demonstrando que uma maior capacidade de corrente também exige menos baterias e abastece a carga por um período maior de tempo.

A próxima configuração é uma variação da primeira, alterando apenas a temperatura. Foi configurado a temperatura de 15 °C, configuração dos parâmetros na tabela 4 e os resultados gráficos correspondentes são apresentados nos gráficos 6, 7, 8 e 9.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor configurado</b>
Número de dias de autonomia ( $N_D$ )	Variável
Profundidade de descarga (DOD)	40, 50, 60, 70, 80 %
Temperatura (T)	15 °C
Fator de segurança ( $\beta$ )	10%

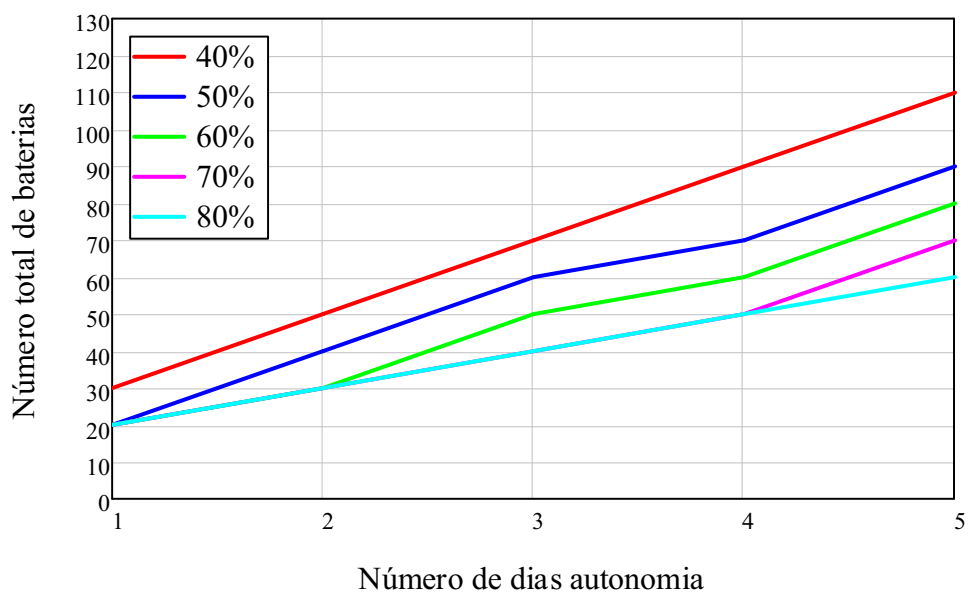
**Fonte: Autoria própria (2021)**

**Gráfico 6 – 2ª Configuração 45 Ah**



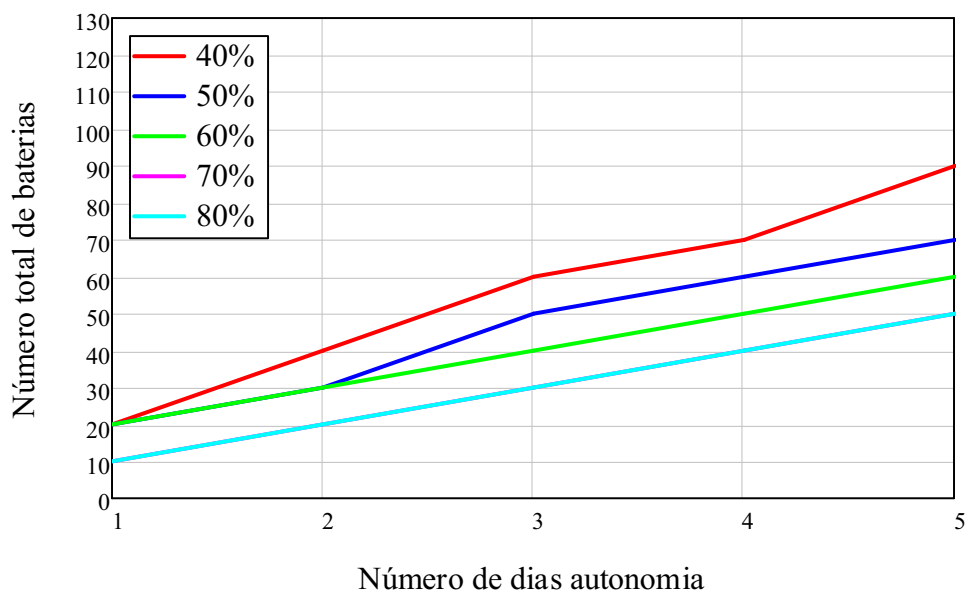
**Fonte: Autoria própria (2021)**

Gráfico 7 – 2ª Configuração 63 Ah



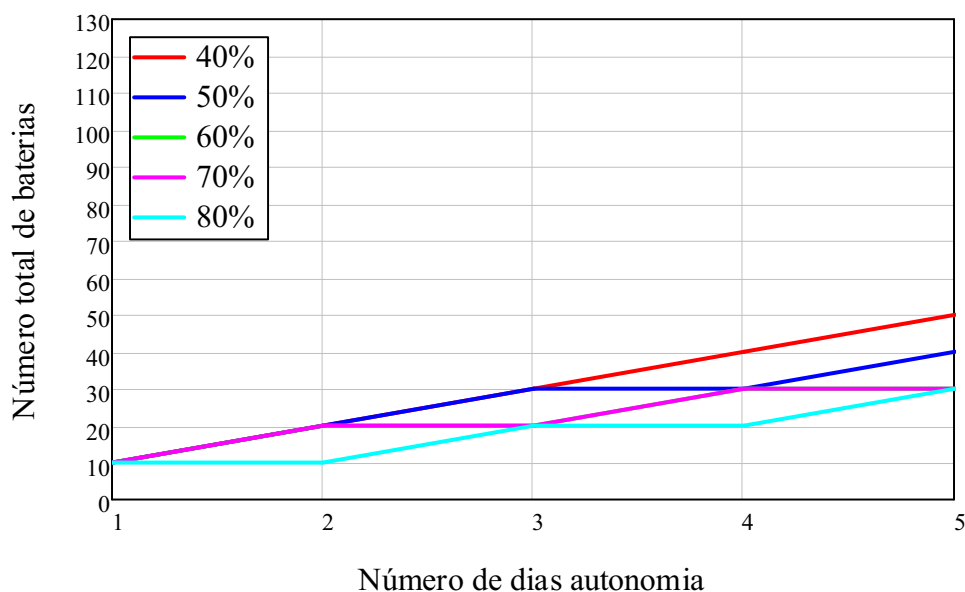
Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 8 – 2ª Configuração 80 Ah



Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 9 – 2ª Configuração 150 Ah



Fonte: Autoria própria (2021)

Com a segunda configuração foi visualizado que para atender uma temperatura menor se faz necessário um maior número de baterias. Mais ainda, foi possível verificar que em alguns casos, a diferença na profundidade de descarga não surtiu efeito no número total de baterias. No entanto, de modo geral o DOD tende a ter grande influência na quantidade final, inferindo assim que o projeto deve definir uma profundidade de descarga cuidadosa se o objetivo for reduzir o número de baterias.

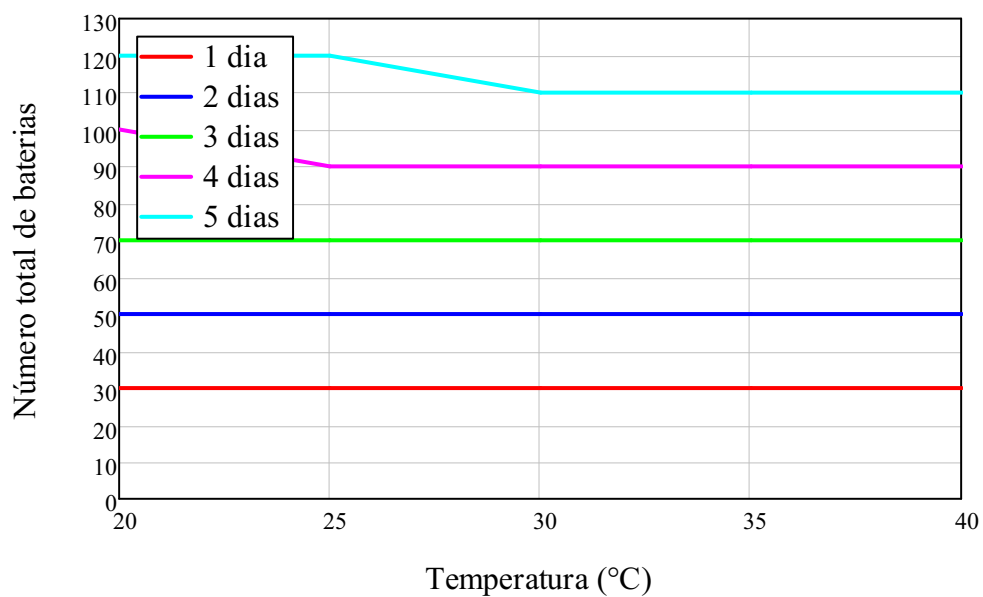
De forma a entender melhor o efeito das configurações para o sistema é proposto mais uma composição gráfica dos parâmetros. Desta vez, foi mantido a profundidade de descarga fixa e então aplicado a variação do número total de baterias pela temperatura. O número de dias de autonomia foi mantido fixo, contudo foi criada várias curvas para representá-lo. Os parâmetros desta configuração são apresentados na tabela 5 e os resultados nos gráficos 10, 11, 12 e 13.

Tabela 5 – 3ª Configuração

Parâmetro	Valor configurado
Número de dias de autonomia ( $N_D$ )	1, 2, 3, 4 e 5 dias
Profundidade de descarga (DOD)	50%
Temperatura (T)	Variável
Fator de segurança ( $\beta$ )	10%

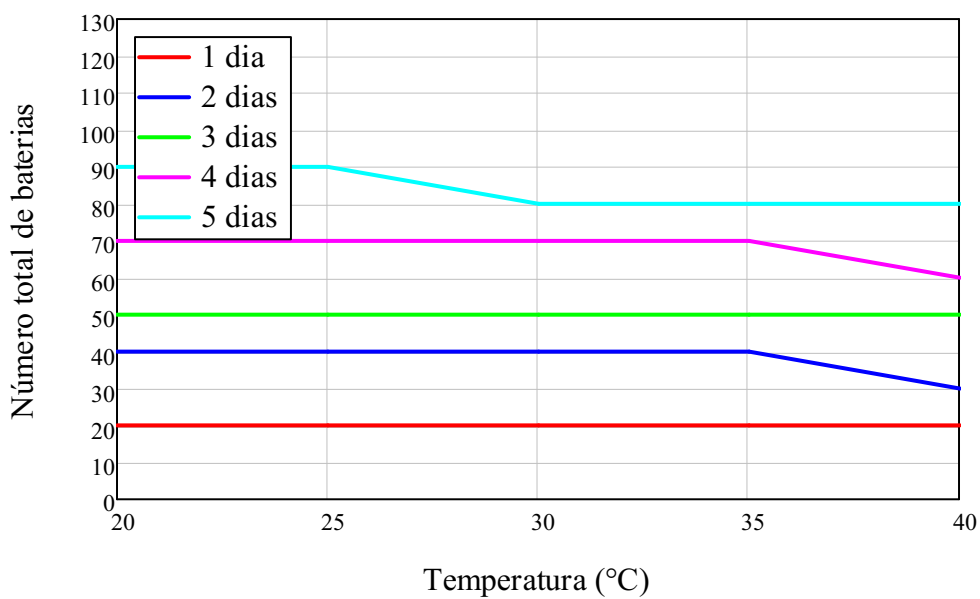
Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 10 – 3ª Configuração 45 Ah



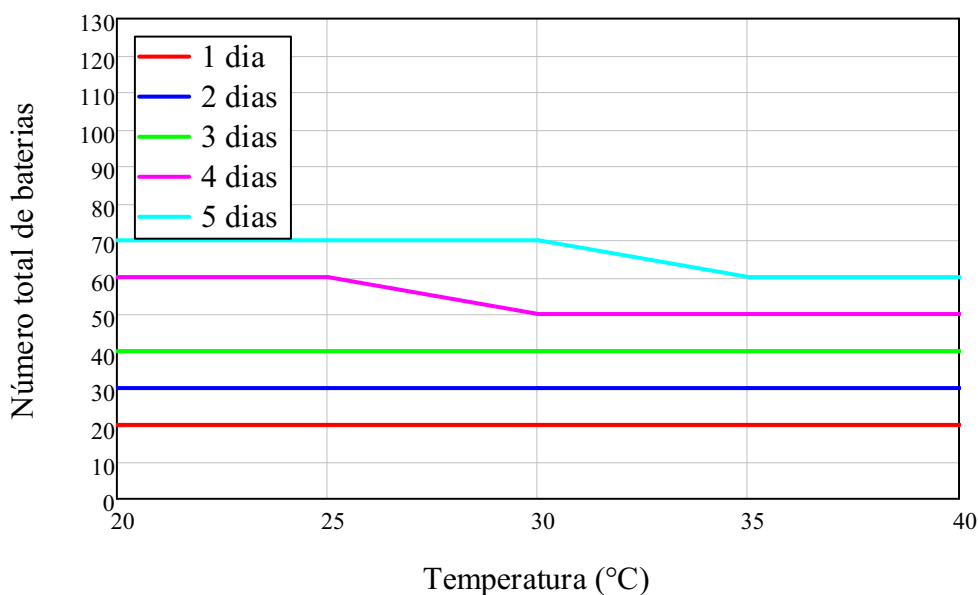
Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 11 – 3ª Configuração 63 Ah



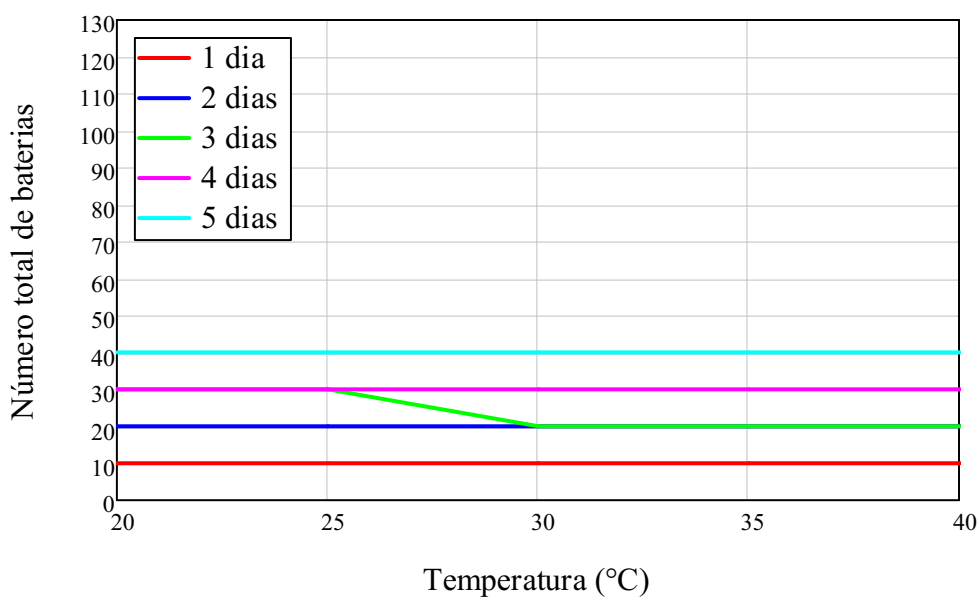
Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 12 – 3ª Configuração 80 Ah



Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 13 – 3ª Configuração 150 Ah



Fonte: Autoria própria (2021)

Nesta terceira configuração os gráficos apontam de forma mais direta o efeito da temperatura, não somente sobre a quantidade, mas também sobre a autonomia. A variação de temperatura para um menor tempo de autonomia, em todas as capacidades nominais, mostrou-se insuficientemente desnecessárias para o aumento no número total de baterias, indicando assim uma relação entre tempo de autonomia e temperatura.

