

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Faculdade de Engenharia  
Graduação em Engenharia Elétrica - Habilitação Energia

**Pedro Henrique Duarte Vidal**

**Otimização de Parâmetros e Simulação do Comportamento de Sistema de  
Armazenamento a Bateria**

Juiz de Fora

2017

**Pedro Henrique Duarte Vidal**

**Otimização de Parâmetros e Simulação do Comportamento de Sistema de  
Armazenamento a Bateria**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Sistemas de Energia, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Leonardo Willer de Oliveira, D.Sc

Coorientadora: Prof<sup>ª</sup>. Janaína Gonçalves de Oliveira, Ph.D.

Juiz de Fora

2017

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Vidal, Pedro Henrique Duarte.

Otimização de Parâmetros e Simulação do Comportamento de Sistema de Armazenamento a Bateria / Pedro Henrique Duarte Vidal. – 2017.

?? f. : il.

Orientador: Prof. Leonardo Willer de Oliveira, D.Sc

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Janaína Gonçalves de Oliveira, Ph.D.

– Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia.  
Graduação em Engenharia Elétrica - Habilitação Energia, 2017.

1. Baterias 2. carga e descarga 3. ajuste de parâmetros 4. Otimização.  
5. Sistemas Imunológicos ArtificiaisI. Vidal, Pedro Henrique Duarte, II.  
Otimização de Parâmetros e Simulação do Comportamento de Sistema de  
Armazenamento a Bateria.

**Pedro Henrique Duarte Vidal**

**Otimização de Parâmetros e Simulação do Comportamento de Sistema de Armazenamento a Bateria**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Sistemas de Energia, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Leonardo Willer de Oliveira, D.Sc  
Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Prof<sup>ª</sup>. Janaína Gonçalves de Oliveira, Ph.D.  
Coorientadora  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Prof. André Augusto Ferreira, Dr.Eng  
Universidade Federal de Juiz de Fora

## AGRADECIMENTOS

A realização deste estudo não seria alcançada sem o apoio e a participação de várias pessoas para as quais direciono os meus cumprimentos especiais. Inicialmente, agradeço ao Professor Dr. Leonardo de Oliveira Willer, meu orientador, pela amizade, pelo apoio e sobretudo pela disponibilidade para o desenvolvimento do trabalho e também à grandiosa orientação. À Professora PhD. Janaína Gonçalves de Oliveira, pelos importantes conhecimentos compartilhados, e por ter me permitido adentrar em um assunto de total interesse dentro do tema de energias renováveis. Ao Professor André Augusto Ferreira, pela confiança depositada em minha capacidade como engenheiro, como pessoa, como amigo, além dos diversos conselhos e assistência prestada durante este trabalho.

Outra parcela importante que da mesma maneira devo agradecer de forma veemente é o suporte familiar. À minha mãe Lucianitta, por todo o amor e afeto que me proporciona e por não medir esforços para o meu crescimento profissional e pessoal. Ao meu pai, Pedro Giovanni, pela fibra moral, a força para sobrepor problemas e por sempre manter o pensamento positivo até nos momentos mais difíceis. À minha irmã e melhor amiga, Ludmilla, sou muito grato por poder compartilhar estes e futuros momentos com uma pessoa tão iluminada e brilhante em tudo que realiza. Aos meus avós Luiz Gonzaga, Maria Eliza, Maria da Conceição pelos ensinamentos de vida. Afirmo que a contribuição em minha formação humana e intelectual será sempre lembrada. Aos meus padrinhos, Suzander e Liane por serem estas pessoas únicas e pelo apoio, visando a minha felicidade.

Agradeço às amizades que este tempo me possibilitou criar, verdadeiros irmãos que levarei por toda a vida, além de pessoas que me ajudaram em todos os momentos, destacando o carinho pelo pessoal do LABSOLAR. Agradecimento especial a todos os docentes e servidores da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora.

“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade, Albert Einstein”

## RESUMO

A presente monografia de conclusão de curso tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo de otimização de parâmetros de sistemas de armazenamento baseados em bancos de baterias. Para tanto, uma técnica meta-heurística bioinspirada de otimização denominada Sistemas Imunológicos Artificiais (SIA) é aplicada ao problema, tendo em vista a característica do ajuste de parâmetros, que podem admitir valores discretizados pré-definidos. A monografia também envolve o desenvolvimento de um modelo computacional para a simulação do comportamento de carga do sistema de baterias, após o ajuste dos parâmetros realizados pela técnica de otimização, considerando um modelo detalhado e representativo dos principais fenômenos associados. A análise de comportamento da bateria envolve ainda o monitoramento de seu estado de carga, do inglês State of Charge (SOC), bem como de tensão e corrente de carga. Testes realizados com dados de uma bateria são efetuados para avaliar a metodologia de ajuste de parâmetros proposta a partir do comportamento resultante do sistema.

Baterias. Carga e Descarga. Ajuste de Parâmetros. Otimização. Sistemas Imunológicos Artificiais.

## ABSTRACT

The present work has the objective of developing a parameter optimization model of storage systems based on battery banks. A bio-inspired optimization meta-heuristic technique called Artificial Immune System (AIS) is applied to the problem, considering the characteristic of parameter adjustment, which can admit pre-defined discretized values. The methodology also involves the development of a computational model for the simulation of the charge behavior of the battery energy storage system (BESS), after adjusting the parameters performed by the optimization technique, considering a detailed and representative model. The study of the battery's behavior analysis also involves monitoring its state of charge, the State of Charge (SOC), as well as voltage between the poles as current from charge and discharge. Tests performed with data from a battery are performed to evaluate the methodology of parameter adjustment proposed from the resulting behavior of the system.

Key-words: Batteries. Battery Behavior. Adjusting Parameters. Optimization. Artificial Immune System (AIS).

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo da Pilha de Daniell . . . . .	15
Figura 2 – Modelo da Bateria de Planté . . . . .	16
Figura 3 – Exemplo de Bateria de Lítio e Funcionamento . . . . .	19
Figura 4 – Representação da ação dos Anticorpos junto aos Antígenos . . . . .	23
Figura 5 – Fluxograma do Algoritmo Aplicado . . . . .	24
Figura 6 – Conversor Buck-Boost Bidirecional . . . . .	26
Figura 7 – Modulação por Largura de Pulso - PWM . . . . .	27
Figura 8 – Conversor Boost . . . . .	28
Figura 9 – Conversor Boost - Modo de operação 1 . . . . .	29
Figura 10 – Conversor Boost - Modo de operação 2 . . . . .	29
Figura 11 – Conversor Buck . . . . .	32
Figura 12 – Malha de Sistema para o Conversor Buck . . . . .	33
Figura 13 – Malha de Sistema para o Conversor Buck . . . . .	33
Figura 14 – Malha de Sistema para o Conversor Buck . . . . .	35
Figura 15 – Compensador fator k - Tipo 1 . . . . .	36
Figura 16 – Diagrama de Bode do Compensador fator k - Tipo 1 . . . . .	37
Figura 17 – Compensador fator k - Tipo 2 . . . . .	38
Figura 18 – Diagrama de Bode do Compensador fator k - Tipo 2 . . . . .	38
Figura 19 – Diagrama de Bode do Compensador fator k - Tipo 3 . . . . .	39
Figura 20 – Compensador fator k - Tipo 3 . . . . .	39
Figura 21 – Diagrama de Bode Compensador Tipo 1 - Em relação ao fator k . . . . .	40
Figura 22 – Diagrama de Bode Compensador Tipo 2 - Em relação ao fator k . . . . .	41
Figura 23 – Diagrama de Bode Compensador Tipo 3 - Em relação ao fator k . . . . .	41
Figura 24 – Evolução da Função Objetivo . . . . .	43
Figura 25 – Sistema Completo Representativo do conversor Bidirecional e do Com- plexo de Baterias . . . . .	44
Figura 26 – Diagrama de Bode do conversor boost . . . . .	44
Figura 27 – Diagrama de Bode do conversor buck - Malha completa . . . . .	45
Figura 28 – Degrau aplicado ao conversor boost . . . . .	46
Figura 29 – Dinâmica do Conversor Boost, aplicado um distúrbio no sistema . . . . .	46
Figura 30 – Degrau aplicado à malha interna do conversor Buck . . . . .	47
Figura 31 – Dinâmica na malha interna do Conversor Buck, aplicando um distúrbio no sistema . . . . .	47
Figura 32 – Degrau aplicado à malha externa do conversor Buck . . . . .	48
Figura 33 – Dinâmica na malha externa do Conversor Buck, aplicado um distúrbio no sistema no valor de 15V . . . . .	48
Figura 34 – Modelo de Baterias presente no MATLAB® Simulink . . . . .	49
Figura 35 – Modelo Completo do conversor Bidirecional junto ao Sistema de Baterias . . . . .	49

Figura 36 – Evolução do SOC para corrente elevada de entrada na no sistema de Armazenamento de Energia . . . . .	50
Figura 37 – Comportamento da corrente ao mudar do estado de descarga para carga	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características Gerais das Baterias de Chumbo-Ácido . . . . .	17
Tabela 2 – Características Gerais das Baterias de Lítio . . . . .	20
Tabela 3 – Parâmetros utilizados no algoritmo do SIA . . . . .	25
Tabela 4 – Codificação do vetor solução . . . . .	25
Tabela 5 – Valores obtidos pelo algoritmo SIA . . . . .	43
Tabela 6 – Margens de estabilidade . . . . .	45

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	Motivação	12
1.2	Objetivos	12
1.3	Publicação Decorrente	14
1.4	Estrutura do Trabalho	14
<b>2</b>	<b>BATERIAS</b>	<b>15</b>
2.1	Baterias do tipo Chumbo-Ácido	17
2.2	Baterias de Lítio	19
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO EMPREGADA</b>	<b>21</b>
3.1	O Sistema Imunológico Artificial	22
3.2	Algoritmo de Seleção Clonal	24
<b>4</b>	<b>ELETRÔNICA DE POTÊNCIA</b>	<b>26</b>
4.1	Modelagem Boost	27
4.2	Modelagem Buck	32
4.3	Análise do Controlador	35
4.4	Método para escolha dos parâmetros dos compensadores	36
4.4.1	Compensador tipo 1	36
4.4.2	Compensador tipo 2	37
4.4.3	Compensador tipo 3	39
4.4.4	Análise do fator k nos compensadores estudados	40
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>43</b>
5.1	Análise do impacto dos controladores projetados	44
5.2	Análise da dinâmica dos compensadores calculados	45
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>52</b>
6.1	Trabalhos Futuros	53
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>54</b>
	<b>ANEXO A – Código utilizado MATLAB Simulink</b>	<b>57</b>
A.1	Modelo do Buck	57
A.2	Modelo do Boost	63

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, devido à grande necessidade de implementação de formas de energia mais limpas a serem alocadas nos lugares das quais que utilizam combustíveis fósseis como matéria-prima, são destacas as renováveis, em específico eólica e solar. Um dos grandes pontos positivos de implementação de ambas as fontes é a redução de poluentes que prejudicam em larga escala o ambiente como um todo [1].