Portanto, quanto maior o tempo autônomo do sistema, mais sensível este é a mudança de temperatura, principalmente para capacidades menores, as quais devem ter maiores quantidades para atender a mesma demanda.

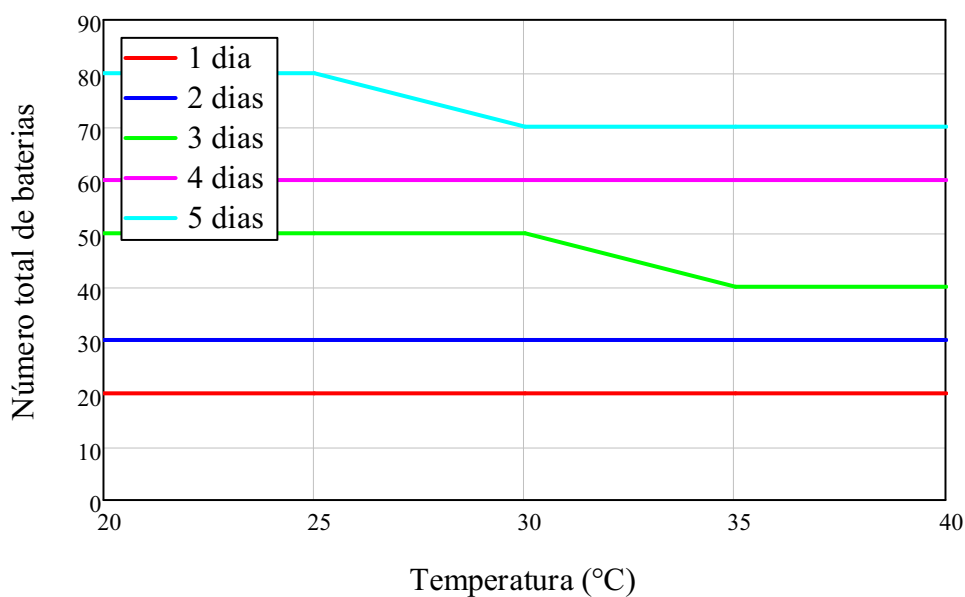
Por último é exibida a quarta configuração, da mesma forma como a terceira, com a diferença de estar dimensionada para uma profundidade de descarga maior, indicada pela tabela 6. Os resultados são apresentados nos gráficos 14, 15, 16 e 17.

**Tabela 6 – 4ª Configuração**

Parâmetro	Valor configurado
Número de dias de autonomia ( $N_D$ )	1, 2, 3, 4 e 5 dias
Profundidade de descarga (DOD)	80%
Temperatura (T)	Variável
Fator de segurança ( $\beta$ )	10%

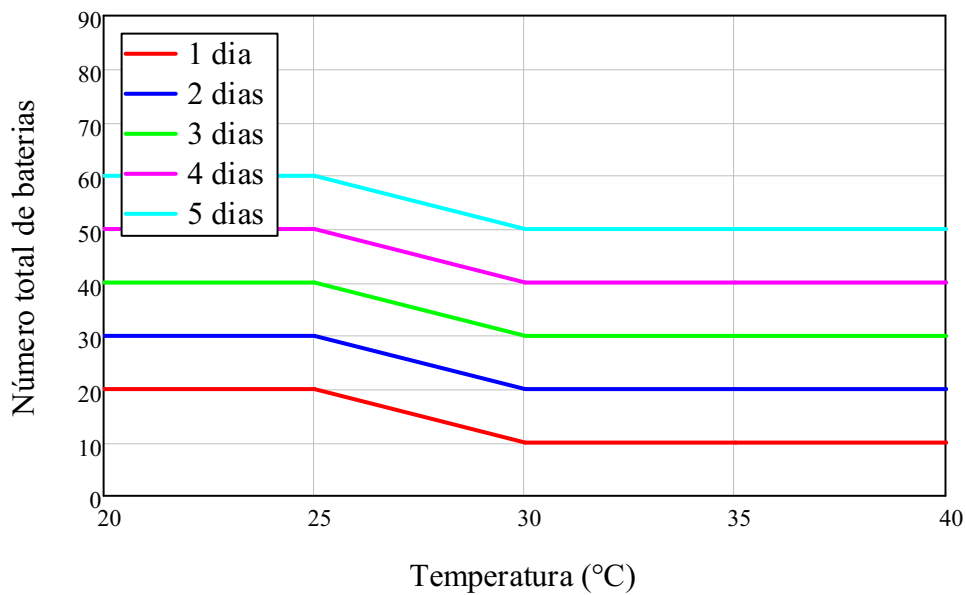
Fonte: Autoria própria (2021)

**Gráfico 14 – 4ª Configuração 45 Ah**



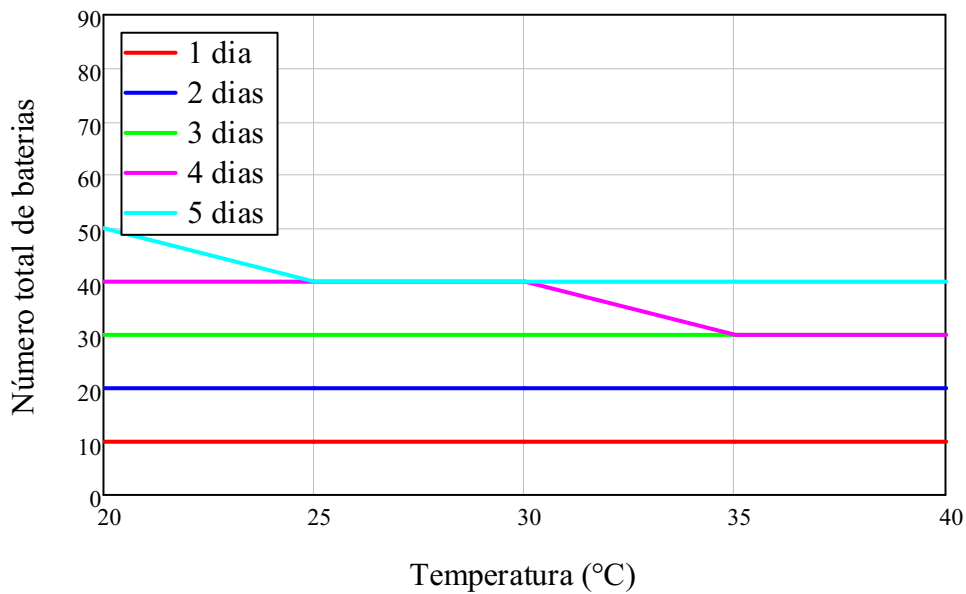
Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 15 – 4ª Configuração 63 Ah



Fonte: Autoria própria (2021)

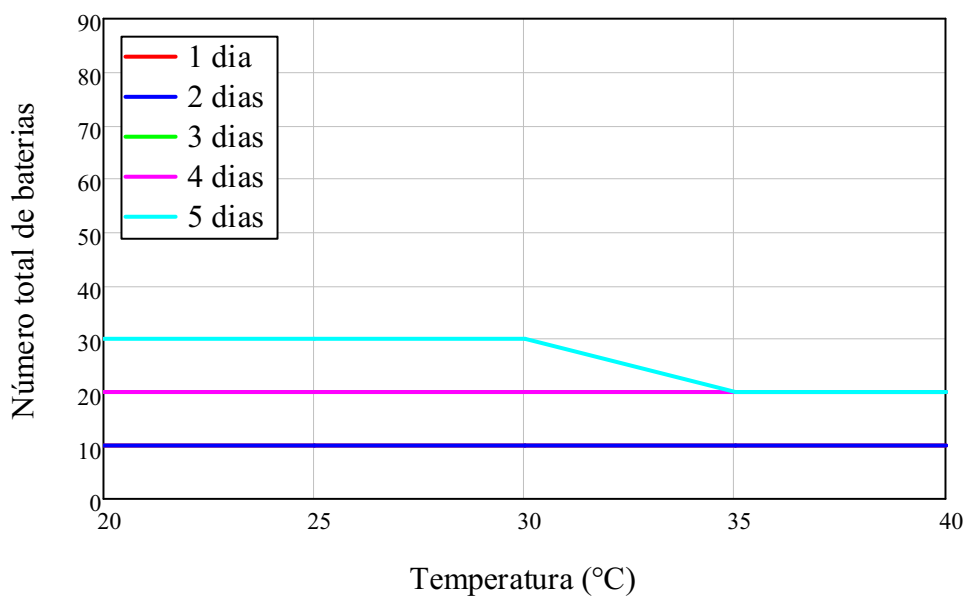
Gráfico 16 – 4ª Configuração 80 Ah



Fonte: Autoria própria (2021)



Gráfico 17 – 4ª Configuração 150 Ah



Fonte: Autoria própria (2021)

Como conclusão da quarta configuração, quando comparada a terceira, observa-se que para uma profundidade de descarga maior, há uma redução na influência da temperatura sobre o número de baterias.

Tabela 7 – Resultados de causa e efeito obtidos

Causa	Efeitos
Aumento da profundidade de descarga	O período de autonomia aumenta
	O número de baterias diminui
	Influência da temperatura sobre o número de baterias diminui
Aumento da capacidade das baterias	O período de autonomia aumenta
	O número de baterias diminui
	Influência do período de autonomia sobre o número de baterias diminui
Diminuição da temperatura	O número de baterias aumenta
Aumento do período de autonomia	Influência da temperatura sobre o número de baterias aumenta

Fonte: Autoria própria (2021)

Como o objetivo desta seção não é somente revelar uma metodologia e os resultados das planilhas, mas também estabelecer uma capacidade e uma configuração para o sistema em questão, faz-se necessário uma definição.

Primeiramente, a escolha da configuração. Devido ao fato do sistema ser projetado para atender um tipo de carga não especificado, o fator de segurança, como já percebido, será estabelecido em 10% da capacidade nominal.

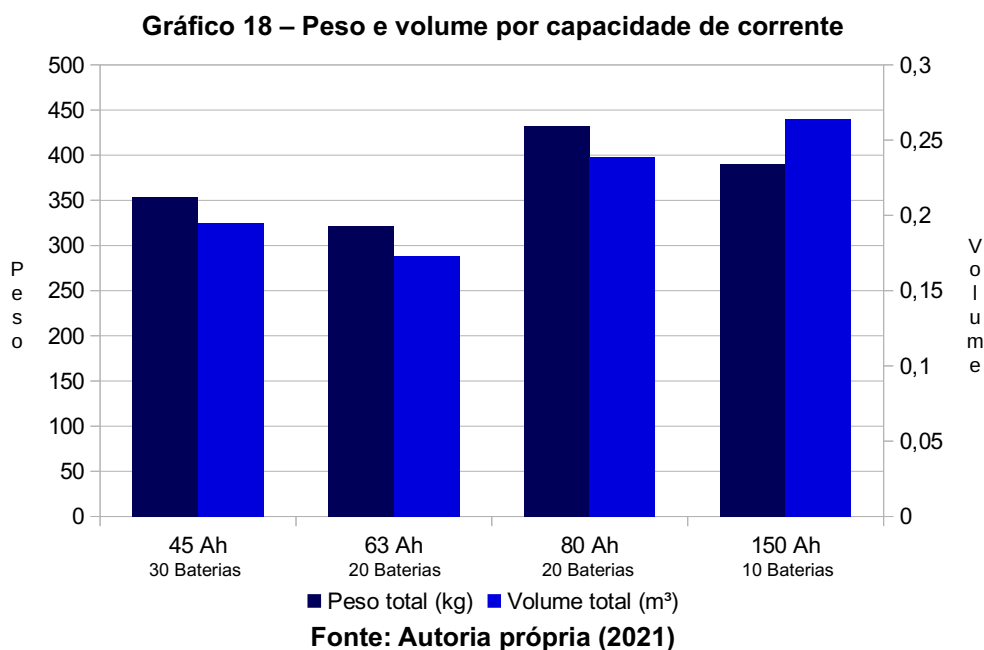
O número de dias de autonomia estabelecido é de apenas 1 dia, esta escolha decorre de fatores já mencionados, como situações de emergência ou horários de ponta.

A profundidade de descarga será considerada de 50%, com a justificativa que baterias de chumbo ácido tem um comportamento lento para carregar, o que para maiores DOD's, pode se transformar em uma situação não desejada de falta de energia no banco, como o caso das situações emergenciais.

A temperatura, sendo um parâmetro não controlado, será considerada em torno das temperaturas típicas brasileiras mais elevadas, 35 °C. Esta escolha de temperatura não deve influenciar, pela escolha de apenas um dia de autonomia.

Por fim, de maneira a justificar e compatibilizar a escolha da capacidade das baterias com a configuração desejada, será analisado os parâmetros peso e volume. Dado o objetivo do projeto nota-se a necessidade de dimensionar as baterias não só eletricamente, mas também fisicamente, pois um banco de bateria pode ser algo pequeno, como baterias para carros elétricos, assim como pode se estender a ponto de ser necessário alocar um ambiente ou unidade inteira de uma residência.

O gráfico 18 representa o peso e volume para a configuração desejada e as capacidades estudadas.



Os pesos e volumes foram retirados do catálogo de baterias da empresa Moura S.A.<sup>®</sup>. Claramente a interpretação para peso e volume é fruto do número total de baterias para cada capacidade. Contudo, algumas conclusões são retiradas das informações do gráfico.

A representação mostra que mesmo para uma diferença de 10 baterias, a capacidade de 63 Ah apresenta quase o mesmo peso e volume da representada por 45 Ah.

As baterias de 80 Ah, devido a configuração exigir duas séries de baterias em paralelo, acaba ultrapassando em peso e volume as baterias de 150 Ah.

Baterias de 150 Ah ocupam um espaço maior que todas as outras capacidades, mesmo havendo uma diferença de 20 baterias para a de 45 Ah.

Os métodos citados no decorrer do dimensionamento levaram a escolha da capacidade de 45 Ah. A escolha também levou em consideração o fator disponibilidade para projeto. A tabela 8 mostra a configuração final adotada para o projeto do sistema armazenador de energia.

**Tabela 8 – Configuração do banco de baterias**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor definido</b>
Capacidade nominal de corrente ( $C_{\text{comercial}}$ )	45 Ah
Número de dias de autonomia ( $N_D$ )	1 dia
Profundidade de descarga (DOD)	50%
Temperatura (T)	35 °C
Fator de segurança ( $\beta$ )	10%
Número total de baterias	30

**Fonte: Autoria própria (2021)**

Com a configuração final do banco de baterias, o dimensionamento é concluído. Os métodos e critérios para a decisão de uma capacidade de corrente nominal para o projeto são focados no objetivo, que é manter a carga média de uma residência por um período de tempo. No entanto, com estes mesmos métodos e critérios é possível configurar o sistema de armazenamento de energia, com baterias de chumbo ácido, para outros objetivos, e em outras circunstâncias.

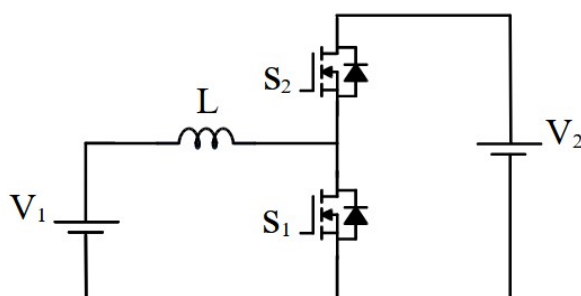
Finalizado o dimensionamento do banco de baterias, o próximo passo é estudar e projetar numericamente o conversor bidirecional que deve suprir carga e baterias.

#### 4 PROJETO DO CONVERSOR CC-CC BUCK/BOOST BIDIRECIONAL

A topologia já foi exposta na figura 2, retomando-a de forma a facilitar a análise teórica, há a figura 5.

Nesta figura foram retirados os capacitores de entrada e saída, pois para a análise teórica do trabalho desta topologia, somente se faz necessário o conhecimento do posicionamento de indutor, fontes e transistores.

Figura 5 – Topologia para análise teórica



Fonte: Autoria própria (2021)

O primeiro parâmetro estabelecido é que o conversor operará no modo de condução contínuo (MCC), ou seja, não haverá a anulação da corrente no indutor em um período de comutação dos transistores. Esta decisão tem efeito no tamanho do indutor, sendo este maior no MCC quando comparado ao MCD.

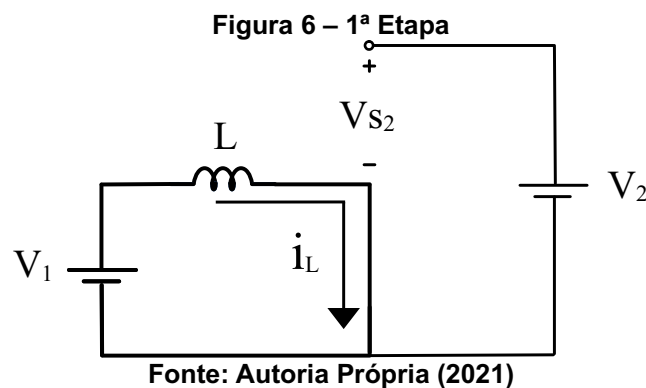
Outro ponto já mencionado é que a comutação dos transistores, ou razão cíclica, deve ter uma relação de complementariedade, pois isso não só garante que não haverá o curto circuito no braço, como também será observado, estabelece o sentido do fluxo de energia. A equação (7) deve elucidar esta relação.

$$D_2 = 1 - D_1 \quad (7)$$

#### 4.1 Etapas de operação

Conversores bidirecionais, como o próprio nome diz, têm duas direções ou sentidos de corrente. Contudo a análise teórica destes circuitos não necessariamente se faz nos dois sentidos, para efeito de explicação e adotando esta metodologia, as etapas de operação analisadas são apenas em um sentido de fluxo de energia, pois no sentido contrário o mesmo comportamento é esperado, evitando assim redundância no trabalho.

O estudo se faz no sentido Boost, fluxo de corrente indo da fonte 1 para a fonte 2, contudo a análise para o sentido Buck não deve apresentar diferenças, apenas a razão cíclica considerada pode alterar as equações dependendo do transistor escolhido para a análise. O conversor Buck/Boost bidirecional operando em MCC tem somente duas etapas de operação. A primeira etapa é considerada quando o transistor 1 está conduzindo, e o transistor 2 está bloqueando, como demonstra a figura 6.

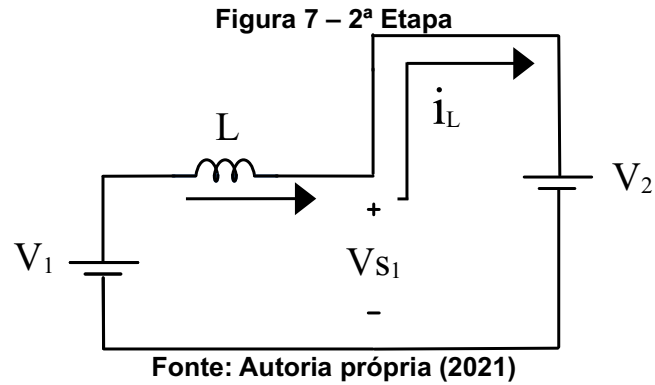


Através da análise de circuitos é possível estabelecer o comportamento elétrico do conversor. Desta etapa se observa duas relações, a tensão no indutor (equação (8)) e a tensão sobre o transistor 2 (equação (9)).

$$V_L = V_1 \quad (8)$$

$$V_{S2} = V_2 \quad (9)$$

A segunda etapa de operação se inicia quando o transistor 1 abre e o transistor 2 começa a conduzir, como ilustrado na figura 7. Da segunda etapa são obtidas as equações (10) e (11).



$$V_L = V_1 - V_2 \quad (10)$$

$$V_{S1} = V_2 \quad (11)$$

Devido ao fato da tensão da fonte 1 ser menor que a tensão da fonte 2, a tensão imposta sobre o indutor na 2ª etapa assume polaridade oposta da 1ª etapa.

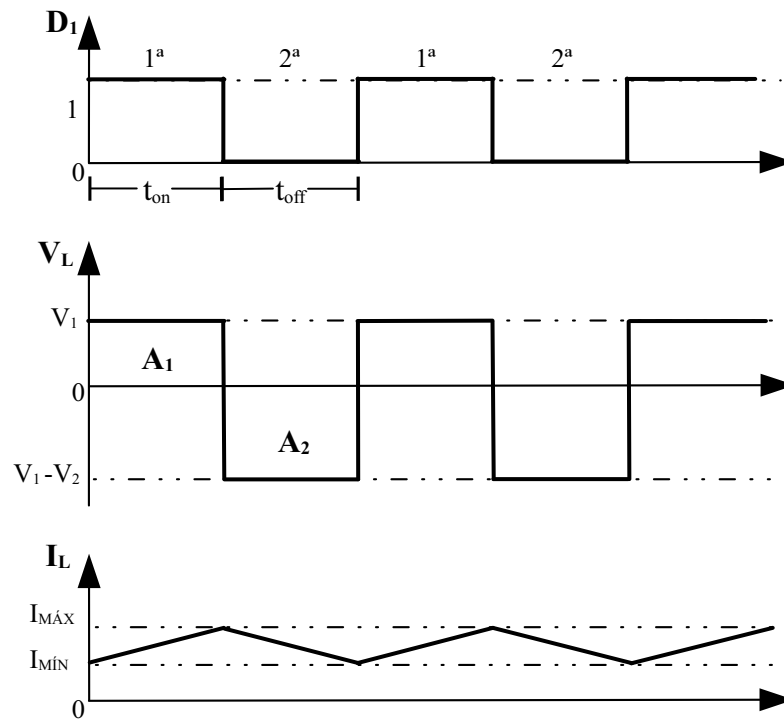
## 4.2 Equacionamento dos componentes

Partindo da seção 4.1 é possível definir graficamente o comportamento teórico do sistema e assim estabelecer as equações que regem as características dos componentes. Desta maneira é alcançado a figura 8, expondo o comportamento da tensão e corrente no indutor a partir do período de comutação.

A razão cíclica ou razão de trabalho analisada é do ponto de vista do transistor 1. Esta razão é expressa pela equação (12).

$$D_1 = \frac{t_{on1}}{T} \quad (12)$$

**Figura 8 – Tensão e corrente teóricas no indutor**



Fonte: Autoria própria (2021)

#### 4.2.1 Razão cíclica nominal

Partindo da premissa que a tensão média no indutor é nula em regime permanente, havendo necessidade de garantir a não saturação, então observa-se a relação (13).

$$A_1 + A_2 = 0 \quad (13)$$

$$V_1 * D + (V_1 - V_2) * (1 - D) = 0 \quad (14)$$

Isolando a razão cíclica encontra-se a equação (15).

$$D = \frac{V_2 - V_1}{V_2} \quad (15)$$

Definido a razão de trabalho é possível estabelecer também o ganho estático. A obtenção do ganho estático define como os componentes e a razão cíclica in-



fluenciam na relação entrada e saída do conversor. De forma a obter este ganho é analisado novamente a tensão sobre o indutor.

Manipulando algebricamente a equação (14) é encontrado o ganho estático, equação (16).

$$G = \frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{1-D} \quad (16)$$

A análise do fluxo de potência partiu da topologia do conversor Buck/Boost que sempre deve manter a relação entre as tensões 1 e 2, ou seja, a tensão 1 deve sempre ser menor que a tensão 2. Com esta configuração fixa observa-se que o ganho estático deve ser fixo e conseqüentemente a razão de trabalho. O que demonstra que o sentido do fluxo de potência é definido através da variação da razão cíclica nos transistores.

#### 4.2.2 Indutor

O equacionamento da indutância é feito partindo da 1ª etapa de funcionamento do conversor. Conhecendo a equação que rege o comportamento de um indutor e comparando com a equação (8) verifica-se a relação (17).

$$V_1 = L \frac{\Delta I_L}{\Delta T} \quad (17)$$

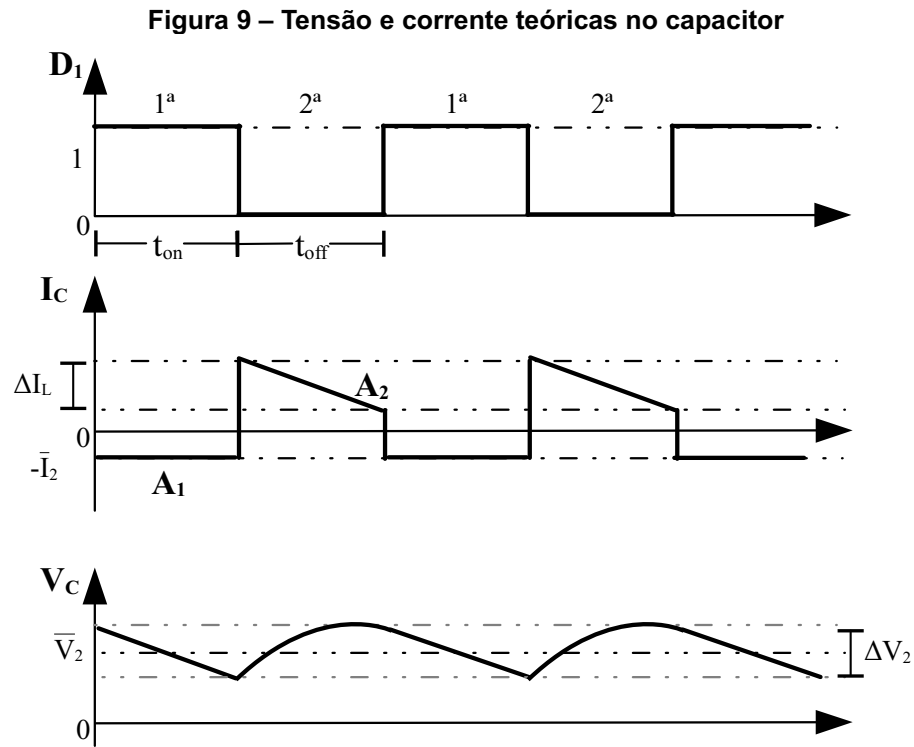
Manipulando a equação com o objetivo de encontrar uma relação entre a indutância e as especificações de projeto do conversor, encontra-se a equação (18).

$$L = V_1 \frac{D}{\Delta I_L f_S} \quad (18)$$

#### 4.2.3 Capacitores

Retomando os capacitores, para seu equacionamento será seguida a mesma metodologia usada para dimensionamento do indutor. A figura 9 ilustra o comporta-

mento teórico da corrente e tensão no capacitor para o sentido de fluxo adotado, ou seja, este equacionamento é para o capacitor em paralelo a fonte de tensão 2, barramento do aerogerador.



Esta representação foi desenvolvida através de análise nodal, a qual resultou que o capacitor é responsável pela componente alternada da corrente enquanto que a componente contínua deve estar presente na carga, portanto a corrente média no capacitor deve ser nula.

Partindo da equação que rege o comportamento do capacitor e comparando analiticamente, com a 1ª etapa de funcionamento do conversor, na figura 9, encontra-se a equação (19).

$$-I_2 = C \frac{-\Delta V_2}{t_{on}} \quad (19)$$

Isolando a capacitância e substituindo o intervalo de tempo em função da razão cíclica, define-se a capacitância desejada em (20).

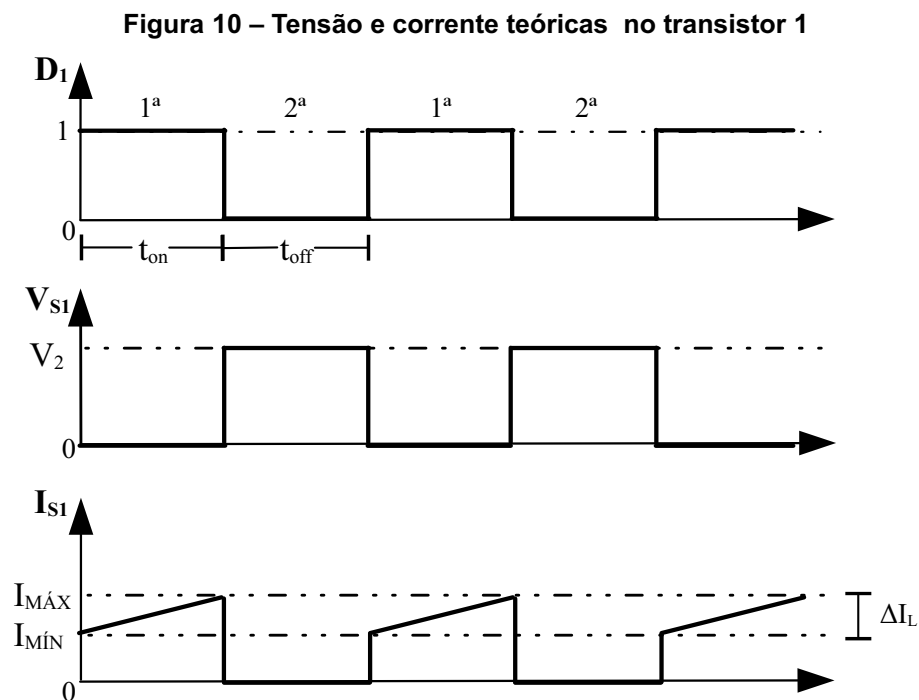
$$C_{boost} = \frac{I_2 D}{\Delta V_2 f_s} \quad (20)$$

Como conclusão deste tópico se observa que a capacitância do lado Boost é igual ao dimensionamento do mesmo componente no conversor CC–CC tradicional. Com isto é possível inferir que a capacitância para o lado Buck é também a mesmo do conversor tradicional equivalente, resultando na relação (21). (ILLA FONT, 2021)

$$C_{buck} = \frac{V_1 D}{8 L \Delta V_1 f_s^2} \quad (21)$$

#### 4.2.4 Transistores

Para o projeto e escolha dos transistores é necessário conhecer os valores máximos de tensão e corrente e as correntes médias e eficazes as quais estão impostas sobre o componente. Novamente, foi feito um estudo teórico baseado nas etapas de operação do conversor e exposto graficamente, como na figura 10.