Por serem fontes intermitentes de energia, além de serem influenciadas por diversos fenômenos e aspectos naturais, há uma necessidade de uniformizar a geração, para que esta possa ser injetada na rede, beneficiando todo o sistema de transmissão e de distribuição. Assim, com a busca de torná-las mais constantes ao longo do dia, utilizam-se equipamentos para armazenar a energia durante o pico da geração [1],[2],[3],[4],[5] para que ela seja aplicada no sistema em horários de baixa produção energética.

Esses equipamentos são conhecimentos como elementos armazenadores de energia, como as baterias eletroquímicas, os supercapacitores, as rodas de inércia, e as centrais hidráulicas reversíveis [2]. Para impacto residencial e industrial, destacam-se os armazenamentos de forma química (baterias), elétrica (supercapacitores) e mecânico (roda de inércia). Um dos pontos importantes sobre a bateria é que elas podem ser ligadas em série e paralelo, abrangendo diversas aplicações, desde alimentar pequenos eletroeletrônicos como celulares e computadores, até o fornecimento de energia para grandes centrais ligadas ao sistema elétrico.

Assim, diversos estudos buscam melhorar o rendimento do uso da transformação de energia química para elétrica com o intuito de utilizar ao máximo. Uma das grandes vertentes é o uso em veículos elétricos, do tipo híbrido e elétrico. Há basicamente duas formas estudadas para carregamento das bateria atuais. Uma delas é via frenagem regenerativa. Convencionalmente, os veículos possuem dois tipos de freios, os de tambor e os de disco. Entretanto, essa energia de fricção gerada pela ação dos freios pode ser controlada para ser rearmazenada em futuros usos [6].

A segunda forma e a mais utilizada é a adaptação ao sistema elétrico de distribuição e ao de transmissão para recarregar as baterias presentes nos veículos elétricos. O sistema de conversão de energia é composto pelo veículo, considerado a carga do sistema, elementos da eletrônica de potência, esses utilizados com o objetivo de adequar as tensões para níveis de uso e a própria rede, a fonte do sistema.

Além do uso em veículos elétricos, as baterias também são empregadas de forma doméstica, junto a painéis fotovoltaicos. Na literatura, há diversos estudos que abordam e corroboram para a importância da inserção de elementos armazenadores de energia para aplicações em caráter residencial e industrial .

## 1.1 Motivação

Como motivação, são destacados os seguintes itens:

- Detalhar os principais tipos de bateria presentes no mercado;
- Descrever de forma completa o conversor buck-boost bidirecional;
- Detalhar a construção da malha de controle;
- Descrever as etapas da simulação, junto a possíveis comentários.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é propor uma metodologia baseada em uma técnica meta-heurística de otimização, o sistema imunológico artificial, para a otimização de parâmetros de sistemas de armazenamento a baterias. A otimização proposta é validada através de um modelo de simulação do comportamento de carga da bateria, desenvolvido no âmbito desta monografia.

Este modelo consiste em um conversor bidirecional CC/CC para a operação da bateria, junto a uma malha de controle para os dois modos de operação analisados, o carregamento e a descarga. Com o intuito de realizar uma análise completa da bateria, serão monitorados o estado de carga, do inglês State of Charge (SOC), junto com um monitoramento de corrente e de tensão durante a operação do sistema.

A função objetivo do modelo de otimização, baseado na técnica SIA consiste no mínimo desvio, dado pelo parâmetro "Desvio Médio Quadrático, ou do inglês, *Root Mean Square Error* (RMSE), dos tempos de subida e de acomodação, bem como do *overshoot*, em relação aos respectivos valores esperados.

Ao longo deste trabalho é proposto um modelo de otimização para o ajuste de parâmetros de baterias, além da modelagem de um conversor bidirecional buck-boost. São apontados os seguintes objetivos específicos para estudo:

- Detalhar os principais tipos de bateria presentes no mercado, demonstrando o funcionamento e os principais benefícios de cada modelo;
- Descrever de forma completa o conversor buck-boost bidirecional, pormenorizando as principais características de comutação;
- Propor um método de otimização meta-heurística bioinspirada baseada em Sistema Imunológico Artificial, para a escolha de parâmetros de conversores de eletrônica de potência integrados a sistemas de armazenamento de baterias;

- Detalhar a construção da malha de controle, através do Matlab<sup>®</sup> Simulink;
- Descrever as etapas da simulação, junto a possíveis comentários.

### 1.3 Publicação Decorrente

A pesquisa realizada no âmbito da presente monografia resultou na publicação de artigo em congresso técnico-científico a seguir:

VIDAL, P. H. D.; dos SANTOS, A. L. M.; OLIVEIRA, L. W.; de OLIVEIRA J.G. "Controle Dinâmico de Descarga de Baterias Através de Sistema Imunológico Artificial" "Controle Dinâmico de Descarga de Baterias Através de Sistema Imunológico Artificial". In 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission (CLAGTEE 2017), 2017, Mar del Plata, ARG.. Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission (CLAGTEE 2017), 2017.

### 1.4 Estrutura do Trabalho

A essência desta obra que aborda otimização de parâmetros do conversor bidirecional buck-boost está segmentada seguindo os capítulos conforme a seguir:

O Capítulo 2 trata da bateria em si, do modo de funcionamento de uma pilha comum, junto com a evolução e sua utilização, além das principais tecnologias utilizadas recentemente no escopo das BESS (Battery Energy Storage System).

No Capítulo 3, é abordada a ciência por trás da otimização metaheurística, no caso como ela é descrita, sua aplicação e funcionalidade.

Prosseguindo, o Capítulo 4 versa sobre as tecnologias utilizadas na interligação entre sistemas de corrente contínua e a construção do modelo do conversor empregado. Além disso, é descrito o comportamento do controlador planejado, visando manter a carga sobre uma tensão constante, junto com o comando da corrente de descarga de bateria para que se monitore parâmetros intrínsecos à mesma, como o SOC e o DOD (Depth of Discharge).

Os resultados e as conclusões obtidas acerca do trabalho e possíveis estudos futuros serão comentados respectivamente nos Capítulo 5 e no Capítulo 6.

## 2 BATERIAS

As baterias são compostas basicamente de três elementos fundamentais: o catodo, o anodo e o eletrólito. O primeiro, conhecido como o polo positivo da bateria, é constituído de metais (sobretudo), os quais são formados essencialmente de elétrons, liberando as cargas negativas presentes nas camadas de valência para o eletrólito [7],[8]. Os anodos, nas células eletroquímicas o polo negativo, é a parte rica em lacunas (cargas positivas). O eletrólito é uma solução que permite o transporte de cargas entre os eletrodos positivos e negativos, constituído sobretudo de solução ou materiais ricos em íons.

A primeira pilha, a qual pode ser combinada constituindo as baterias, foi desenvolvida pelo químico Jonh Daniell, em 1836. Os eletrodos utilizados na época foram os de zinco e cobre. A seguir é apresentada uma figura que demonstra o funcionamento da pilha, junto com as equações de redução e oxidação observadas.

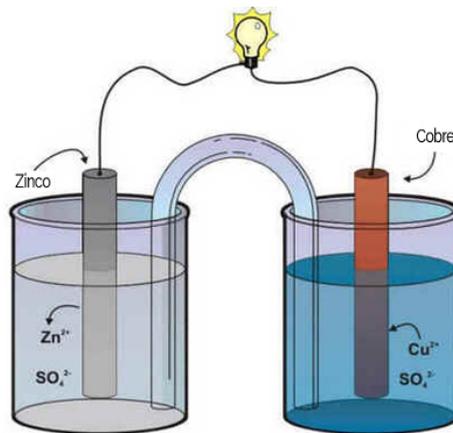


Figura 1 – Modelo da Pilha de Daniell

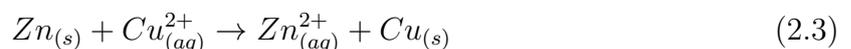
Para as equações de oxidação, vistas no eletrodo de Zinco:



Para as equações de redução, vistas no eletrodo de Cobre:



Logo, o resultado da soma de (2.1) e (2.2) é descrito abaixo.



Onde que o potencial do anodo( $Zn$ ) é  $-0,7618\text{ V}$  e do catodo( $Cu$ ) é  $0,340\text{ V}$ , resultando em uma pilha de  $1,1018\text{ V}$  em circuito aberto.

Assim, com o sucesso do equipamento, ao longo dos séculos XIX, XX e XXI, são estudadas novas combinações de elementos para catodos e anodos, além do eletrólito, com o intuito de alcançar melhor eficiência e segurança. Uma das classificações é realizada a partir do tipo da mesma, caso ela fora construída com o intuito de ser recarregável ou não.

As baterias primárias são as fontes de energia de diversos eletrônicos, brinquedos, equipamentos de comunicação, entre outros dispositivos. Uma das grandes vantagens desse tipo de armazenador de energia é a densidade energética, confiabilidade, custo e validade (descargas internas, sem conexão à carga). São utilizadas desde o metade do século XX com fins militares, desenvolvendo e aprimorando a tecnologia de construção, possibilitando a aquisição de uma densidade energética de  $400\text{ Wh/kg}$ . Durante o início do século XXI, houve grandes avanços no uso desse tipo de bateria, com o desenvolvimento de novos tipos de materiais para os eletrólitos e para os eletrodos [9].

Entretanto, como são baterias que não foram projetadas para processos de carregamento, há limites de utilização, sobretudo em aplicações elétricas ligadas à rede de transmissão, distribuição, alimentação de cargas de grande porte e para uso em veículos elétricos.

Para essas aplicações de maiores potências e necessidade de carregamento para uso contínuo, seguindo certas condições, nomeia-se as baterias como secundárias. Inicialmente, o primeiro tipo a ser desenvolvida foi a de chumbo-ácido, em 1859 pelo inventor francês Gaston Planté, modelo representado na figura (2), o qual conseguiu construir uma bateria que poderia ser recarregada, invertendo o sentido da corrente entre os polos. Esta bateria desenvolvida pelo pesquisador francês é constituída de chumbo, mergulhada em um eletrodo contendo um pequeno percentual de ácido-sulfúrico. Uma das grandes inovações é a possibilidade de reversibilidade do fluxo de corrente.

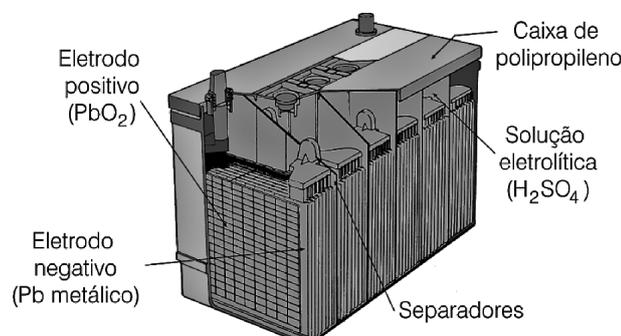
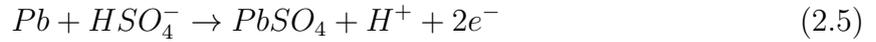
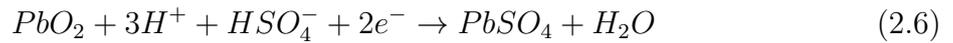


Figura 2 – Modelo da Bateria de Planté

Para as reações presentes no eletrodo negativo:



Para a reação presente no eletrodo positivo:



Logo, o resultado da soma de 2.5 e 2.6 é descrito a seguir.