Fonte: Autoria própria (2021)

Nesta seção, devido ao fato de haver uma grande quantidade de grandezas a serem definidas, foi optado por montar uma tabela de forma a resumir. Todavia, é explicado como os resultados foram obtidos.

Tanto o transistor 1 quanto o 2 estão expostos a mesma tensão máxima proveniente da fonte 2, o que já foi estabelecido na seção Etapas de operação, contudo, como nesta parte já foi definido o capacitor, é possível considerar a ondulação de tensão.(I)

Observando a corrente sobre o transistor, verifica-se que a ondulação de corrente pode ser desenvolvida para um valor médio dentro do período de comutação, que por sua vez, quando multiplicado pela razão cíclica resulta na corrente média. (II)

A corrente máxima, assim como a tensão máxima, é corrente média na carga, mais a consideração da ondulação de corrente, agora proveniente do indutor. (III)

Por fim, a corrente eficaz é alcançada através integração da raiz da grandeza média elevada ao quadrado, avaliado no período de condução. (IV)

**Tabela 9 – Correntes e tensões impostas sobre os transistores**

Grandeza	Transistor 1	Transistor 2	Numeração
Tensão máxima	$V_{S1} = V_2 + \frac{\Delta V}{2}$	$V_{S2} = V_2 + \frac{\Delta V}{2}$	I
Corrente Média	$I_{T1}^- = DI_1$	$I_{T2}^- = -DI_1$	II
Corrente Máxima	$I_{MT1} = I_1 + \frac{\Delta I_L}{2}$	$I_{MT2} = -I_1 - \frac{\Delta I_L}{2}$	III
Corrente Eficaz	$I_{\sqrt{1}} = I_1 \sqrt{D}$	$I_{\sqrt{2}} = -I_1 \sqrt{D}$	IV

**Fonte: Autoria própria (2021)**

Como conclusão esta seção apresentou que as características de projeto dos dois transistores devem ser iguais, o que valida também a análise da topologia, visto que um transistor conduz enquanto o outro bloqueia, ambos devem ser capazes de suportar as mesmas grandezas.

### 4.3 Especificações do conversor

As especificações de projeto do conversor são apresentadas na tabela 10.

Potência ( $P_c$ )	1200 W
Tensão no barramento CC ( $V_2$ )	250 V
Tensão do banco de baterias ( $V_1$ )	120 V
Razão Cíclica ( $D$ )	0,52
Frequência de comutação ( $f_s$ )	50 kHz
Ondulação de corrente no indutor ( $\Delta I$ )	20%
Ondulação de tensão ( $\Delta V$ )	1%

**Fonte: A autoria própria (2021)**

Com isso, são calculados os valores numéricos ideais do indutor e dos capacitores para efeito de simulação numérica, sendo os valores encontrados apresentados na tabela 11.

Indutor ( $L$ )	624 $\mu H$
Capacitor Boost ( $C_{boost}$ )	19,97 $\mu F$
Capacitor Buck ( $C_{buck}$ )	4,17 $\mu F$

**Fonte: A autoria própria (2021)**

### 4.4 Projeto físico do indutor

Inicialmente, o projeto do indutor seria para um núcleo EE de ferrite (BARBI; FONT; ALVES, 2002). No entanto, com o objetivo de aproveitar tecnologias emergentes o presente trabalho propõe o uso do núcleo de ferro-silício-boro toroidal, ou pó de ferro (LANGE, 2012)(PEREIRA, 2016). Dentre as vantagens deste tipo de núcleo, pode-se citar o total englobamento das linhas de campo e custos de núcleo e bobina baixos, porém há um elevado custo para o processo de enrolamento das bobinas.

O projeto com núcleo toroidal segue critério de ondulação máxima de corrente, colocando em tópicos:

- É dimensionado o projeto para o menor núcleo possível estabelecido através do catálogo de um fabricante.
- Equacionado o projeto através de uma planilha de cálculo (APÊNDICE B).
- Averiguado se o núcleo aceita a ondulação de corrente proposta pelas especificações do conversor, vista através da corrente máxima de saturação e do número de espiras.
- Caso não seja possível, é alterado o núcleo para o próximo maior.

Este procedimento é feito até que o núcleo permita o número de espiras suficiente para a indutância requerida. As equações para os cálculos seguem como exposto. A indutância é obtida com a fórmula (22).

$$L = \frac{(\mu_r * \mu_0 * A_c * N^2)}{l_c} \quad (22)$$

Partindo desta equação é encontrado o número de espiras para o núcleo em questão. A equação (22) mostra que a permeabilidade do material se altera com a indutância, que de acordo com (18), se altera com a frequência. Portanto a variação da frequência pode variar a permeabilidade magnética do material.

O correto dimensionamento do indutor deve levar em consideração a não saturação deste diante da elevação da corrente, para garantir esta regra é imposto o limite de 80% da densidade de fluxo magnético no número de espiras, como segue a equação (23).

$$N_{máx} = \frac{0,8 B_{sat} * l_c}{\mu_r * \mu_0 * I_{Lmáx}} \quad (23)$$

Além de atender eletromagneticamente, o núcleo deve ser capaz de comportar fisicamente o número de espiras necessário, a equação (24) demonstra o número máximo de espiras que o núcleo pode comportar. Esta relação já estabelece um fator de utilização da janela do núcleo.

$$N_{m\acute{a}x} = \frac{k_u * ID^2}{d_{ef}^2} \quad (24)$$

Por último deve ser então definido a área da seção transversal do condutor que será utilizado para o bobinamento do indutor, este dado, como visto, influência no tamanho do núcleo. O cabo foi escolhido pelo método de diâmetro máximo a partir da profundidade de penetração, evitando o efeito *Skin* em condutores expostos a frequências elevadas. A equação (25) revela este diâmetro máximo através dos parâmetros do conversor.

$$d_{m\acute{a}x} = \frac{15}{\sqrt{f_s}} \quad (25)$$

Com as equações definidas e a planilha estabelecida os resultados encontrados para o núcleo de pó de ferro estão evidenciados na tabela 12. Em seguida é então alcançado o condutor ideal para o projeto, como mostra a tabela 13.

O condutor proposto é o fio Litz, está foi a maneira de contornar o problema do efeito *Skin* e também a suportabilidade física dos cabos pelo núcleo.

**Tabela 12 – Especificações do núcleo do indutor**

Permeabilidade relativa do material ( $\mu_r$ )	60
Densidade de fluxo de saturação ( $B_{sat}$ )	1,5 T
Área da seção transversal do núcleo ( $A_c$ )	199 mm <sup>2</sup>
Dimensões (OD * ID * HT)	(47,66 x 23,3 x 19) mm
Comprimento média de uma espira ( $l_e$ )	62,33 mm
Comprimento do caminho magnético ( $l_c$ )	107 mm
Fator de utilização da janela ( $k_u$ )	0,65

**Fonte: Autoria própria (2021)**

**Tabela 13 – Especificações do condutor**

Área da seção transversal do condutor ( $S$ )	0,00032 $cm^2$
Área total da seção transversal ( $S_t$ )	0,01 $cm^2$
Número de fios em paralelo ( $n_p$ )	2
Diâmetro efetivo do condutor ( $d_{ef}$ )	0,228 $cm$
Número de espiras ( $N$ )	67
Fator de utilização da janela real ( $k_{ur}$ )	0,64

Fonte: Autoria própria (2021)

#### 4.5 Especificação dos transistores

Para a escolha dos transistores, foi levado em consideração a redução das perdas por condução e comutação. Portanto uma tecnologia de transistores atualmente relacionada a este tema é a CoolMOS™, o qual, fornece todos os benefícios da superjunção presente nos MOSFET's com rápido chaveamento, oferecendo uma melhor eficiência, reduzindo as perdas no gate e apresentando fácil implementação com grande confiabilidade. (INFINEON, 2012).

Os dois transistores escolhidos são do modelo IPW65R019C7, tendo algumas de suas características apresentadas na tabela 14.

**Tabela 14 – Especificações IPW65R019C7**

Tensão máxima suportada ( $V_{DSmax}$ )	650 V
Resistência Drain-Source ( $R_{DSon}$ )	19m $\Omega$
Tempo de subida ( $t_{on}$ )	27ns
Tempo de descida ( $t_{off}$ )	5ns

Fonte: Autoria própria (2021)

#### 4.6 Perdas e rendimento

O cálculo de perdas em conversores de potência estabelece um importante parâmetro de conversão de energia, o rendimento. A partir do rendimento é averiguado, os resultados para a correta escolha dos componentes. Para tanto, a soma das perdas nos componentes deve ser feita.



No presente trabalho serão desconsideradas as perdas no capacitor devido a baixa influência quando comparada aos outros componentes, contudo, é conhecido que essa potência perdida pelo capacitor está na grandeza dos mili watts.

Logo, as perdas avaliadas estão somente no indutor e transistores.

#### 4.6.1 Perdas no indutor

Uma grande vantagem na escolha dos indutores toroidais de pó de ferro reside na baixíssima perda de energia por parte do núcleo. As perdas nestes núcleos são referenciadas por fabricantes em seus catálogos como densidade de perda, sendo a grandeza potência e volume, com a unidade em miliwatts e centímetros cúbicos, respectivamente.

No entanto, o núcleo escolhido para o projeto apresenta perdas em miliwatts, propondo, assim como para o capacitor, a desconsideração das perdas para o dimensionamento numérico. No mais, sabe-se que na prática haverá perda de energia o qual deve refletir no rendimento do conversor, mas não tanto quanto as perdas no cobre do indutor.

As perdas no cobre são estabelecidas através da resistência total do cabo definida pela equação (26), já considerando o fio Litz.

$$R = \frac{\rho l_t}{N_p Q_{litz} S_{litz}} \quad (26)$$

Com isso as perdas são determinadas pela equação (27).

$$P_{fio} = R_{fio} I_{Lef}^2 \quad (27)$$

#### 4.6.2 Perdas nos transistores

Já as perdas nos transistores, são divididas em perdas em condução e em comutação, as equações (28) e (29) ilustram estas, respectivamente.

$$P_{cond} = R_{DSon} I_{Sef}^2 \quad (28)$$

$$P_{com} = \frac{V_{Smax} I_{Smax} f_s (t_{on} + t_{off})}{2} \quad (29)$$

As perdas totais relacionadas ao transistor são a soma destas duas equações.

#### 4.6.3 Rendimento do conversor

A soma de todas as perdas anteriores, resulta na potência total dissipada pelo conversor, como apresentado na equação (30).

$$P_T = 2(P_{com} + P_{cond}) + P_{fio} \quad (30)$$

A tabela 15 mostra as perdas numéricas.

**Tabela 15 – Perdas nos componentes**

Perdas em condução	0,998 W
Perdas na comutação	2,2 W
Perdas no fio	3,46 W

**Fonte: Autoria própria (2021)**

Com esta potência, o rendimento é verificado pela equação (31).

$$\eta = \frac{P_c}{P_T + P_c} 100 \quad (31)$$

O resultado numérico para a topologia do conversor apresenta alto rendimento, relação (32). Isso se deve, em grande parte, a tecnologia do transistor proposta.

$$\eta = 99 \% \quad (32)$$

Esta seção finaliza a parte de análise de projeto do circuito de potência, com os resultados apresentando que a topologia mostra significativos benefícios, como

baixas perdas, simplicidade de projeto e boa margem de corrente garantindo a segurança da carga, o banco de baterias.

#### 4.7 Simulações numéricas em malha aberta

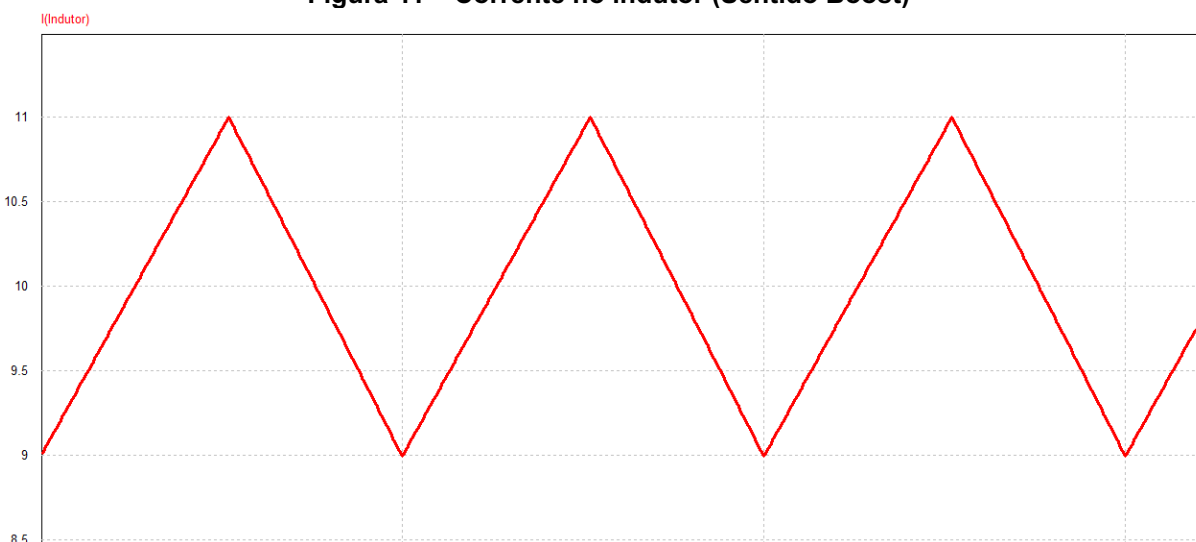
A simulação foi dividida em duas etapas, pois faz-se necessário adotar um sentido de corrente por vez. Ainda mais, deve haver a confirmação das mesmas grandezas elétricas no circuito nos dois sentidos. A primeira parte simulada é chamada de Boost, pois o fluxo de potência vai da bateria em direção ao barramento, elevando a tensão, como o conversor tradicional. A segunda parte leva o nome Buck, com a corrente sendo vista do barramento para o banco de baterias. O objetivo da simulação em malha aberta, além de comprovar a análise teórica do conversor, é verificar se os parâmetros estabelecidos na tabela 10 são atendidos.

Para efeito de simulação, há a necessidade de descobrir a resistência de carga para as duas etapas, emulando assim uma situação ideal. As resistências foram encontradas da relação de potência e tensão do conversor. A simulação se encontra no APÊNDICE D.

##### 4.7.1 Simulação no sentido Boost

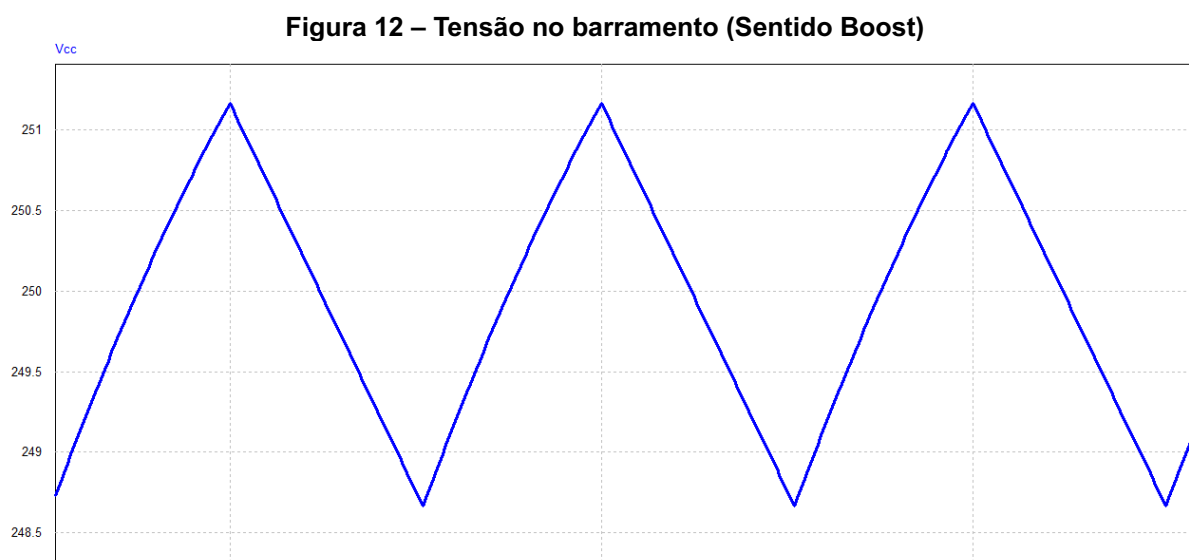
O comportamento observado nos resultados encontra-se em regime permanente. Primeiramente a simulação é para o lado Boost, onde a corrente no indutor é exposta na figura 11.

Figura 11 – Corrente no indutor (Sentido Boost)



Fonte: A autoria própria (2021)

Já a figura 12, ilustra o comportamento da tensão no barramento. Verificando assim o dimensionamento do capacitor Boost.



Fonte: Autoria própria (2021)

Com a simulação estando de acordo com os cálculos da seção 4.2 é comprovado o correto dimensionamento dos componentes passivos, indutor e capacitor. De forma a comparar com os cálculos teóricos da seção 4.2, a tabela 16 expõe os valores obtidos com a simulação.

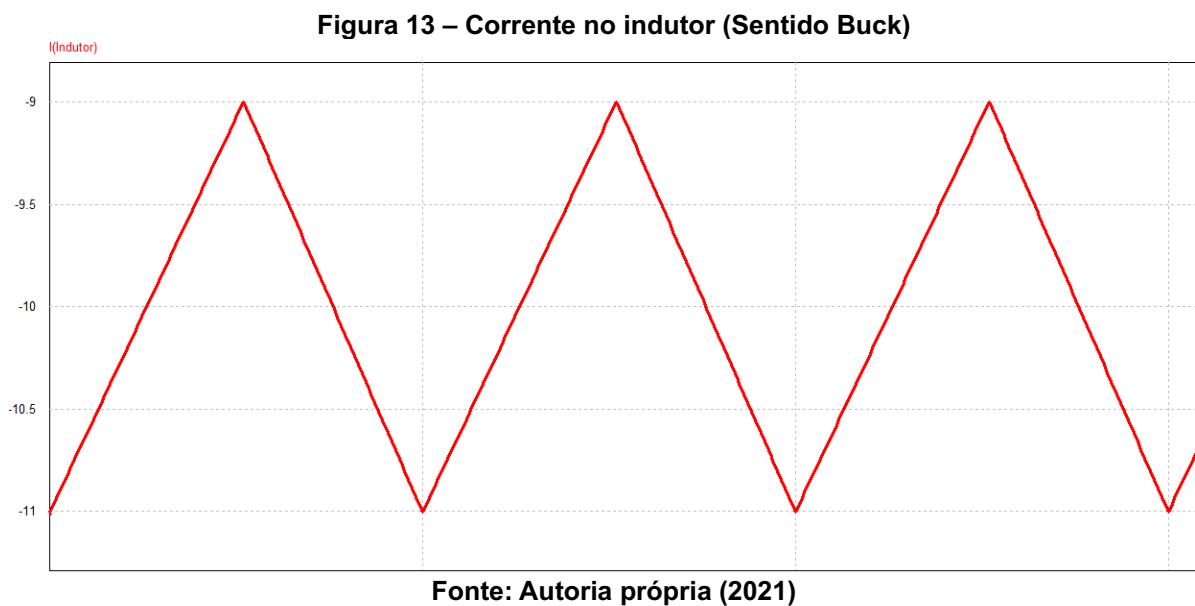
**Tabela 16 – Comparação dos resultados teóricos e simulados 1**

Grandeza	Teoria	Simulação	Erro (%)
Resistência de carga (barramento) ( $R_{cc}$ )	0	52,083 $\Omega$	-
Corrente média no indutor ( $I_L$ )	10 A	10,2 A	2
Corrente máxima no indutor ( $I_{Lmáx}$ )	11 A	11 A	0
Variação de corrente no indutor ( $\Delta I$ )	2 A	2 A	0
Tensão máxima no transistor ( $V_{Tmáx}$ )	250 V	252,5 V	1
Corrente média no transistor ( $I_{Tmed}$ )	5,2 A	5,3 A	1,92
Corrente eficaz no transistor ( $I_{Tef}$ )	7,211 A	7,14 A	0,98
Corrente média no barramento ( $I_{cc}$ )	4,8 A	4,82 A	0,41

Fonte: Autoria própria (2021)

#### 4.7.2 Simulação no sentido Buck

A simulação para o sentido Buck exibe em específico o comportamento da tensão sobre o banco de baterias, ou seja, o dimensionamento do capacitor Buck. Assim como a figura 13 expõe a corrente no indutor.



É observado o sentido negativo da corrente nesta simulação, o que corrobora com a ideia bidirecional do conversor. Da mesma forma, como para o sentido Boost, a ondulação de corrente é a mesma estabelecida nas especificações do conversor. A tensão no banco de baterias é vista na figura 14.

**Figura 14 – Tensão no banco de baterias (Sentido Buck)**



Fonte: Autoria própria (2021)

**Tabela 17 – Comparação dos resultados teóricos e simulados 2**

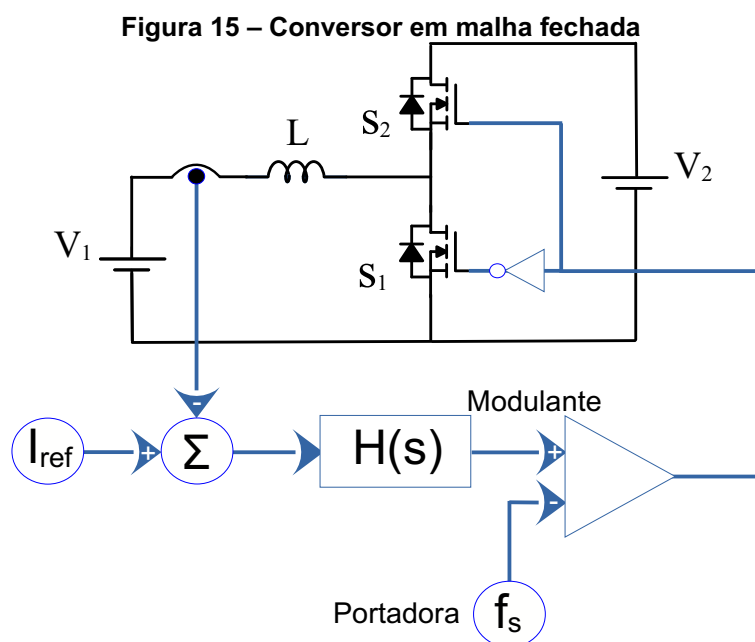
Grandeza	Teoria	Simulação	Erro (%)
Resistência de carga (Bateria) ( $R_{bat}$ )	0	12 $\Omega$	-
Corrente média no indutor ( $I_L$ )	10 A	10 A	0
Corrente máxima no indutor ( $I_{Lmáx}$ )	11 A	11 A	0
Variação de corrente no indutor ( $\Delta I$ )	2 A	2 A	0
Tensão máxima no transistor ( $V_{Tmáx}$ )	250 V	252,5 V	1
Corrente média no transistor ( $I_{Tmed}$ )	5,2 A	5,2 A	0
Corrente eficaz no transistor ( $I_{Tef}$ )	7,211 A	7,14 A	0,98
Corrente média no barramento ( $I_{cc}$ )	4,8 A	4,78 A	0,41
Variação de tensão na bateria ( $\Delta V_1$ )	1,2 V	1,3 V	8,33

Fonte: Autoria própria (2021)

Os resultados demonstraram a compatibilidade da teoria e do dimensionamento com a simulação, evidenciando assim a metodologia adotada. Através desta verificação é possível estabelecer quais os transistores comerciais e assim pré determinar as perdas do conversor.

## 4.8 Controle

A figura 15 ilustra o conversor com a malha de controle. Através da figura é possível verificar o uso da técnica de modulação PWM, já extremamente difundida na engenharia elétrica. O circuito propõe um comparador que recebe dois sinais, a portadora e o sinal modulante. A portadora, como o nome já diz, porta a frequência do sinal que será usado para o chaveamento dos transistores. Já a modulante é o sinal responsável por modular a saída através da variação da razão de trabalho, ou seja, a modulante é o sinal que deseja-se controlar.



Fonte: Autoria própria (2021)

Outro ponto importante observado na figura 15 é a troca da razão cíclica  $D$  nos transistores em relação a análise de potência. Esta troca foi feita para facilitar a análise do controle, sendo portanto adotado o sentido Buck. A mudança não deve alterar o circuito de potência, pois o único postulando do conversor é a comutação alternada, ou seja, havendo a complementariedade da razão de trabalho nos dois transistores, no mesmo período, não haverá o curto circuito de braço.

#### 4.8.1 Modelagem do conversor

A modelagem do conversor tem grande importância no conhecimento da influência do circuito, sendo a partir deste, definido o controlador. O projeto de controle foi feito em uma planilha de cálculo a parte referenciada pelo APÊNDICE C.

Com o objetivo de controlar a corrente no indutor é analisado as etapas de operação do conversor, onde é possível estabelecer dois circuitos em razão da tensão no indutor, um para cada etapa. Logo, fazendo o produto pelo tempo ao qual elas atuam é alcançado a relação (33) onde a tensão no indutor é uma variável de estado.

$$\overline{v_L} = (E - V_0) d + (-V_0)(1 - d) \quad (33)$$

Relacionando a relação (33) com a equação característica do indutor e rearranjando, é definido a ligação com a corrente, como demonstra a equação (34).

$$\frac{d i_L}{dt} = \frac{1}{L} (Ed - V_0) \quad (34)$$

Considerando o comportamento estático do conversor, como o analisado para a parte de potência, onde não há variação de corrente, observa-se a obtenção da razão cíclica simples como um conversor Buck.

$$0 = \frac{1}{L} (ED - V_0) \quad (35)$$

$$D = \frac{V_0}{E} \quad (36)$$

Agora, para obter a equação dinâmica é utilizado a equação (34) com uma linearização em torno do ponto de operação, alcançando assim o modelo de pequenos sinais, equação (38).

$$\frac{d(I_L + \overline{i_L})}{dt} = \frac{1}{L} E (D + \overline{d}) - V_0 \quad (37)$$

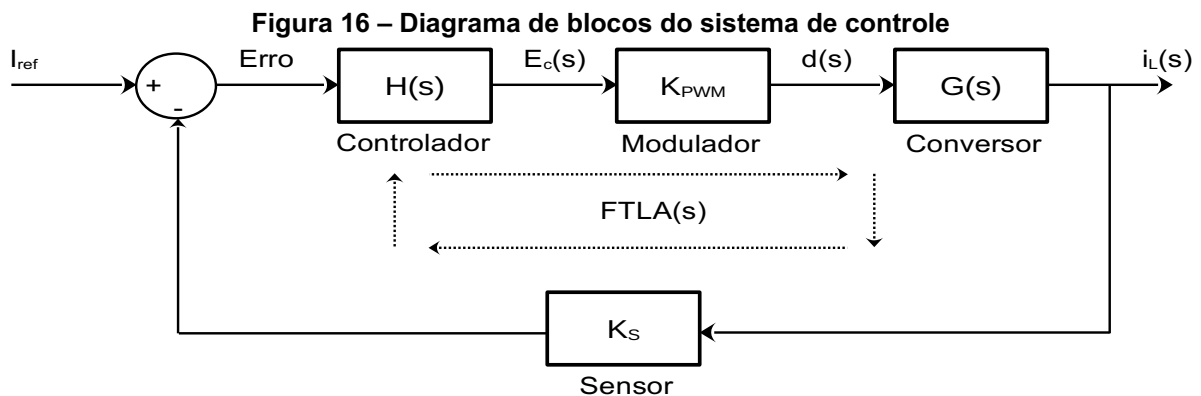


$$\frac{d\bar{i}_L}{dt} = \frac{1}{L} E \bar{d} \quad (38)$$

Logo, aplicando a transformada de Laplace

$$\frac{\bar{i}_L(s)}{\bar{d}(s)} = \frac{E}{sL} \quad (39)$$

De acordo com a equação (39) a planta tem um comportamento integrativo para a corrente. Com a modelagem em mãos é possível montar o diagrama de blocos equivalente do projeto, exposta na figura 16.



Fonte: Autoria própria (2021)

O diagrama de blocos mostra claramente os pontos a serem considerados no controlador. O primeiro é a função de transferência do modulador PWM, onde será considerado somente como um ganho e esse ganho terá valor unitário, devido a maior facilidade para o estudo teórico.