Durante os séculos XX e XXI, surgiram diversas novas combinações de elementos químicos com o intuito de aprimorar a vida útil, densidade energética e complexidade de manutenção e construção. Dentre elas, serão comentadas a seguir as mais utilizadas no mercado, sobretudo em aplicações ligadas ao sistema elétrico, as de Chumbo-Ácido, as de Lítio-Íon e as de Vanádio [9].

## 2.1 Baterias do tipo Chumbo-Ácido

A tecnologia nomeada como Chumbo-Ácido se destaca principalmente pela construção simples e pelo baixo valor no mercado. Devido à grande aplicação e uso em diversos setores da economia, desenvolvem-se novos estudos com o principal objetivo de melhorar o desempenho desse tipo de armazenador de energia, pois dentre as baterias comentadas anteriormente, as de chumbo-ácido constituem o tipo menos eficiente na relação energia por peso. Entretanto, são utilizadas de forma maciça em veículos elétricos, pois possuem eficiência energética relativamente alta, entre 75% e 80% [9]. Elas são classificadas em baterias de arranque, ventiladas, seladas, tracionárias e estacionárias. As características gerais são descritas na tabela a seguir.

Tabela 1 – Características Gerais das Baterias de Chumbo-Ácido

<b>Parâmetros de Operação</b>	
Tensão de Operação (V)	2,5 a 2,85
Energia Específica (Wh/kg)	33 a 45
Números de Ciclos de Vida em DOD 100%	350
Temperatura de Operação (°C)	-20 a 50

As baterias de arranque ou SLI são as utilizadas nos veículos automotivos, sendo responsáveis por fornecer a energia inicial para que o processo de combustão do motor

possa ser inicializado, além de prover energia para os equipamentos elétricos do veículo. As ventiladas são as que possuem como elementos principais o chumbo (Pb) e o antimônio (Sb). Em comparação às outras, elas possuem um elevado nível de decomposição de hidrogênio. Assim, é devida a inspeção de água para que não acarrete superaquecimento. Uma vantagem no uso do antimônio é a facilidade da fundição do material na bateria.

As baterias seladas, não possuem contato direto com o eletrólito, além disso, em comparação com as ventiladas, por serem isoladas, não desprendem o hidrogênio das reações de redução e oxidação. Em consequência, a redução de gases é menor, além da diminuição na dependência de troca de água.

As de tração, ou tracionárias são utilizadas em aplicações de grande porte, além de serem colocadas em condições mais específicas e extremas. Os ciclos de carga e descarga são mais intensos e o período de carregamento é rápido.

As estacionárias são aplicadas sobretudo em sistemas UPS, nos quais trabalham carregadas e quando são acionadas, substituem de forma eficiente o sistema que se encontra desligado. Como são fabricadas para trabalharem em repouso grande parte do tempo, para que não tenha perda por self-discharge, elas são projetadas com eletrólitos maiores.

Sobre o processo de recarga das células de chumbo-ácido, são descritos doze formas previstas na literatura. Em destaque, os métodos por corrente constante, tensão constante, *pulse charging*, o *float charging*, o *taper charging*, *trickle charging* e o *rapid charging*. As duas primeiras citadas são as de procedimentos mais simples, a por corrente é utilizada sobretudo em pequenas células, a por tensão constante em baterias de ciclagem profunda, as quais trabalham com DOD (*Depth of Discharge*) elevados, próximos a 1.

O método *pulse charging*, é utilizado sobretudo em baterias de tração, as quais necessitam serem carregadas em um curto espaço de tempo, mas com elevado custo. A forma consiste em utilizar transistores que regulam a corrente destinada à célula. Contudo, por ser um procedimento rápido, ele pode danificar o interior da bateria, impactando nas reações de oxidação e redução.

O seguinte, *float charging*, é uma variação do método por tensão constante, que consiste em manter o diferencial de potencial inferior à tensão de sobrecarga. Este é usado para sistemas de fonte de alimentações ininterruptas de pequena e grande escala. O *taper charging*, que constitui em variar a corrente ao longo do procedimento de carga, para elevados DOD, elevadas correntes, baixo DOD, baixas correntes. Destaca-se que este é um método que desconsidera a tensão entre os polos da bateria.

O *trickle charging*, também uma variação da estratégia por corrente constante, consistindo diferentemente em aplicar baixos valores de corrente para aumentar a segurança do processo. O *rapid charging*, é um mecanismo mais complexo, pois além de se controlar a corrente, controla-se a tensão. Ele é utilizado quando se deseja fazer cargas em menos

de uma hora.

## 2.2 Baterias de Lítio

As baterias de Lítio-Íon foram desenvolvidas inicialmente para aparelhos de marca-passo devido à grande densidade energética, superior às encontradas de Zinco-Mercúrio, antes utilizadas. Assim, com o sucesso e a expansão de eletroeletrônicos após a década de 70, houve uma forte demanda, devido sobretudo a grande energia armazenada presente [9],[10]. Uma das características de importância neste tipo de processo eletroquímico é a alta reversibilidade, a qual possibilita o uso desta em vários ciclos, mantendo a eficiência nominal da bateria.

As células de Lítio-Íon, são compostas do uso alternado de placas de íons( $\text{Li}^+$ ) com placas contendo íons negativos, como o dióxido de Cobalto( $\text{CoO}_2$ ), o dióxido de Níquel e o óxido de Magnésio ( $\text{Mn}_2\text{O}_4$ ). Elas são classificadas devido ao tipo de eletrólito utilizado: as Inorgânicas, as de Polímero e as de Líquido Orgânico. As inorgânicas, exemplificando pelas  $\text{LiSO}_2$  possuem elevadas taxas de carga e descarga, devido a alta condução iônica presente no eletrólito. A seguir, figura (3) é representada uma bateria de lítio comercial, e seu esquema de funcionamento:

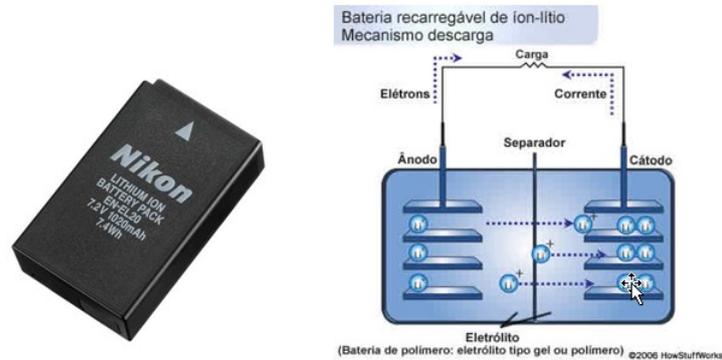


Figura 3 – Exemplo de Bateria de Lítio e Funcionamento

Entretanto, um dos pontos negativos é a toxicidade do mesmo, constituinte de enxofre. Assim, para esse tipo, deve-se controlar de forma mais precisa a temperatura de operação e o estado de carga, ou descarga. As células classificadas de polímero, possuem uma segurança maior sobre as inorgânicas e as de líquido orgânico devido a baixa reatividade do eletrólito. As características gerais são descritas na tabela (2),[9].

Tabela 2 – Características Gerais das Baterias de Lítio

<b>Parâmetros de Operação</b>	
Tensão de Operação (V)	2,5 a 4,2
Energia Específica (Wh/kg)	100 a 158
Números de Ciclos de Vida em DOD 100%	3000
Temperatura de Operação (°C)	-40 a 65

Sobre as de Líquido Orgânico, destaca-se que possuem baixa taxa de auto-descarga, alta densidade energética, entretanto pelas reações de carga e descarga possibilitam a formação de dendritos, havendo a probabilidade de curto-circuito no interior das células.

O processo de carga, pode ser realizado de duas formas: a primeira, pela corrente constante, e a segunda pela manutenção da tensão e a corrente constantes. Além disso, a tensão média para o procedimento está entre 4,1V e 4,2V, e a corrente utilizada geralmente é reduzida, no caso 20% da capacidade máxima de descarga. Entretanto, é recomendável o uso de tensões inferiores, 2,5V e correntes correspondentes à 10% do valor nominal.

Devido a estudos comparativos (referências), para aplicações de pequeno e médio porte, o tipo de bateria a ser aplicado são as de Lítio-Íon.

### 3 METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO EMPREGADA

A metodologia proposta para a escolha dos parâmetros do conversor bidirecional buck-boost é baseada na técnica de otimização meta-heurística bioinspirada denominada Sistema Imunológico Artificial. Esta técnica é bioinspirada no comportamento do sistema imune adaptativo natural, presente em grande parte dos mamíferos terrestres [11],[12].

O objetivo do emprego dessa técnica é buscar uma forma de escolher valores de resistores, capacitores e indutores numa gama disponível no mercado, ou seja, selecionar os parâmetros citados entre valores comerciais discretizados, junto com frequência de comutação e a margem de fase adequada para operação do sistema. Portanto, a seleção proposta trata-se de um problema de programação inteira, de região de solução não convexa e com múltiplas soluções, criando ambiente propício para a aplicação de técnicas meta-heurísticas afim de evitar a explosão combinatória na busca pelo espaço de soluções.

Um dos pontos principais para a aplicação desse instrumento computacional é a definição da função objetivo [13]. Para estabelecê-la, é necessário definir as variáveis de decisão do problema. Logo, são aplicadas os parâmetros listados a seguir:

$$X = \begin{cases} 1 \rightarrow t_{rise} \\ 2 \rightarrow t_{set} \\ 3 \rightarrow Erro(RMSE) \end{cases}$$

Em que as três variáveis comentadas, o tempo de subida ( $t_{rise}$ ), o tempo de acomodação ( $t_{set}$ ) e o Erro ( $RMSE$ ), serão as variáveis de decisão a serem otimizadas. Elas devem ser minimizadas a fim de se obter um bom desempenho do conversor. Portanto, a função objetivo é formulada como (3.1).

$$FOB = x_1 \cdot RMSE + x_2 \cdot t_{rise} + x_3 \cdot t_{set} \quad (3.1)$$

Em 3.1, as variáveis  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  são referentes aos pesos de cada parâmetro a ser minimizado na função objetivo. De acordo com [11],  $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ . Estes pesos são definidos a partir do conhecimento do problema e dos requisitos do controlador. Com base neste conhecimento, no presente trabalho, os valores adotados para os pesos são:  $x_1 = 0,55$ ,  $x_2 = 0,35$  e  $x_3 = 0,1$ . A escolha é devida à magnitude dos valores esperados.

O erro da resposta do conversor em relação à resposta esperada é dado pelo valor de erro médio quadrático, do inglês *Root Mean Square Error* (RMSE). Esta métrica de erro tem sido utilizada para problemas similares em que se deseja minimizar desvios de uma resposta em relação a um padrão de referência.

Além da função objetivo, é importante definir as restrições do problema, para que este convirja para a solução pretendida de forma mais rápida e que respeite certas relações entre variáveis e parâmetros do problema.

Para a construção de um conversor estático, é necessário definir se ele opera em regime contínuo ou descontínuo, de acordo com os valores do capacitor e do indutor, presentes estes na saída e entrada, respectivamente do conversor *boost*. Em [15], é possível definir para quais valores mínimos de capacitância e indutância, com o conversor atuando no modo CCM. As equações são definidas a seguir:

$$L_{min} = \frac{D \cdot (1 - D)^2 \cdot R}{2 \cdot f} \quad (3.2)$$

$$C_{min} = \frac{D}{R \cdot (\Delta V_o / V_o) \cdot f} \quad (3.3)$$

Em que as variáveis  $L_{min}$  e  $C_{min}$  representam os valores mínimos de indutância e capacitância para que o conversor possa atuar no modo contínuo,  $D$  a razão cíclica de operação,  $R$  o valor de resistência da carga,  $f$  a frequência de chaveamento do sinal de modulação,  $\Delta V_o$  o *ripple* de tensão previsto junto à carga e  $V_o$  o valor de tensão na saída do conversor.

### 3.1 O Sistema Imunológico Artificial

A técnica de otimização via Sistema Imune Artificial é baseada na teoria do vista na área médica, a qual estuda o sistema de proteção do corpo para os animais vertebrados. Ela é amplamente aplicada em diversas áreas, como assuntos ligados à confiabilidade de sistemas elétricos de potência [16], alocação ótima de compensadores em redes de distribuição e na escolha de parâmetros para construção de conversores estáticos de potência.

A fundamentação do Sistema Imune Artificial é dado junto ao conjunto de todos os mecanismos utilizados pelo corpo humano para eliminar elementos estranhos ao organismo. Estes, são nomeados como antígenos, já os agentes que os combatem são conhecidos como anticorpos [12],[11].

Por caracterizar um sistema específico, cada anticorpo age diretamente sobre um tipo pré-determinado de antígeno.

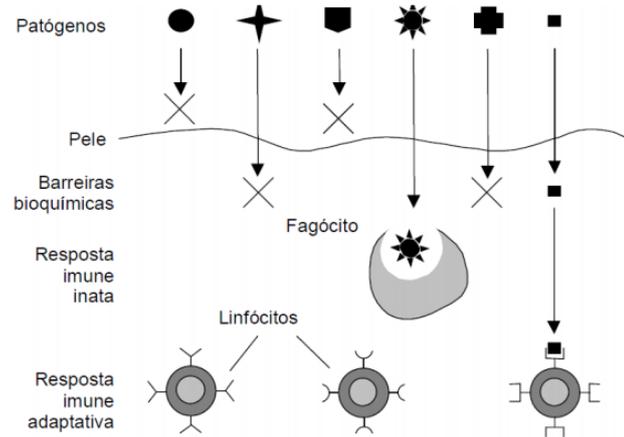


Figura 4 – Representação da ação dos Anticorpos junto aos Antígenos

Como visto na figura (4), a pele é o primeiro agente a limitar possíveis invasões dos patógenos no nosso corpo. Ela possui duas barreiras, a física e uma química, composta por variações no pH e outros componentes gerados na própria pele, derme e epiderme. Entretanto, grande parte dos antígenos conseguem superar essas duas formas de bloqueio. Portanto, são necessários os anticorpos gerados pelos linfócitos B para eliminá-los.

O SIA funciona a partir de cinco critérios principais [16]:

- Geração de linfócitos B;
- Seleção clonal;
- Edição de receptores;
- Seleção negativa.

A medula óssea é responsável pela produção dos linfócitos B. Quando são necessários, estes são gerados de forma randômica. Entretanto são selecionados apenas alguns indivíduos para continuarem no sistema de defesa, de acordo com as características do antígeno. A seleção clonal representa o quanto o linfócito B, junto com seu anticorpo é próximo ao antígeno específico. No algoritmo, essa relação é vista como a proximidade da resposta ao valor ótimo pretendido. A edição de receptores surge para diversificar a produção dos anticorpos, evitando se estabilizar em indivíduos teoricamente aptos, concentrados em pontos ótimos locais. Além dessas etapas, a seleção negativa é responsável em eliminar anticorpos aptos que atacam outras possíveis soluções do algoritmo, problema conhecido na área médica como resposta auto-imune.

### 3.2 Algoritmo de Seleção Clonal

O método de pesquisa aplicado neste trabalho inclui na modelagem do problema e nas etapas de solução à teoria anteriormente descrita no Sistema Imune Inato. Além dela, a Seleção Clonal é organizada de forma sistematizada. O fluxograma que contém ambos os princípios é descrito abaixo [12].

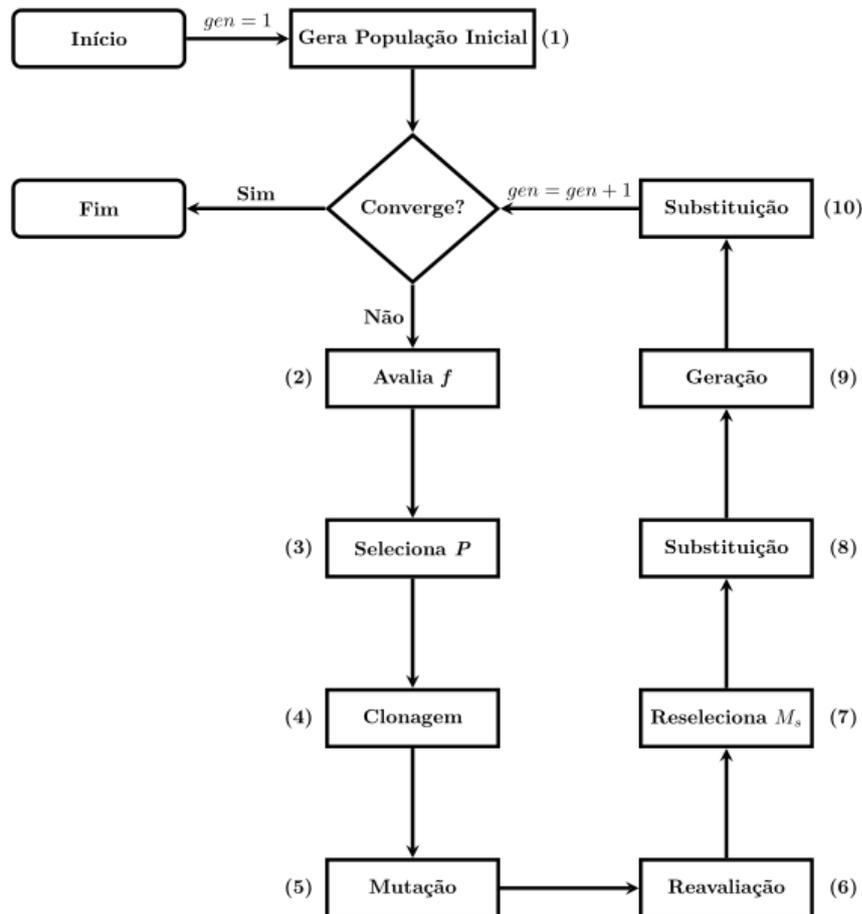


Figura 5 – Fluxograma do Algoritmo Aplicado

No processo (1), a população de linfócitos B é desenvolvida de forma pseudoaleatória, de acordo com as restrições impostas na elaboração do problema e com o conjunto de possibilidades para as variáveis discretizadas. Junto a elas, os anticorpos gerados possuem a mesma origem randômica das células de proteção [17].

No processo (2), a população criada é submetida à função objetivo para que na próxima etapa possa ocorrer a nomeação dos melhores indivíduos para iniciar uma próxima geração de linfócitos B. Nas etapas (4) e (5,6), respectivamente, os indivíduos são clonados e logo após sofrem pelo procedimento de hipermutação somática para verificar se houve uma melhora no rendimento dessas possíveis soluções. Nos próximos dois procedimentos,

ocorre a substituição dos indivíduos gerados pelos processos (5,6), por aqueles iniciais criados na etapa (3).

No procedimento (9), ocorre a troca pseudoaleatória dos receptores presentes nos anticorpos, ajudando assim a expandir possíveis soluções em âmbito global. Posteriormente à etapa (9), é verificada se a convergência do algoritmo é cumprida. Caso contrário, inicia-se novamente o processo das dez etapas comentadas anteriormente, mas com a população inicial igual à gerada ao procedimento (10) da última geração.

Para a construção do algoritmo, são utilizados os valores presentes na tabela (3):

Tabela 3 – Parâmetros utilizados no algoritmo do SIA

Parâmetros	Valores
Tamanho da População	100
$n_{an}$	50
$n_{ed}$	3
$\beta$	20
$\rho$	1
Número Máximo de Gerações	100
Número Máximo de Gerações Consecutivas sem Melhoria	20

Onde que as variáveis presentes na tabela 3 definem o funcionamento e a dinâmica do algoritmo [17].

O problema é codificado a partir do vetor que contém as variáveis de forma ordenada. Como destacado em 4.

Tabela 4 – Codificação do vetor solução

$R_{es}$	$C_{ap}$	$L_{ind}$	$K_m$	$K_s$	$M_{Phase}$
----------	----------	-----------	-------	-------	-------------

Onde que as possíveis soluções dos equipamentos físicos, no caso os ganhos para o sensor de medição e de ganho do modulador PWM, são arbitrados da seguinte forma:

$$K_s = 0.01 : 0.1 : 1$$

$$K_m = 0.01 : 0.001 : 0.5$$

A margem de fase, segundo [18] é adequada dentre os valores de 30° e 60°, assim:

$$M_{Phase} = 30 : 1 : 60$$

## 4 ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Para que o sistema de baterias possa ser conectado junto a um inversor de frequência, com o intuito de manter níveis adequados de tensão, é necessário adicionar um conversor que possibilite realizar essa adequação de forma estável. A partir da imprescindibilidade da carga e descarga, busca-se um conversor que possibilite o fluxo nos dois sentidos. Eles são agrupados em dois segmentos, os isolados e os não isolados [15].

Os isolados são escolhidos preferencialmente quando há grande relação de transformação, além de possuir isolamento elétrico entre os lados de alta e de baixa tensão, podem fornecer tensões múltiplas na saída, de acordo com o transformador envolvido. Porém, para isso os trafos utilizados em baixas frequências (50Hz e 60 Hz) encarecem o projeto, além de aumentar a complexidade devido ao trabalho de retificadores, anteriores ao transformador.