Já a segunda é a função de transferência do sensor, os sensores sempre são vistos como uma relação direta, ou seja, um ganho estático. Neste caso, devido a leitura ser da corrente no indutor, essa grandeza será convertida em tensão pelo sensor, estando assim apta ao controlador. A relação entre tensão e corrente será unitária, novamente pela facilidade do projeto teórico, e assim é considerada como uma tensão de 10 V.

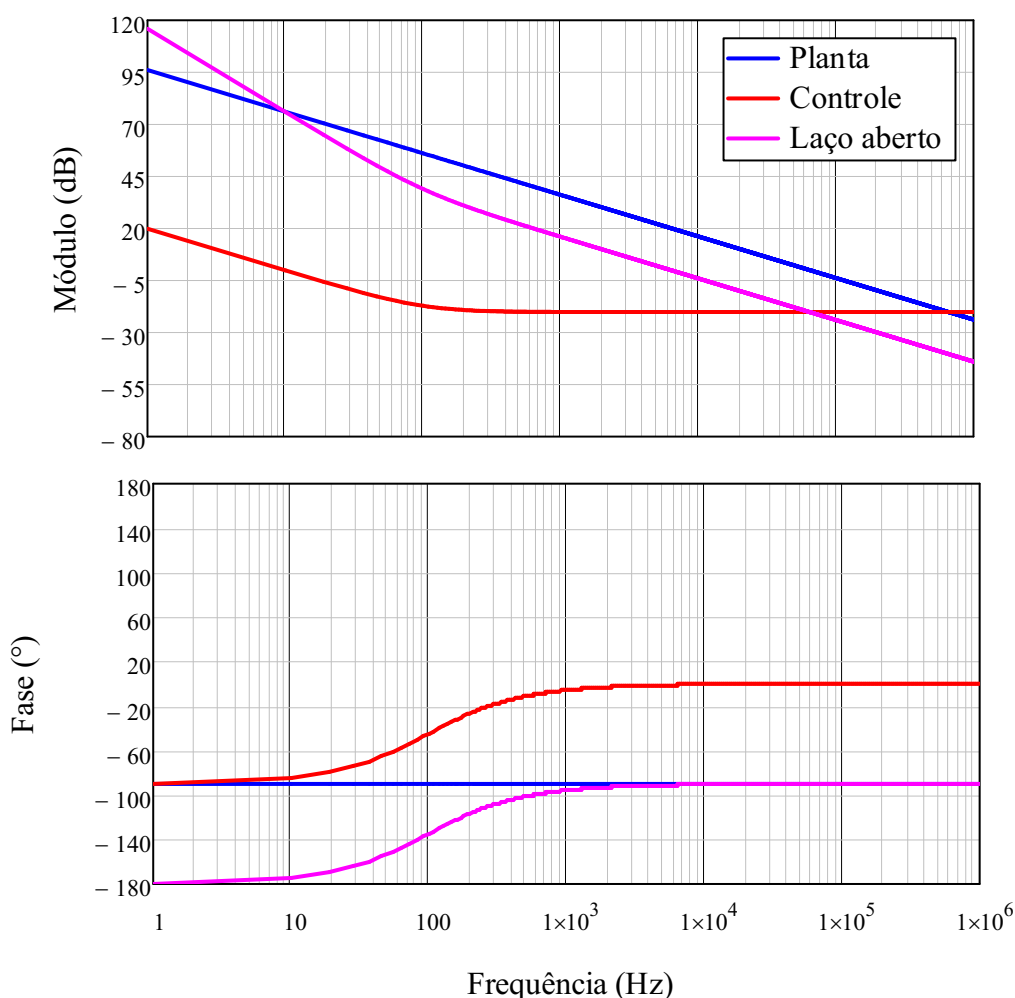
Outro importante fato visto pelo diagrama de blocos é que o controle é estabelecido no sistema da malha de corrente do conversor, não sendo proposto um controle multimalhas, com a tensão das baterias. E ainda o modelo de bateria pro-

posto é o modelo de fonte tensão, sem considerar fatores como a autodescarga, por exemplo. Estes fatores podem ser estudados em trabalhos futuros.

#### 4.8.2 Projeto do controlador

Estabelecidos os parâmetros restantes foi projetado o controlador. Foi escolhido o controlador PI, dada a alta aplicabilidade na eletrônica de potência, sendo um controlador altamente difundido. O projeto, como já mencionado no presente trabalho, foi feito com base na resposta em frequência e leva em conta a função de transferência de laço aberto representada pela figura 16. Os diagramas de Bode da planta, do controlador PI e da função de transferência de laço aberto são apresentados no gráfico 19.

Gráfico 19 – Diagrama de Bode



Fonte: Autoria própria (2021)

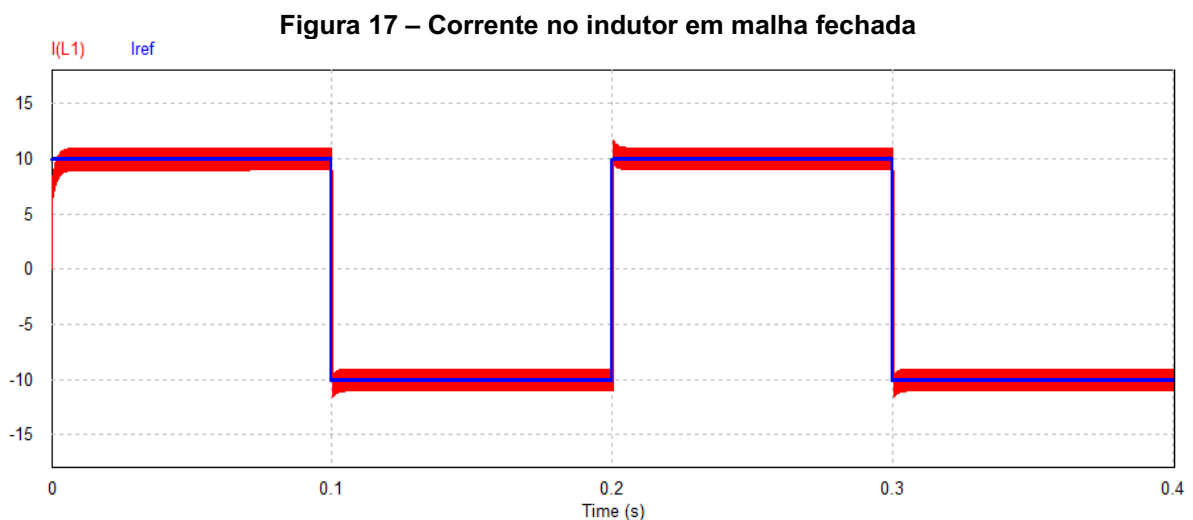
Segundo o diagrama de Bode foi observado que o conversor, a planta, tem um comportamento integrativo no sistema, não apresentando erro em regime permanente. Ainda observando o diagrama foi notado uma boa escolha da frequência de corte, o que resultou na margem de fase de  $89^\circ$ .

Por fim, o ganho em baixas frequências foram ainda mais elevados, mesmo com a planta tendo características integrativas, pelo fato da frequência adotada do zero do controlador.

#### 4.9 Simulações numéricas em malha fechada

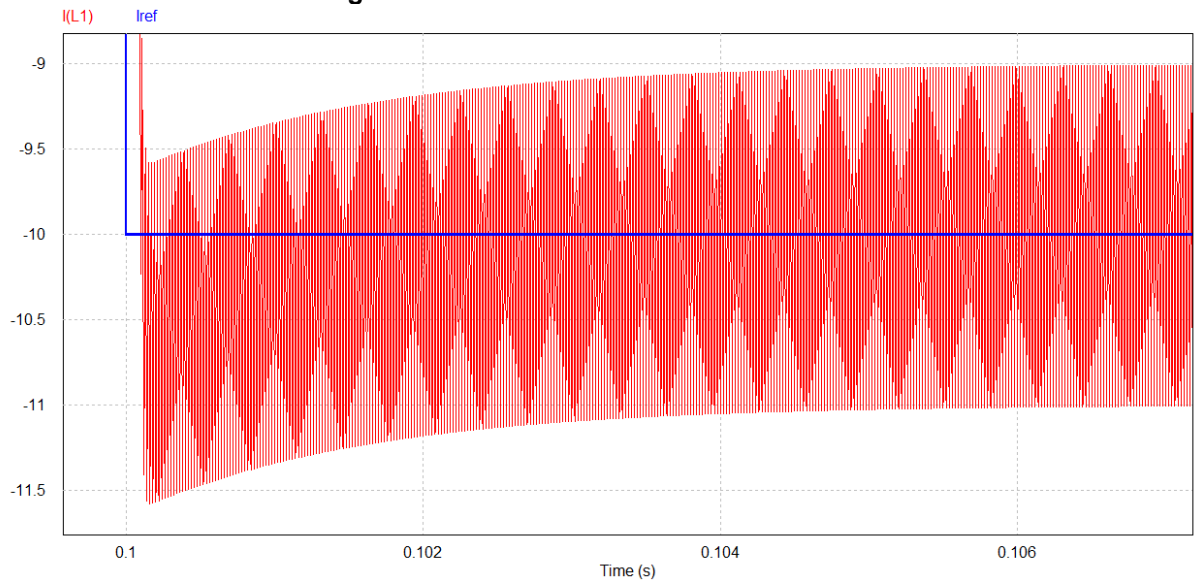
As simulações em malha fechada, diferentemente das simulações em malha aberta, não precisam ser vistas em duas partes, pelo fato que o controlador deve ser capaz de configurar o sentido de corrente ao conversor, a simulação se encontra no APÊNDICE E.

A figura 17 mostra o comportamento da corrente no indutor, considerando uma inversão total no sentido de corrente, enquanto que a figura 18 ilustra em específico a primeira inversão total de corrente.



Fonte: Autoria própria (2021)

**Figura 18 – Inversão no sentido de corrente**



**Fonte: Aatoria própria (2021)**

Com a figura 18 foi obtido o máximo sobressinal da corrente, assim como o tempo de estabilização e o tempo de subida, no caso, tempo máximo para a troca no sentido de corrente, exposta na tabela 18.

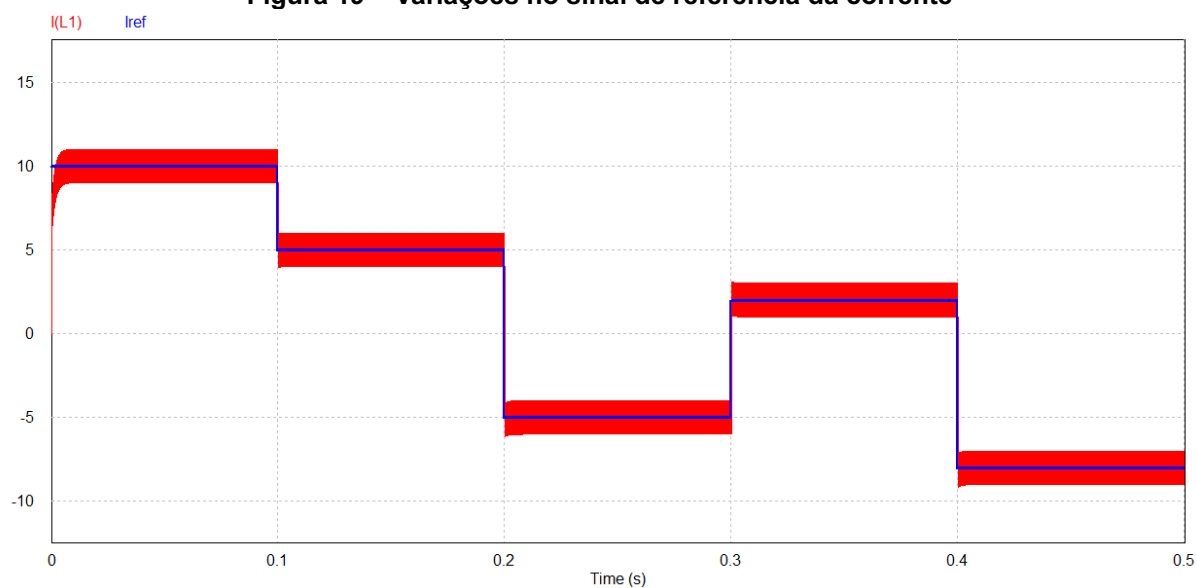
**Tabela 18 – Grandezas de controle**

Máximo sobressinal (ultrapassagem)	5,27 %
Tempo de estabilização	3ms
Tempo de subida	0,160ms

**Fonte: Aatoria própria (2021)**

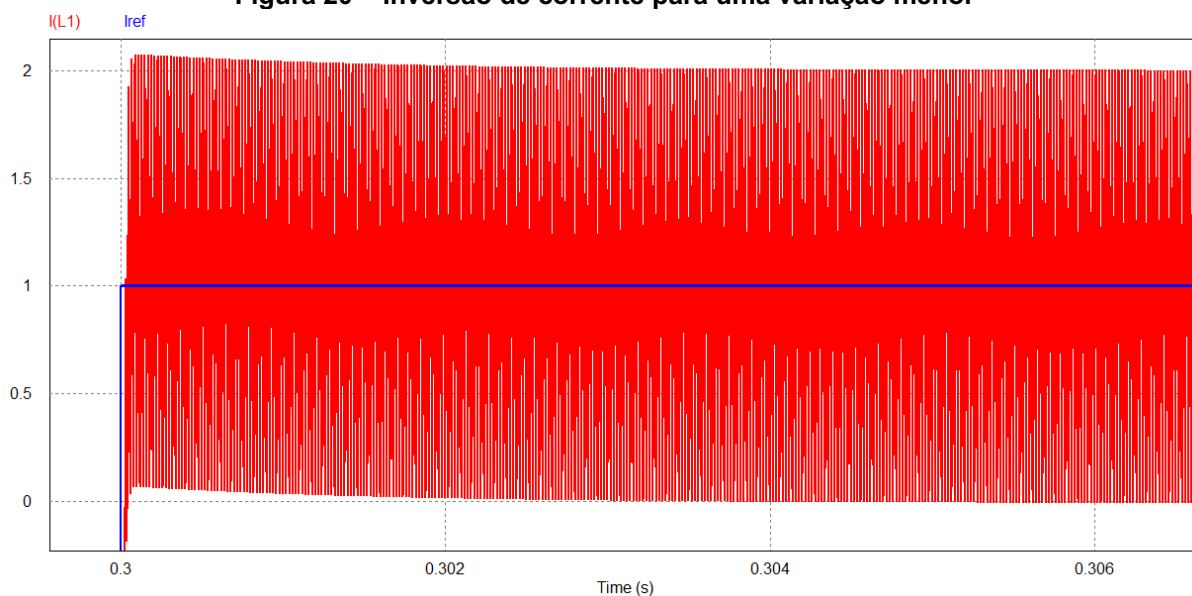
Contudo essas grandezas variam de acordo com a variação da razão cíclica. Como fica mais claro na figura 19 e 20, onde foi feito pequenas variações no sinal de referência e foi notado um menor sobressinal.