Diferentemente, os não isolados são adotados em aplicações em que não há grande relação de transformação entre a entrada e a saída do conversor chaveado. Dentre eles, pode ser destacado o conversor buck-boost bidirecional, além dos conversores Cúk bidirecional e SEPIC/Zeta, [15]. Logo, o adotado, devido a complexidade de controle e modelagem, com o foco no objetivo de controle da tensão de descarga do banco de baterias é o *buck-boost* bidirecional, descrito a seguir:

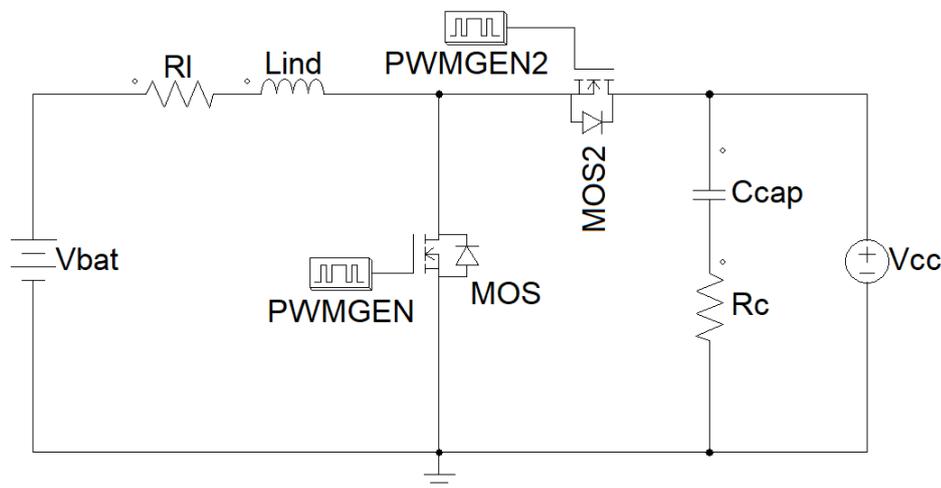


Figura 6 – Conversor Buck-Boost Bidirecional

Ele se comporta como um conversor unidirecional por ação, impactado pela escolha da chave que se deseja acionar. Diferente dos step-up e step-down, ao invés de um elemento chaveado e um diodo, substitui-se este por outra chave. Logo, a escolha é feita da seguinte maneira: caso deseja atuar como um *buck*, operar a chave MOS e zera a MOS2, funcionando apenas o diodo presente. Caso um *boost*, a ideia dual, zera MOS e trabalhar

com MOS2. Sobre a comutação das chaves, será adotado a modulação do tipo PWM.

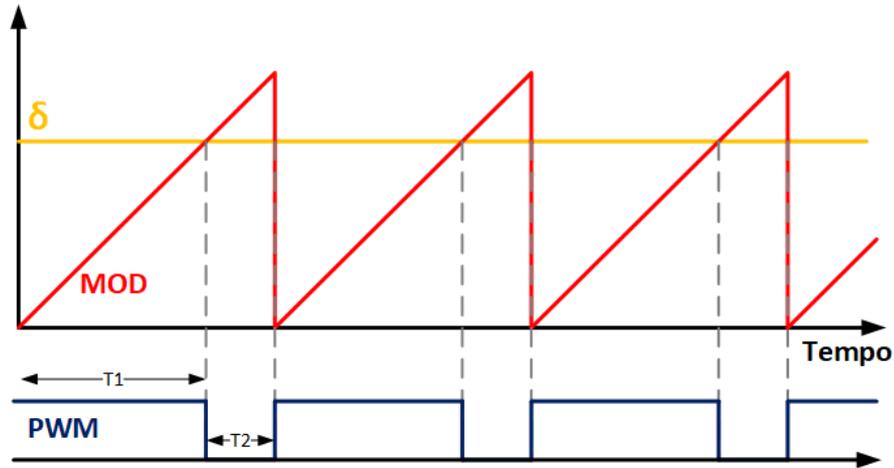


Figura 7 – Modulação por Largura de Pulso - PWM

Para que o conversor seja controlado de forma completa, é necessário a modelagem do mesmo com a finalidade de construir uma função de controle adequada. Logo, ela é proposta em [14], a qual consiste de um modelo médio em espaço de estados.

Como a finalidade do uso do método é desenvolver uma linearização do estado final da resposta, desconsideram-se possíveis *ripples*, devidos à comutação em alta frequência das chaves do conversor [14].

Logo, serão descritas a seguir as modelagens médias dos conversores, na forma boost e na forma *buck* respectivamente.

#### 4.1 Modelagem Boost

A modelagem proposta no trabalho consiste no modelo médio em espaço de estados. Como a finalidade do uso do método é desenvolver uma linearização do estado final da resposta, desconsideram-se possíveis *ripples* presentes [19]. Para a construção do modelo em espaço de estados, necessita-se adotar variáveis que possam definir os pontos de operação do sistema, definindo o espaço em estudo [20]. Logo, arbitram-se as correntes nos indutores e as tensões nos capacitores para exercer o controle do modelo.

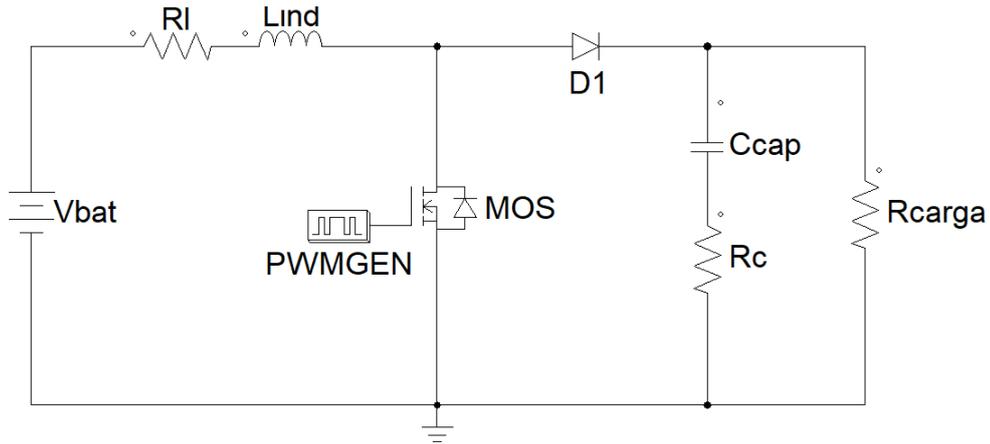


Figura 8 – Conversor Boost

Portanto, são adotadas duas variáveis de estado para a construção da função de transferência, de acordo com as matrizes  $A_{MeBo}$ ,  $B_{MeBo}$ ,  $C_{MeBo}$  e  $D_{MeBo}$ , relativas a cada intervalo de tempo. Como não há sinais iniciais na saída do sistema, define-se a matriz  $D_{MeBo}$  como nula, [21],[22].

$$\begin{cases} \dot{x} = A_{ss}x + B_{ss}u \\ y = C_{ss}x + D_{ss}u \end{cases} \quad (4.1)$$

Onde que:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{di_l}{dt} \\ \frac{dv_c}{dt} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$x = \begin{bmatrix} i_l \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$u = \begin{bmatrix} V_{cc} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

O modelo no espaço de estados definido pelo sistema é obtido segundo as equações presentes em (4.5), (4.6), (4.7) e (4.8). As duas primeiras equações são referentes ao sistema quando a chave estática conduz e o diodo é aberto e as posteriores, para o funcionamento dual das chaves. As representações dos dois modos de operação são mostrados a seguir, nas figuras (9) e (10).

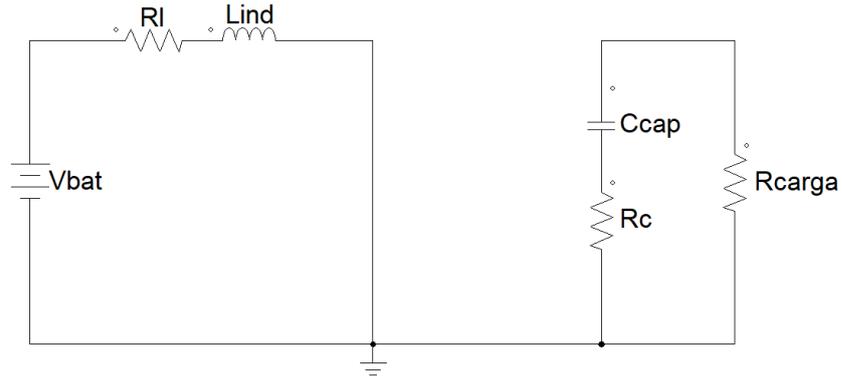


Figura 9 – Conversor Boost - Modo de operação 1

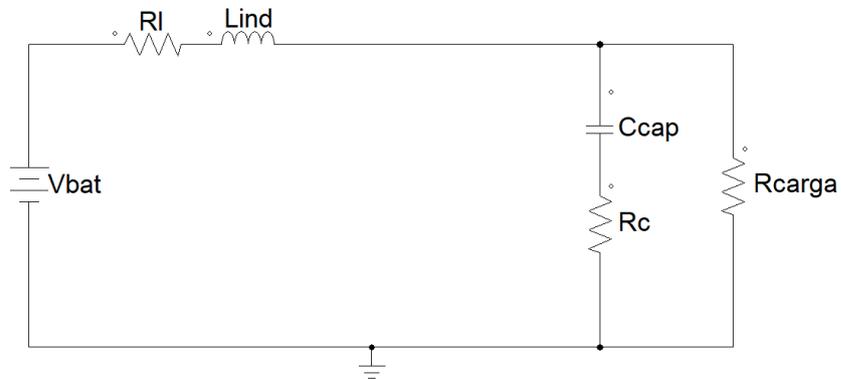


Figura 10 – Conversor Boost - Modo de operação 2

As equações descritas a seguir representam de forma matemática o comportamento em cada etapa. Para a figura (9), as equações são (4.5) e (4.5). O segundo modo de operação, representado pelo circuito presente na imagem (10) é caracterizado por (4.7) e (4.8).

$$L \frac{di_L}{dt} - r_L i_L = V_{cc} \quad (4.5)$$

$$C \frac{dv_C}{dt} r_C + v_C = -C \frac{v_C}{dt} R \quad (4.6)$$

$$\frac{V_{out}}{R} - L \frac{di_L}{dt} - r_L i_L - C \frac{dv_C}{dt} r_C - v_C = 0 \quad (4.7)$$

$$v_C + C \frac{dv_C}{dt} r_C = R(i_L - C \frac{v_C}{dt}) \quad (4.8)$$

As matrizes  $A_{1Bo}$ ,  $B_{1Bo}$ ,  $C_{1Bo}$  são definidas no intervalo  $dT$  e as  $A_{2Bo}$ ,  $B_{2Bo}$ ,  $C_{2Bo}$  estabelecidas em  $(1-d)T$ .

$$A_{1Bo} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C(R+r_C)} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$B_{1Bo} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$A_{2Bo} = \begin{bmatrix} -\frac{(Rr_L + Rr_C + r_Cr_L)}{L(R+r_C)} & -\frac{R}{L(R+r_C)} \\ -\frac{R}{C(R+r_C)} & -\frac{1}{C(R+r_C)} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$B_{2Bo} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$C_{1Bo} = C_{2Bo} = [0 \quad 1] \quad (4.13)$$

$$D_{1Bo} = D_{2Bo} = [0] \quad (4.14)$$

A partir das matrizes de estados definidas:

$$A_{ssBo} = A_{1Bo} \cdot D_{Bo} + A_{2Bo} \cdot (1 - D_{Bo}) \quad (4.15)$$

$$B_{ssBo} = B_{1Bo} \cdot D_{Bo} + B_{2Bo} \cdot (1 - D_{Bo}) \quad (4.16)$$

Para o cálculo da função de transferência que possibilite encontrar uma relação entre a variável de controle, no caso a razão cíclica e a tensão de saída, é buscado o modelo em pequenos sinais.

$$\frac{\tilde{v}_o(s)}{\tilde{d}(s)} = F(s) \quad (4.17)$$

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = A_{ss}\tilde{x} + B_{ss}\tilde{u} \\ \tilde{y} = C_{ss}\tilde{x} + D_{ss}\tilde{u} \end{cases} \quad (4.18)$$

Substituindo (4.15) e (4.16) em (4.18), tem-se:

$$\dot{\tilde{x}} = [A_{1Bo} \cdot D_{Bo} + A_{2Bo} \cdot (1 - D_{Bo})] \cdot \tilde{x} + [(A_{1Bo} - A_{2Bo}) \cdot X + (B_{1Bo} - B_{2Bo}) \cdot U] \cdot \tilde{d}(s) \quad (4.19)$$

Para a matrizes em regime:

$$X = \begin{bmatrix} I_{l0} \\ V_{c0} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Aplicando a transformada de Laplace em (4.19) obtém-se a expressão.

$$sI_{dn} \cdot \tilde{x}(s) = A_{ssBo} \tilde{x}(s) + [(A_{1Bo} - A_{2Bo}) \cdot X + (B_{1Bo} - B_{2Bo}) \cdot U] \cdot \tilde{d}(s) \quad (4.21)$$

Logo, 4.21 pode ser escrita como:

$$\frac{\tilde{x}(s)}{\tilde{d}(s)} = (sI_{dn} - A_{ssBo})^{-1} \cdot [(A_{1Bo} - A_{2Bo}) \cdot X + (B_{1Bo} - B_{2Bo}) \cdot U] \quad (4.22)$$

Assim, com as equações anteriormente apresentadas, formula-se a função de transferência no domínio da frequência, a partir da substituição dos parâmetros do circuito obtidos pelas matrizes de estado na equação (4.22), de acordo com a referência [20].

$$\frac{\tilde{v}_o(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{\alpha s^2 + \beta s + \gamma}{\delta s^2 + \rho s + \xi} \quad (4.23)$$

De acordo com [23], têm-se:

$$\alpha = -V_{cc} r_C RLC \quad (4.24)$$

$$\beta = V_{cc}(r_C CR^2 - r_C L - RL - 2r_C CR^2 D^2 + D^2 r_C CR^2 - r_C r_L CR) \quad (4.25)$$

$$\gamma = V_{cc}(D^2 r_C R - 2Dr_C R - r_L R + r_C R + R^2 - 2R^2 D + R^2 D^2 - r_C r_L) \quad (4.26)$$

$$\sigma = (r_C + r_L - Dr_C R + R - 2RD + RD^2)RLC \quad (4.27)$$

$$\rho = (r_C + r_L - D * r_C * R + R - 2 * R * D + R * D^2)(L + r_C C R + r_L C R - D r_C C * R) \quad (4.28)$$

$$\xi = (r_C + r_L - D r_C R + R - 2 R D + R D^2)^2; \quad (4.29)$$

## 4.2 Modelagem Buck

Seguindo a modelagem do conversor boost, aplica-se para o buck, [20],[15],[24].

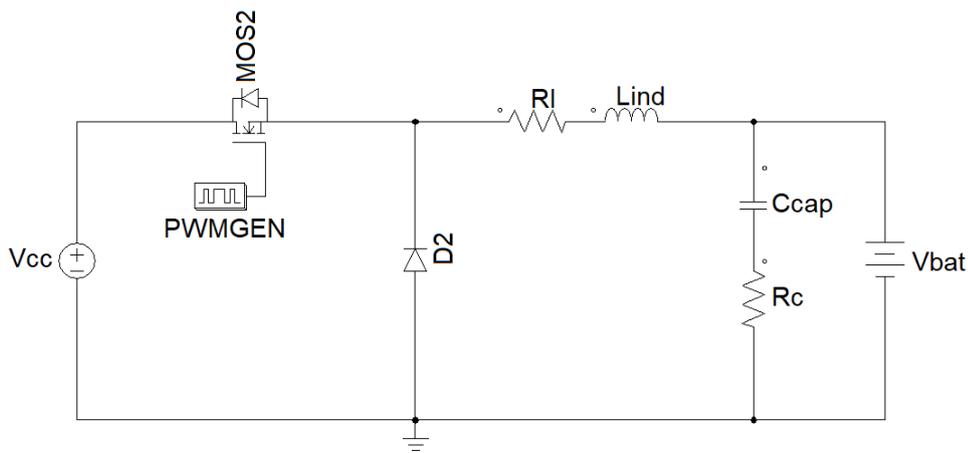


Figura 11 – Conversor Buck

$$\begin{cases} \dot{x} = A_{ss}x + B_{ss}u \\ y = C_{ss}x + D_{ss}u \end{cases} \quad (4.30)$$

Onde que as matrizes pertinentes à  $\dot{x}$  e  $x$  são equivalentes às obtidas em (4.2) e (4.3) pois ambos os sistemas são regidos por duas variáveis de estado, a corrente que percorre o indutor e a tensão entre os extremos do capacitor.

$$u = \begin{bmatrix} V_{cc} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

A demonstração da modelagem segue o padrão estabelecido pela do boost, entretanto como será aplicado uma multimalha no conversor elevador, devido às especificações comentadas no capítulo 2, serão obtidas funções de transferência da tensão do capacitor e da corrente do indutor, ambas correlacionadas com a razão cíclica [23].

Logo, de acordo com o que foi definido, as equações que regem os dois tempos de funcionamento do conversor apresentado na figura (11) são:

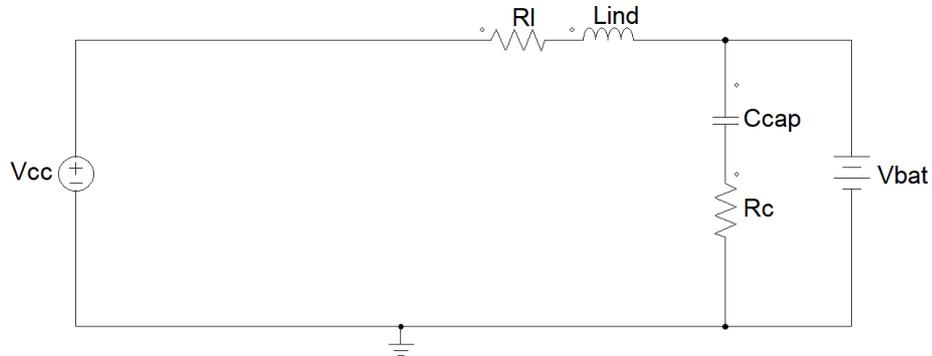


Figura 12 – Malha de Sistema para o Conversor Buck

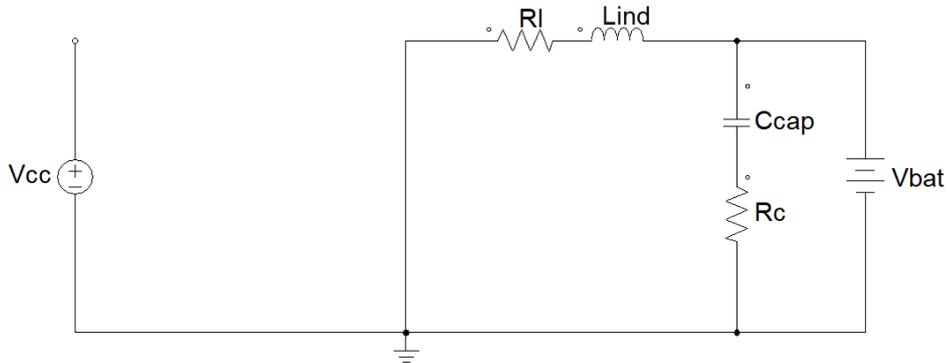


Figura 13 – Malha de Sistema para o Conversor Buck

$$i_L = C \frac{dv_C}{dt} + \frac{i_L + C \frac{dv_C}{dt} r_C}{R} \quad (4.32)$$

$$V_{cc} = L \frac{di_L}{dt} + v_C + r_L i_L + C \frac{dv_C}{dt} r_C \quad (4.33)$$

$$i_L = C \frac{dv_C}{dt} + \frac{v_C + C \frac{dv_C}{dt} r_C}{R} \quad (4.34)$$

$$0 = i_L r_L + L \frac{di_L}{dt} + v_C + C \frac{dv_C}{dt} r_C \quad (4.35)$$

Onde que (4.32) e (4.33) representam as equações para a chave estática operando e o diodo em circuito aberto, figura (12). Já as equações (4.34) e (4.35), o diodo está em curto e o transistor é representado no estado de não condução (13).

As matrizes em espaço de estado, descritas em 4.30 são subdividas pelo tempo de atuação, como mostrada na modelagem para o conversor elevador em (4.9), (4.10), (4.11), (4.12), (4.13), (4.14):

$$A_{1Bu} = \begin{bmatrix} \frac{r_L(R + r_C) + r_C R}{L(r_C + R)} & -\frac{R}{L(R + r_C)} \\ \frac{R}{C(r_C + R)} & -\frac{1}{R \cdot C} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$$B_{1Bu} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & -\frac{r_L R}{L(R + r_L)} \\ 0 & \frac{R}{C(r_C + R)} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

$$A_{2Bu} = \begin{bmatrix} \frac{r_L(R + r_C) + r_C R}{L(r_C + R)} & -\frac{R}{L(r_C + R)} \\ \frac{R}{C(r_C + R)} & -\frac{1}{C(r_C + R)} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

$$B_{2Bu} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{r_C R}{L(r_C + R)} \\ 0 & \frac{R}{C(r_C + R)} \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

$$C_{1Bu} = C_{2Bu} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

$$D_{1Bu} = D_{2Bu} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Pelo estudo das matrizes anteriormente desenvolvidas, são formuladas as funções de transferência em função da tensão e da corrente. As duas são necessárias, pois como comentado no capítulo de introdução referente aos principais modelos de baterias utilizados em sistemas de distribuição, se faz necessário um controle sistemático da corrente e da tensão da bateria.

O processo de carga deve ser norteado por pontos específicos de trabalho, para que sejam seguras as operações referentes ao uso de baterias. Assim, é desenvolvido um sistema de controle multimalhas, o qual monitora e controla as duas variáveis de estado do problema, a corrente e a tensão [25],[26].

Para isso, é configurado o diagrama de blocos do sistema, de acordo com a análise em cascata do controle, uma malha interna de corrente e uma externa de tensão.

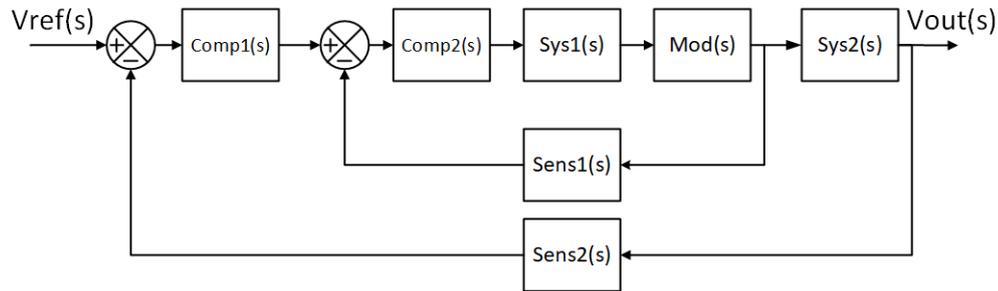


Figura 14 – Malha de Sistema para o Conversor Buck

Onde que  $Comp1(s)$  representa o compensador ligado à malha de tensão,  $Comp2(s)$  à de corrente,  $Sys1(s)$  à função de transferência  $G_{id}(s)$ , obtida pela equação (4.42),  $Mod(s)$  ao ganho estático do modulador PWM,  $Sys2(s)$  à função de transferência  $G_{oi}(s)$ , obtida na equação (4.43) e os sensores  $Sens1(s)$  e  $Sens2(s)$ , respectivamente ligados às malha de corrente e à de tensão.