**Figura 19 – Variações no sinal de referência da corrente**



Fonte: Autoria própria (2021)

**Figura 20 – Inversão de corrente para uma variação menor**



Por fim, infere-se com a simulação da figura 19 e 20 que o conversor Buck/Boost bidirecional deve atuar de forma gradativa na prática, ou seja, as variações na razão cíclica devem ser pequenas, exigindo assim menos esforço do controle e conversor para manter o sentido no fluxo de corrente.

## 5 CONCLUSÃO

Este estudo, apesar de representado teórica e numericamente, devido principalmente as circunstâncias sociais e temporais as quais foi escrito, apresentou sucesso na proposta estabelecida inicialmente.

O estudo de baterias, atualmente é indissociável ao estudo da eletrônica de potência e essa relação deve tornar-se mais íntima com os temas energéticos ambientais para o futuro. O conversor bidirecional apesar de apresentar uma topologia simples, em verdade, introdutória ao tema bidirecionalidade de corrente, garante ao sistema a segurança no controle do fluxo de energia.

Os objetivos de projeto e planejamento de um sistema de armazenamento de energia com baterias, resultaram no dimensionamento das baterias de chumbo ácido, na relação entre os parâmetros verificados graficamente e principalmente na obtenção de um número total de baterias, junto com toda informação física do sistema, o qual se adaptou a energia média de uma residência. Da mesma forma, com o entendimento do conversor de potência bidirecional proposto e seu respectivo projeto de perdas e simulação, foi encontrado uma posição de destaque para o todo o sistema dentro da área de armazenamento e conversão de energia apresentando desta forma, a viabilidade para aplicação prática, testes e ensaios.

O autor e o orientador esperam com o tema, não somente progredir em conhecimento, mas auxiliar àqueles que o buscarem.

Uma proposta futura para este trabalho, além da materialização onde adaptações devem ser feitas e alguns conceitos específicos da prática devem ser aplicados, é introduzir ao conjunto armazenador adaptação de diferentes baterias, como de íons lítio, e assim reavaliar se as mesmas equações devem determinar o número de baterias. Para o conversor é possível introduzir o conceito de multimalhas de controle, assim como, estabelecer um circuito elétrico mais exato ao conjunto de baterias, considerando a autodescarga, por exemplo.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa N° 482, de 17 de Abril de 2012.** Marco regulatório que permitiu aos consumidores realizar a troca da energia gerada com a da rede elétrica. Disponível em: [www.aneel.gov.br/consultas-publicas](http://www.aneel.gov.br/consultas-publicas). Acesso em: 13 nov. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14298:** Fixa as condições para o dimensionamento de banco de baterias ácidas ou alcalinas (conjunto de acumuladores elétricos). Rio de Janeiro, ABNT, 1999.

BARBI, I. **Eletrônica de potência.** 2. ed. Florianópolis: Do autor, 2000.

BARBI, I; ILLA FONT, C. H.; ALVES, R.L. Projeto físico de indutores e transformadores. **Apostila:** Projeto físico de componentes magnéticos. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Março, 2002.

BARROS NEIVA, A. C.; JASMIM, I. **Melhoria na Qualidade da Energia Produzida por Sistemas Eólicos com Armazenamento de Energia:** Portfólio de Alternativas. 2017. Artigo (Congresso)- Brazil Wid Power 2017. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica / Eletrobras, Rio de Janeiro, Ilha do Fundão, 2017. Disponível em: [www.researchgate.net/publication/319493282\\_Melhoria\\_na\\_Qualidade\\_da\\_Energia\\_Produzida\\_por\\_Sistemas\\_Eolicos\\_com\\_Armazenamento\\_de\\_Energia\\_Portfolio\\_de\\_Alternativas](http://www.researchgate.net/publication/319493282_Melhoria_na_Qualidade_da_Energia_Produzida_por_Sistemas_Eolicos_com_Armazenamento_de_Energia_Portfolio_de_Alternativas). Acesso em: 14 nov. 2021.

BERGER F. Et al. **Metodologia para modelagem utilizando o circuito equivalente de Thévenin.** Universidade Federal de Santa Catarina, Instituto de Eletrônica de Potência, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2018.

CHAVES, H. M. S.; SCHUCH, L.; ROGGIA, L. Levantamento da potência instalada em uma residência típica para aplicação em geração distribuída. **Anais: Jornada Acadêmica Integrada.** Universidade Federal de Santa Maria, n. 25. 2010. Disponível em: [https://portal.ufsm.br/jai2010/anais/trabalhos/trabalho\\_1041263502.htm](https://portal.ufsm.br/jai2010/anais/trabalhos/trabalho_1041263502.htm). Acesso em: 14 nov. 2021.

COSTA E SILVA, F. F. Y.; BORTONI C. E. Sistemas de armazenamento de energia elétrica em redes inteligentes: características, oportunidades e barreiras. **Revista Brasileira de Energia,** v. 22, n. 1, p. 48, 1º sem. 2016. Disponível em: <https://energi-asroraima.com.br/sistemas-de-armazenamento-de-energia-eletrica-em-redes-inteligentes-caracteristicas-oportunidades-e-barreiras>. Acesso em: 14 nov. 2021.

IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. **IEEE Std. 485-2020.** Recommended Practice for Sizing Lead-Acid Batteries for Stationary Applications. Nova York, 2020.

ILLA FONT, C. H. Conversores CC-CC não isolados. **Notas de Aula,** Ponta Grossa, n. 1, p. 1-85, Abril, 2019.

INFINEON TECHNOLOGIES. **Mosfet:** CoolMOS C7 IPW65R019C7. 81726 München, Germany: 2011.

LEITE, N.; DELGADO, M.; HAGE, F. Os desafios do armazenamento de energia no setor elétrico. **FGV Energia. Caderno Opinião**, jan/2017. Disponível em: [www.fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/filescoluna\\_opiniao\\_janeiro\\_nelson\\_leite.pdf](http://www.fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/filescoluna_opiniao_janeiro_nelson_leite.pdf). Acesso em: 14 nov. 2021.

MARTINS, D. C.; BARBI, I. **Conversores CC–CC Básicos Não isolados**. 2. ed. Florianópolis: Dos autores, 2006.

MOURA. **Catálogo Estacionária No break**: Solução segura em energia. Janeiro, 2017.

LANGE, A. B. **Retificador PFC monofásico PWM bridge less três níveis de alto desempenho**. Florianópolis, f. 232, 2012. 230 p. Dissertação (Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

PEREIRA, V. D. **Análise comparativa entre os retificadores monofásicos Boost e SEPIC operando no modo de condução descontínuo**. Ponta Grossa, f. 110, 2016. 105 p Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Eletrônica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2016.

S., N. N. **Engenharia de Sistemas de Controle, 7ª edição**. Grupo GEN, 2017. 9788521634379. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521634379/>. Acesso em: 22 Nov 2021

WEG. Manual do usuário. **Baterias VRLA**: Baterias chumbo-ácidas controladas por válvula. Documento: 10005795273 / 02. Agosto de 2019.

WESTER, G. W.; MIDDLEBROOK, R. D.. **Low-Frequency Characterization of Switched dc-dc Converters**. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-9, no. 3, pp. 376-385, May 1973. Doi: 10.1109/TAES.1973.309723.



## **APÊNDICE A – Projeto do sistema armazenador de energia**



## Projeto de um Banco de Baterias para um Sistema Eólico de Pequeno Porte

---

Aluno de IC: Guilherme Ferreira de Lima

Orientador: Carlos Henrique Illa Font

Ponta Grossa- PR - 12 / 2020

### 1) Especificações:

Energia média mensal de uma casa (COPEL):  $E_m := 165\text{kW}\cdot\text{hr}$

Tensão do barramento CC:  $V_{cc} := 250\text{V}$

Tensão do banco de baterias:  $V_{\text{pack}} := 120\text{V}$

Tensão de uma bateria:  $V_{\text{bat}} := 12\text{V}$

Capacidade de uma bateria:  $C_{\text{bat}} := 150\text{A}\cdot\text{hr}$

Peso de uma bateria:  $\text{Peso}_{\text{bat}} := 39\text{kg}$

Temperatura ambiente das baterias:  $T_a := 35\text{K}$

Número de dias de autonomia:  $N_D := 1$

Profundidade de descarga:  $\text{DOD} := 0.5$

Fator de segurança:  $\beta := 1.1$

## 2) Cálculos - Condição Estática:

Energia média em um dia:

$$E_d := \frac{E_m}{30} = 5.5 \cdot \text{kW} \cdot \text{hr}$$

Coefficiente de temperatura:

$$\alpha_T := \frac{1}{1 + \frac{0.006}{K} \cdot (T_a - 25K)} = 0.943$$

Capacidade ideal do banco de baterias:

$$C_{\text{ideal}} := \frac{E_d \cdot N_D}{V_{\text{pack}}} = 45.833 \cdot \text{A} \cdot \text{hr}$$

Capacidade real do banco de baterias:

$$C_{\text{real}} := \frac{\alpha_T \cdot \beta \cdot N_D \cdot E_d}{\text{DOD} \cdot V_{\text{pack}}} = 95.126 \cdot \text{A} \cdot \text{hr}$$

Número de baterias em série:

$$N_{\text{bat\_serie}} := \frac{V_{\text{pack}}}{V_{\text{bat}}} = 10$$

Número de baterias em paralelo:

$$N_{\text{bat\_paralelo}} := \text{ceil} \left( \frac{C_{\text{real}}}{C_{\text{bat}}} \right) = 1$$

Número total de baterias:

$$N_{\text{bat\_total}} := N_{\text{bat\_serie}} \cdot N_{\text{bat\_paralelo}} = 10$$

Peso total do banco de baterias:

$$\text{Peso}_{\text{total}} := \text{Peso}_{\text{bat}} \cdot N_{\text{bat\_total}} = 390 \text{ kg}$$

### 3) Cálculos - Variações:

Temperatura ambiente das baterias:  $T_{a\_var} := 20K, 25K.. 40K$

Número de dias de autonomia:  $N_{D\_var} := 1, 2.. 5$

Profundidade de descarga:  $DOD_{var} := 0.2, 0.3.. 0.8$

Coefficiente de temperatura:  $\alpha_{T\_var}(T_{a\_var}) := \frac{1}{1 + \frac{0.006}{K} \cdot (T_{a\_var} - 25K)}$

Capacidade ideal do banco de baterias:  $C_{ideal\_var}(N_{D\_var}) := \frac{E_d \cdot N_{D\_var}}{V_{pack}}$

Capacidade real do banco de baterias:  $C_{real\_var}(N_{D\_var}, DOD_{var}, T_{a\_var}) := \frac{\alpha_{T\_var}(T_{a\_var}) \cdot \beta \cdot N_{D\_var} \cdot E_d}{DOD_{var} \cdot V_{pack}}$

Número de baterias em paralelo:

$$N_{bat\_paralelo\_var}(N_{D\_var}, DOD_{var}, T_{a\_var}) := \text{ceil}\left(\frac{C_{real\_var}(N_{D\_var}, DOD_{var}, T_{a\_var})}{C_{bat}}\right)$$

Número total de baterias:

$$N_{bat\_total\_var}(N_{D\_var}, DOD_{var}, T_{a\_var}) := N_{bat\_serie} \cdot N_{bat\_paralelo\_var}(N_{D\_var}, DOD_{var}, T_{a\_var})$$

Peso total do banco de baterias:

$$Peso_{total\_var}(N_{D\_var}, DOD_{var}, T_{a\_var}) := Peso_{bat} \cdot N_{bat\_total\_var}(N_{D\_var}, DOD_{var}, T_{a\_var})$$

## **APÊNDICE B – Projeto do conversor Buck/Boost bidirecional**



## Projeto de um Conversor CC-CC Bidirecional Buck/Boost

---

Aluno de IC: Guilherme Ferreira de Lima

Professor: Carlos Henrique Illa Font

Ponta Grossa- PR - 03/2021

### 1) Especificações:

Tensão no Banco de Baterias:  $V_1 := 120V$

Tensão no Barramento CC:  $V_2 := 250V$

Potência do Conversor:  $P_c := 1200W$

Frequência de Comutação:  $f_s := 50kHz$

Ondulação de Corrente no Indutor:  $\Delta I_o\% := 20\%$

Ondulação da Tensão no Capacitor:  $\Delta V\% := 1\%$

### 2) Cálculos Preliminares:

Razão Cíclica:  $D := \frac{V_2 - V_1}{V_2} = 0.52$

$$D_{sim} := \frac{180 \cdot D}{0.5} = 187.2$$

Corrente no Banco de Baterias:  $I_1 := \frac{P_c}{V_1} = 10A$

Corrente no Barramento CC:  $I_2 := \frac{P_c}{V_2} = 4.8A$

Resistência de Carga 1:

$$R_1 := \frac{V_1^2}{P_C} = 12 \Omega$$

Resistência de Carga 2:

$$R_2 := \frac{V_2^2}{P_C} = 52.083 \Omega$$

Ondulação de Corrente no Indutor:

$$\Delta I := \Delta I_0 \cdot I_1 = 2 \text{ A}$$

Ondulação de Tensão no Capacitor 1:

$$\Delta V_1 := \Delta V_0 \% \cdot V_1 = 1.2 \text{ V}$$

Ondulação de Tensão no Capacitor 2:

$$\Delta V_2 := \Delta V_0 \% \cdot V_2 = 2.5 \text{ V}$$

### 3) Dimensionamento do Indutor:

Indutância:

$$L_1 := V_1 \cdot \frac{D}{f_s \cdot \Delta I} = 624 \cdot \mu\text{H}$$

Corrente Máxima:

$$I_{L\text{max}} := I_1 + \frac{\Delta I}{2} = 11 \text{ A}$$

Corrente Média:

$$I_{L\text{med}} := I_1 = 10 \text{ A}$$

Corrente Eficaz:

$$I_{L\text{ef}} := I_{L\text{med}} = 10 \text{ A}$$

### 4) Dimensionamento do Transistor:

Tensão Máxima:

$$V_{S\text{max}} := V_2 = 250 \text{ V}$$

Corrente Máxima:

$$I_{S\text{max}} := I_1 + \frac{\Delta I}{2} = 11 \text{ A}$$

Corrente Média:

$$I_{S\text{med}} := D \cdot \frac{I_2}{1 - D} = 5.2 \text{ A}$$

Corrente Eficaz:

$$I_{S\text{ef}} := \frac{I_2 \cdot \sqrt{D}}{1 - D} = 7.211 \text{ A}$$

## 5) Dimensionamento dos Capacitores:

Capacitância 1 (Buck): 
$$C_1 := \frac{V_1 \cdot D}{\Delta V_1 \cdot 8 \cdot L_1 \cdot f_s^2} = 4.167 \cdot \mu\text{F}$$

Tensão Máxima: 
$$V_{C1\text{max}} := V_1 + \frac{\Delta V_1}{2} = 120.6 \text{ V}$$