A malha interna de corrente deve possuir uma velocidade maior de resposta que a malha externa de tensão, para que a ação em cascata dos compensadores funcione [27]. As funções de transferência mensuradas a partir das equações obtidas pelo modelo médio, presentes em (4.36), (4.38), (4.37), (4.39), (4.40) e (4.41).

$$G_{id}(s) = \frac{\tilde{i}(s)}{\tilde{v}(s)} = \frac{s(CR + r_C C)V_{in} + V_{in}}{s^2 LC(R + r_C) + s(r_L CR + r_L Cr_C + RCr_C + L) + r_L + R} \quad (4.42)$$

$$G_{oi}(s) = \frac{\tilde{v}_o(s)}{\tilde{i}_L(s)} = \frac{R(sCr_C + 1)}{Cs(R + r_C) + 1} \quad (4.43)$$

Onde que as equações (4.42), (4.43), representam respectivamente as relações entre a razão cíclica  $d$  e a corrente  $i$ , e a tensão de saída, a qual se deseja controlar com a corrente que percorre o indutor. A função de transferência que relaciona a referência com a tensão de saída é obtida a partir do produto do sistema de malha fechada relativa à corrente e ao compensador utilizado. Assim, tem-se:

$$G_{vd}(s) = \frac{Comp_i(s) \cdot G_{id}(s) \cdot G_{mod} \cdot G_{oi}(s)}{1 + Comp_i(s) \cdot G_{id}(s) \cdot G_{mod} \cdot G_{oi}(s) \cdot K_{sens_i}} \quad (4.44)$$

### 4.3 Análise do Controlador

Para o conversor bidirecional, são formuladas estratégias de controle referentes aos dois estágios de operação, um para o boost e outro para o buck. No modo elevador de

tensão, o método de controle adotado é o comando da tensão da saída. Ela é escolhida por haver a necessidade de estabilizar o elo CC com o intuito de possíveis aplicações a inversores de frequência e ao acoplamento com fontes geradoras de energia. Além do conversor boost apresentar um comportamento de fase não-mínima.

De forma diferente, para o conversor abaixador, é utilizada a técnica de multimalhas, uma interna de corrente e uma externa de tensão. Ambas são usadas com a finalidade de além de estabilizar a tensão necessárias entre o sistema de baterias, manter constante a corrente, fundamental para o processo de carga de baterias do tipo Lítio, como detalhado no capítulo 2.

Os compensadores aplicados utilizam o fundamento do fator  $K$ , teoria desenvolvida por Venable [28]. O cálculo dos controladores é feito a partir da escolha de três parâmetros, o fator  $k$ , o comportamento da curva no diagrama de Bode e o avanço de fase necessário para atingir uma determinada margem de fase estabelecida. O fator  $k$  consiste de uma variável que possibilita a construção de compensadores junto a amplificadores operacionais. Além disso, essa figura de mérito avalia o ganho que o controlador deve colocar no sistema para altas e baixas frequências, junto com a alocação de polos e zeros, [29],[30].

#### 4.4 Método para escolha dos parâmetros dos compensadores

Segundo Venable, há três formas de compensadores via fator  $k$ . A escolha impacta de forma direta no número de zeros e polos e no comportamento do sistema, analisado no diagrama de Bode.

##### 4.4.1 Compensador tipo 1

O primeiro modelo de compensador apresentado consiste da alocação de um polo na origem. Logo, este sistema atua como um controlador integrativo, o qual possui uma defasagem constante de  $-90^\circ$  e uma atenuação linear de  $-20$  db/déc. O sistema é observado na figura (15).

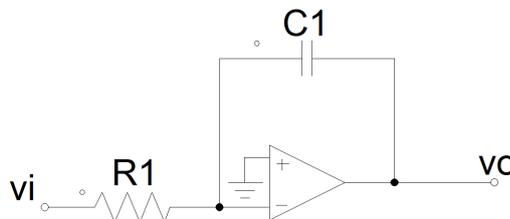


Figura 15 – Compensador fator  $k$  - Tipo 1

A relação entre os parâmetros do compensador é dada pela função de transferência

referenciada abaixo:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{R_1 C_1 s} \quad (4.45)$$

Para a frequência de corte do compensador:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (4.46)$$

O comportamento do compensador, em amplitude e em fase é observado a seguir:

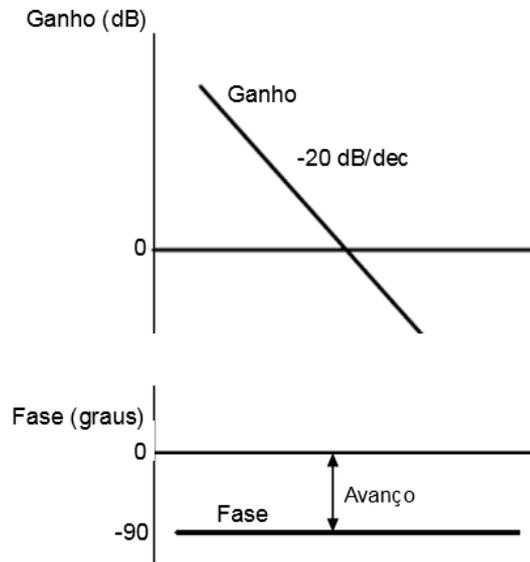


Figura 16 – Diagrama de Bode do Compensador fator k - Tipo 1

#### 4.4.2 Compensador tipo 2

O segundo tipo de compensador previsto por Venable consiste na alocação de um zero e de dois polos, um destes é posicionado na origem, atuando como integrador puro. A defasagem deste sistema, de forma diferente não é fixa, ela possui variações de  $0^\circ$  a  $-90^\circ$ . Este par de polo e zero adicional, comparado com o compensador do tipo 1, é introduzido para que o sistema possua um ganho constante para uma faixa de frequências estabelecida, onde o avanço de fase é empregado. Esta região se encontra entre as frequências  $f_{zero}$  e  $f_{polo2}$ , como visto na figura (17).

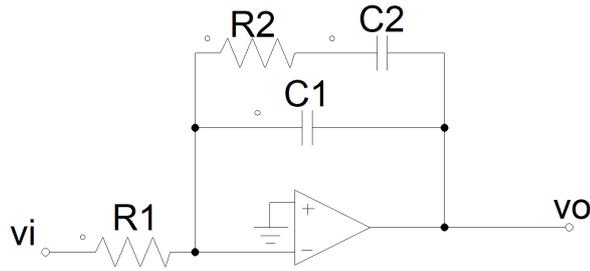


Figura 17 – Compensador fator k - Tipo 2

Para a função que relaciona os valores de resistências e capacitores, constituindo a função de transferência entre a tensão de entrada e a de saída:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1 + sC_1R_2}{sR_1(C_1 + C_2 + sR_2C_1C_2)} \quad (4.47)$$

A frequência do zero e do polo, diferente do puro integrativo são respectivamente:

$$f_{zero} = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \quad (4.48)$$

$$f_{polo2} = \frac{C_1 + C_2}{2\pi R_2 C_1 C_2} \quad (4.49)$$

O comportamento na frequência, diagrama de Bode do compensador tipo 2 é observado em:

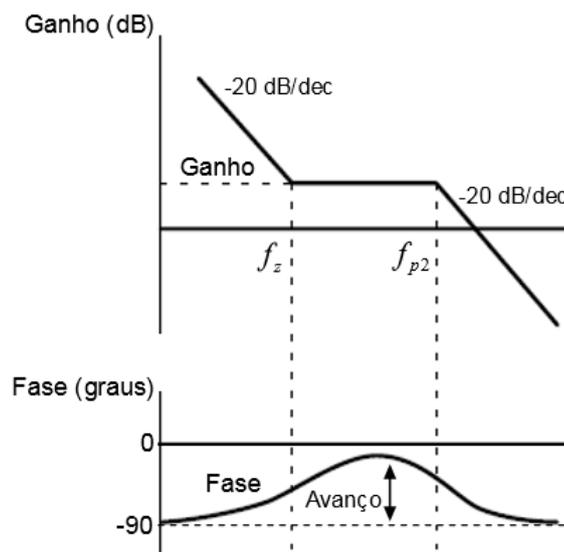


Figura 18 – Diagrama de Bode do Compensador fator k - Tipo 2

#### 4.4.3 Compensador tipo 3

Este controlador é considerado o mais complexo, possui um polo na origem junto com 4 polos e 4 zeros. Estes últimos, diferente do posicionado de forma estabelecida no centro do eixo cartesiano complexo, são alocados a partir das frequências de operação do sistema. Inicialmente, é observado pela figura (19) que para baixas frequências até o valor de  $f_{zero1}$  há uma atenuação de -20db/década. Entre os valores de  $f_{zero1}$  e  $f_{zero2}$  e após,  $f_{polo1}$  e  $f_{polo2}$ , o ganho é linear. Entretanto, após a primeira região constante, o efeito do segundo zero faz com que o sistema possua uma elevação na amplitude de 20 db/década, até atingir a segunda região de ganho constante. Devido ao polo presente em  $f_{polo3}$ , repete-se o comportamento inicial, o ganho de frequência decresce novamente com uma razão de -20 db/década.

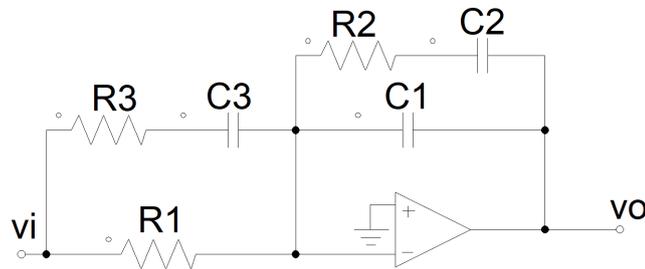


Figura 19 – Diagrama de Bode do Compensador fator k - Tipo 3

O sistema físico do compensador, visto pela combinação de elementos resistivos e capacitivos acoplados junto a um amplificador operacional é apresentado a seguir:

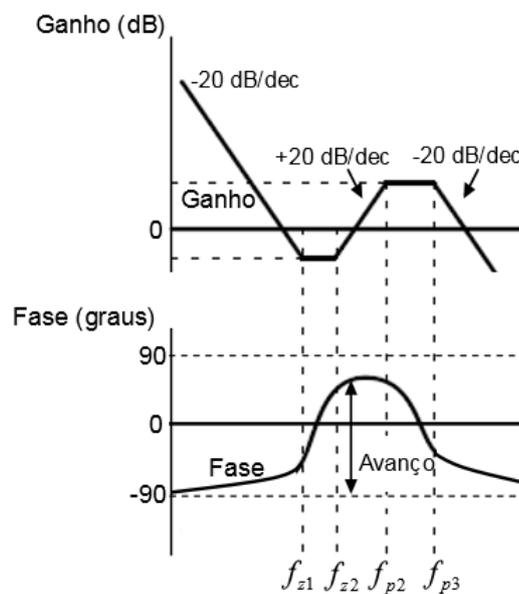


Figura 20 – Compensador fator k - Tipo 3

A função de transferência do sistema é:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{(1 + sC_1R_2) \cdot (1 + C_3R_3s + C_3R_1s)}{sR_1 \cdot (C_1 + C_2 + sR_2C_1C_2)(1 + R_3C_3s)} \quad (4.50)$$

A localização dos polos e zeros são descritos pelas equações (4.51), (4.52), (4.53) e (4.54).

$$f_{zero1} = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \quad (4.51)$$

$$f_{zero2} = \frac{1}{2\pi (R_1 + R_3) C_3} \quad (4.52)$$

$$f_{polo1} = \frac{C_1 + C_2}{2\pi R_2 C_1 C_2} \quad (4.53)$$

$$f_{polo2} = \frac{1}{2\pi R_3 C_3} \quad (4.54)$$

#### 4.4.4 Análise do fator k nos compensadores estudados

Abaixo são representadas as curvas obtidas do comportamento dos compensadores, tipo 1, tipo 2 e tipo 3. Diferente das figuras (16), (18) e (19), estas mostram o impacto do fator k como variável de decisão na alocação dos polos e zeros do compensador.