Capacitância 2 (Boost): 
$$C_2 := I_2 \cdot \frac{D}{\Delta V_2 \cdot f_s} = 19.968 \cdot \mu\text{F}$$

Tensão Máxima: 
$$V_{C2\text{max}} := V_2 + \frac{\Delta V_2}{2} = 251.25 \text{ V}$$

### 1. Valores obtidos com a simulação numérica:

Tensão máxima nos transistores: 
$$V_{T\text{máx}} := 250\text{V}$$

#### 1.1. Resultados para o Boost:

Corrente média no indutor: 
$$I_{Lm} := 10\text{A}$$

Corrente máxima no indutor: 
$$I_{L\text{máx}} := 11\text{A}$$

Variação de corrente no indutor: 
$$\Delta I_L := 2\text{A}$$

Corrente eficaz no indutor: 
$$I_{L\text{efs}} := 9.8\text{A}$$

Corrente média no barramento: 
$$I_{CCm} := 4.8\text{A}$$

Corrente média no transistor 1: 
$$I_{Tm} := 4.93\text{A}$$

Corrente eficaz no transistor 1: 
$$I_{T\text{ef}} := 7.14\text{A}$$

Corrente máxima no transistor 1: 
$$I_{T\text{máx}} := 11\text{A}$$

Tensão máxima no capacitor 2 (Boost): 
$$V_{C2\text{Máx}} := 251.2\text{V}$$



## 6) Projeto Físico do Indutor:

Permeabilidade do Ar:	$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$	
Permeabilidade Relativa:	$\mu_r := 60$	
Fluxo Máximo:	$B_{\text{sat}} := 1.5\text{T}$	
Máxima Densidade de Corrente:	$J_{\text{max}} := 450 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$	
Fator de Utilização da Janela:	$k_u := 0.65$	
Área de Seção Transversal do Núcleo:	$A_c := 199\text{mm}^2$	
Diâmetro Interno do Núcleo:	$ID := 23.3\text{mm}$	
Diâmetro Externo do Núcleo:	$OD := 47.63\text{mm}$	
Espessura do Núcleo:	$HT := 19\text{mm}$	
Comprimento Médio de uma Espira:	$l_e := (OD - ID) + 2 \cdot HT = 62.33 \cdot \text{mm}$	$l_c := 107\text{mm}$
Número de Espiras:	$N_e := \text{ceil} \left( \sqrt{\frac{L_1 \cdot l_c}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A_c}} \right) = 67$	
Número de Espiras para 80% do Fluxo Máximo:	$N_{e\_max\_B} := \text{ceil} \left( \frac{0.8 \cdot B_{\text{sat}} \cdot l_c}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot I_{L\text{máx}}} \right) = 155$	
Profundidade de Penetração:	$d_{\text{max}} := \frac{15}{\sqrt{f_s}} \cdot \sqrt{\text{Hz}} \cdot \text{cm} = 0.067 \cdot \text{cm}$	

O condutor máximo a ser utilizado é 22 AWG, com a seguinte área:

$$S_{22} := 0.003255\text{cm}^2$$

Contudo é optado por escolher o fio litz, devido ao efeito skin:

$$S_{32} := 0.00032 \text{ cm}^2$$

$$d_{32\_isol} := 0.024 \text{ cm}$$

$$S_t := 32 \cdot S_{32} = 0.01 \cdot \text{cm}^2$$

Área de Seção Transversal do Fio Condutor:

$$S_{\text{fio}} := \frac{I_{\text{Lef}}}{J_{\text{max}}} = 0.02222 \cdot \text{cm}^2$$

Número máximo de Fios em Paralelo:

$$n_{\text{pmáx}} := \frac{S_{\text{fio}}}{S_t} = 2.17$$

$$n_p := 2$$

$$d_{\text{ef}} := n_p \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot S_t}{\pi}} = 0.228 \cdot \text{cm}$$

Número Máximo de Espiras:

$$N_{e\_max} := \text{ceil} \left( \frac{k_u \cdot ID^2}{d_{\text{ef}}^2} \right) = 68$$

Fator de utilização da janela real:

$$K_u := \frac{N_e \cdot d_{\text{ef}}^2}{ID^2} = 0.644$$

$$n_1 := 1$$

$$N_{\text{ec1}} := \pi \cdot \left[ \frac{ID}{d_{\text{ef}}} - (2n_1 - 1) \right] = 28.912$$

$$n_2 := 2$$

$$N_{\text{ec2}} := \pi \cdot \left[ \frac{ID}{d_{\text{ef}}} - (2n_2 - 1) \right] = 22.628$$

$$n_3 := 3$$

$$N_{\text{ec3}} := \pi \cdot \left[ \frac{ID}{d_{\text{ef}}} - (2n_3 - 1) \right] = 16.345$$

Comprimento total do fio:

$$l_t := N_e \cdot l_e = 4.176 \cdot \text{m}$$

## 7) Componentes Especificados:

Transistor CoolMOS: IPW65R019C7

Capacitores: XX  $\mu$ F x XX V  
XX  $\mu$ F x XX V

Indutor: Núcleo: Toroidal (47,66 x 23,3 x 19) mm

Número de Espiras: 67

Enferro: NA

Fio Condutor: 32x32 AWG Litz

## 8) Cálculo de perdas

### 8.1) Transistores

Resistência Dreno-Source:  $R_{DSon} := 0.019 \text{ ohm}$

Tempo de entrada em condução:  $t_{on} := 27 \text{ ns}$

Tempo de entrada em bloqueio:  $t_{off} := 5 \text{ ns}$

Perdas em condução:  $P_{Scond} := R_{DSon} \cdot I_{Sef}^2 = 0.988 \text{ W}$

Perdas em comutação:  $P_{Scom} := \frac{f_s \cdot (t_{on} + t_{off}) \cdot V_{Tm\acute{a}x} \cdot I_{Tm\acute{a}x}}{2} = 2.2 \text{ W}$

Perdas totais:  $P_S := P_{Scond} + P_{Scom} = 3.188 \text{ W}$

### 8.3) Indutor

#### 8.3.1) Perdas no cobre

Resistência do cobre:  $\rho_{cu} := 1.7 \cdot 10^{-6} \cdot \Omega \cdot \text{cm}$

Resistência do fio:  $R_{fl} := \frac{(\rho_{cu} \cdot l_t)}{n_p \cdot S_t} = 0.035 \Omega$

Perdas no cobre:  $P_{cobre} := R_{fl} \cdot I_{Lef}^2 = 3.466 \text{ W}$

### 8.3.2) Perdas no núcleo

As perdas no núcleo podem ser encontradas através do catálogo do fabricante

$$B := \frac{(\mu_r \cdot \mu_o \cdot I_{L\text{máx}} \cdot N_e)}{l_e} = 0.892 \text{ T}$$

$$P_n := 1000 \cdot \frac{\text{mW} \cdot 21.3 \cdot \text{mm}^3}{\text{cm}^3} = 21.3 \text{ mW}$$

### 8.4) Rendimento

Perdas totais:

$$P_T := P_{\text{cobre}} + 2 \cdot P_S = 9.842 \text{ W}$$

Rendimento:

$$\eta := \frac{P_c}{P_c + P_T} = 99.186\%$$

## **APÊNDICE C – Projeto de controle do conversor**



## Projeto do Compensador para o Conversor CC-CC Bidirecional

---

Aluno de Tcc: Guilherme Ferreira de Lima

Professor: Carlos Henrique Ila Font

Ponta Grossa- PR - 11 / 2021

### 1) Especificações:

Valor Eficaz da Tensão de Fase de Entrada:	$E := 250\text{V}$
Valor Médio da Tensão de Saída:	$V_o := 120\text{V}$
Potência de Saída:	$P_o := 1200\text{W}$
Frequência de Comutação:	$f_s := 50\text{kHz}$
Ondulação de Corrente no Indutor:	$\Delta I_o\% := 20\%$
Ondulação da Tensão no Capacitor:	$\Delta V_o\% := 1\%$

### 2) Cálculos Preliminares:

Valor Eficaz da Corrente de Entrada:	$I_E := \frac{P_o}{E} = 4.8\text{A}$
Valor Médio da Corrente de Saída:	$I_o := \frac{P_o}{V_o} = 10\text{A}$
Resistência Equivalente de Carga:	$R_o := \frac{V_o^2}{P_o} = 12\ \Omega$
Ondulação de Corrente no Indutor:	$\Delta I := \Delta I_o\% \cdot I_o = 2\text{A}$
Ondulação de Tensão no Capacitor:	$\Delta V := \Delta V_o\% \cdot V_o = 1.2\text{V}$

### 3) Projeto do Compensador de Corrente - PI:

$$f := 1\text{Hz}, 10\text{Hz}.. 1 \cdot 10^6\text{Hz}$$

$$s(f) := j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$$

Função de Transferência do Sensor:

$$V_{\text{ref}} := 10\text{V}$$

$$k_S := \frac{V_{\text{ref}}}{I_o} \cdot \frac{\text{A}}{\text{V}} = 1$$

Função de Transferência do Modulador PWM:

$$k_{\text{PWM}} := 1$$

Função de Transferência da Planta:

$$L_o := 624\mu\text{H}$$

$$G(f) := \frac{E}{L_o \cdot s(f)} \frac{1}{\text{A}}$$

Frequência de Cruzamento:

$$f_c := \frac{f_s}{8} = 6.25 \cdot \text{kHz}$$

Função de Transferência do Compensador (sem o ganho e fixando uma frequência para o zero):

$$f_z := 100\text{Hz}$$

$$H_k(f) := \frac{s(f) + 2 \cdot \pi \cdot f_z}{s(f)}$$

Ganho do Compensador (condição de módulo):

$$k_H := \frac{1}{|G(f_c)| \cdot |H_k(f_c)| \cdot k_S \cdot k_{\text{PWM}}} = 0.098$$

Função de Transferência do Compensador:

$$H(f) := k_H \cdot \frac{s(f) + 2 \cdot \pi \cdot f_z}{s(f)}$$

Função de Transferência de Laço Aberto:

$$\text{FTLA}(f) := G(f) \cdot k_S \cdot H(f) \cdot k_{\text{PWM}}$$

Margem de Fase Desejada (condição de ângulo):

$$|\text{FTLA}(f_c)| = 1$$

$$\phi := \frac{180}{\pi} \cdot \arg(\text{FTLA}(f_c)) = -90.917$$

$$\text{MF} := 180 + \phi = 89.083$$

Diagramas de Bode:

$$G_{\text{mod}}(f) := 20 \cdot \log(|G(f)|)$$

$$G_{\text{fase}}(f) := \frac{180}{\pi} \cdot \arg(G(f))$$

$$H_{\text{mod}}(f) := 20 \cdot \log(|H(f)|)$$

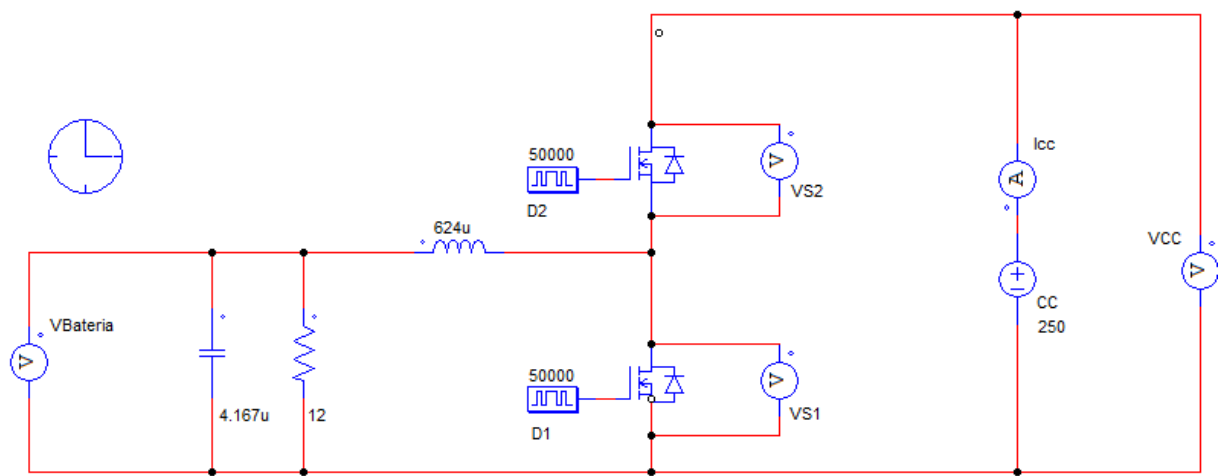
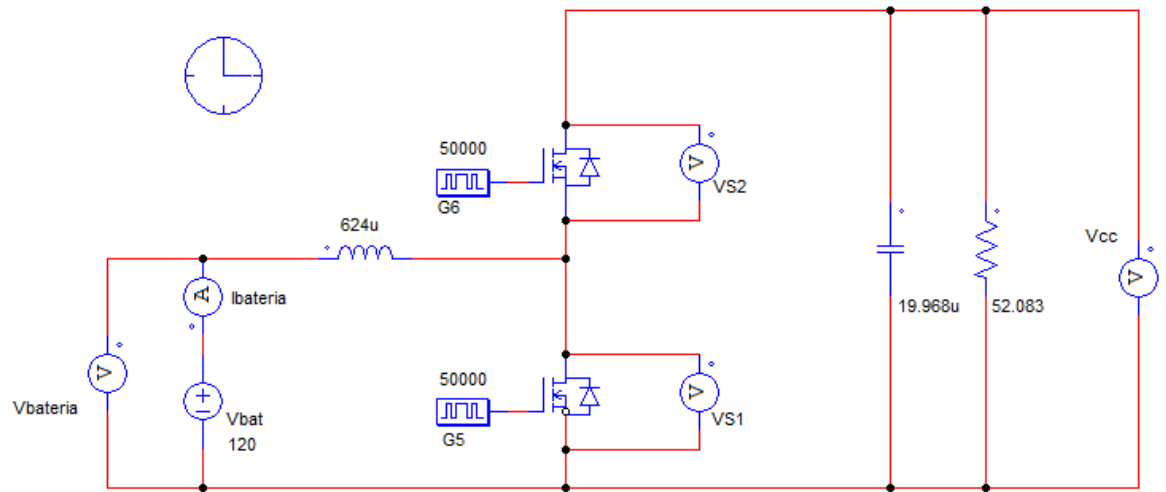
$$H_{\text{fase}}(f) := \frac{180}{\pi} \cdot \arg(H(f))$$

$$\text{FTLA}_{\text{mod}}(f) := 20 \cdot \log(|\text{FTLA}(f)|)$$

$$\text{FTLA}_{\text{fase}}(f) := \frac{180}{\pi} \cdot \arg(\text{FTLA}(f))$$



## **APÊNDICE D – Simulação Buck/Boost em malha aberta**



## **APÊNDICE E – Simulação Buck/Boost em malha fechada**