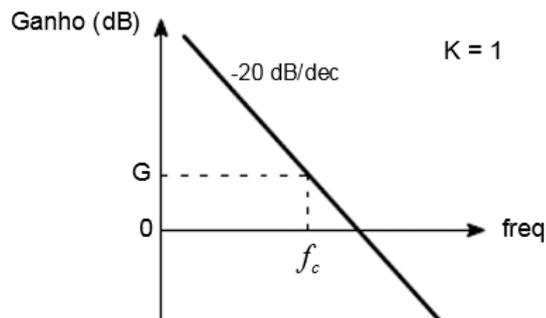


Figura 21 – Diagrama de Bode Compensador Tipo 1 - Em relação ao fator k

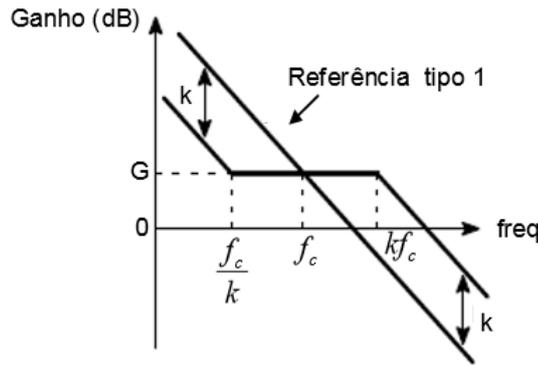


Figura 22 – Diagrama de Bode Compensador Tipo 2 - Em relação ao fator  $k$

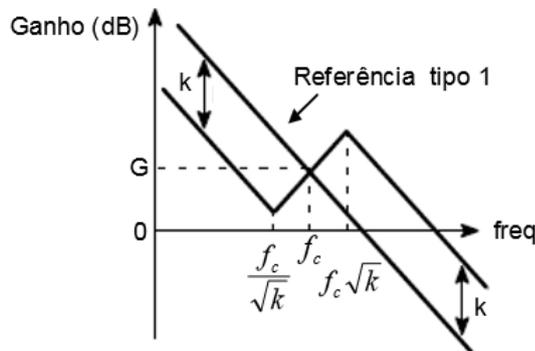


Figura 23 – Diagrama de Bode Compensador Tipo 3 - Em relação ao fator  $k$

O compensador do tipo 1, o valor de  $k$  é sempre igual a 1, devido à posição estabelecida pela frequência de corte, além da falta de possibilidade de correção da margem de fase via avanço de fase. O do tipo 2, o zero, este alocado em  $f_{zero}$ , possui influência do fator  $k$ , junto com a localização do polo. O primeiro está posicionado em uma reta de mesmo comportamento, abaixo pelo fator  $k$ , o segundo, um fator  $k$  acima. O compensador do tipo 3, há dois zeros duplos alocados no mesmo ponto, pelo diagrama de amplitude, abaixo de  $\sqrt{k}$ , no ponto  $f_c$  da curva fundamentada em 23. Os polos possuem o mesmo princípio,  $\sqrt{k}$  acima de  $f_c$ . No caso,  $f_c$  o ponto médio entre a localização dos zeros e dos polos. O pico do avanço de fase é visto em  $f_c$ , fato esse que melhora a margem de fase [24].

O avanço total de fase observado em um sistema, é composto pela soma das contribuições de cada parcela, no caso do compensador, sistema e dos ganhos. Logo, o avanço de fase  $\beta$  para o compensador do tipo 2 é:

$$\beta = \tan^{-1}(k) - \tan^{-1}(k) \rightarrow k = \tan\left(\frac{\beta}{2} + 45^\circ\right) \quad (4.55)$$

Para o compensador do tipo 3, a equação que caracteriza o avanço de fase e o fator  $k$  é:

$$\beta = 2 \cdot \tan^{-1}(\sqrt{k}) - \tan(1 \sqrt{k}) \rightarrow k = \tan^2 \left( \frac{\beta}{4} + 45^\circ \right) \quad (4.56)$$

Os parâmetros físicos de construção para os compensadores são descritos abaixo:

- Compensador tipo 1:

$$C_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot G \cdot R_1} \quad (4.57)$$

Onde  $G$  é o valor de ganho necessário para se obter a frequência de corte pretendida.

- Compensador tipo 2:

$$C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot G \cdot k \cdot R_1} \quad (4.58)$$

$$C_1 = C_2 \cdot (k^2 - 1) \quad (4.59)$$

$$R_2 = \frac{k}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot C_1} \quad (4.60)$$

- Compensador tipo 3:

$$C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot G \cdot R_1} \quad (4.61)$$

$$C_1 = C_2 \cdot (k - 1) \quad (4.62)$$

$$R_2 = \frac{\sqrt{k}}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot C_1} \quad (4.63)$$

$$R_3 = \frac{R_1}{k - 1} \quad (4.64)$$

$$C_3 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_3 \cdot \sqrt{k}} \quad (4.65)$$

Onde que  $R_1$  é estabelecido de forma arbitrária, no caso para os compensadores utilizados  $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ .

## 5 RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos através da aplicação da metodologia de otimização de parâmetros do conversor. Tal recurso metodológico se baseia na aplicação da meta-heurística bioinspirada Sistema Imunológico Artificial, afim de obter valores discretizados conforme disponibilização comercial.

Após a execução do algoritmo de otimização proposto, segundo os critérios de inicialização e parâmetros, presentes na tabela (3), os valores obtidos são apresentados a seguir.

Tabela 5 – Valores obtidos pelo algoritmo SIA

Parâmetros	Valor
Resistor	$71.1\Omega$
Capacitor	$88mF$
Indutor	$411\mu H$
Margem de Fase	$58^\circ$
Ganho do Sensor de Tensão - Boost	0.71
Ganho do Modulador PWM	0.135

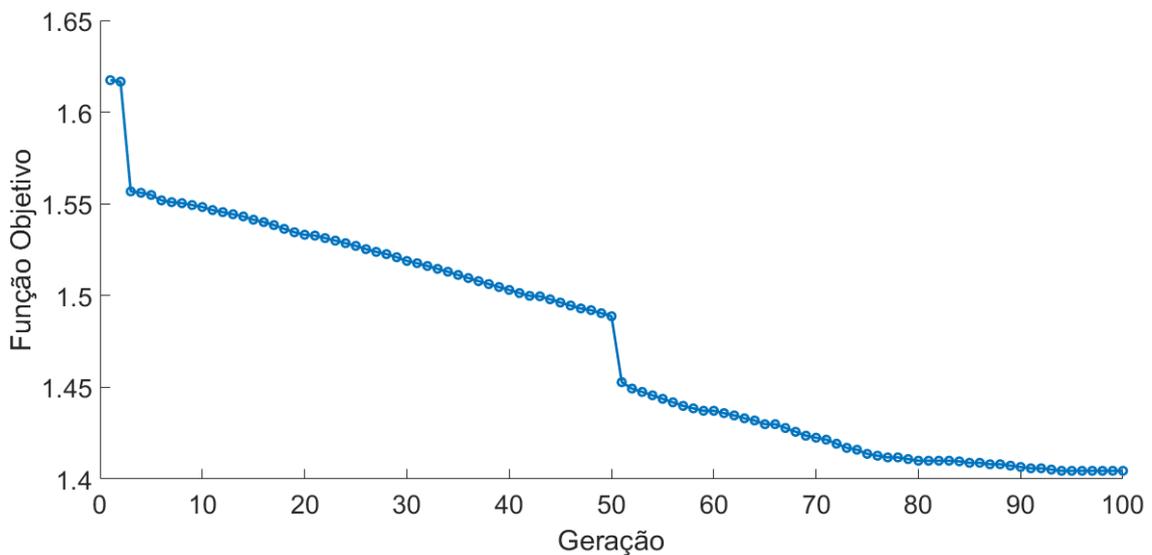


Figura 24 – Evolução da Função Objetivo

Através do ajuste dos parâmetros nos valores da tabela anterior, a dinâmica de busca da resposta pode ser observada na figura (24).

É mostrado como a variação da função objetivo é modificada em cada geração do algoritmo do SIA, até a convergência, obtida na geração de número '100', conforme critério de convergência adotado. Com estes valores, o conversor bidirecional é montado, apresentado de forma completa na figura (25).

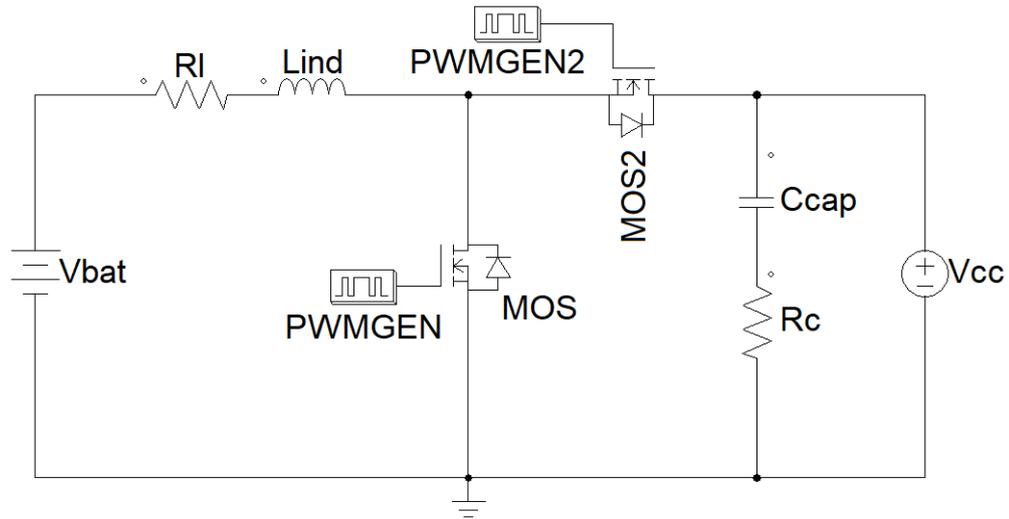


Figura 25 – Sistema Completo Representativo do conversor Bidirecional e do Complexo de Baterias

### 5.1 Análise do impacto dos controladores projetados

O impacto do uso dos compensadores nas malhas de controle construídas é visto nos diagramas de Bode, a seguir assinalados.

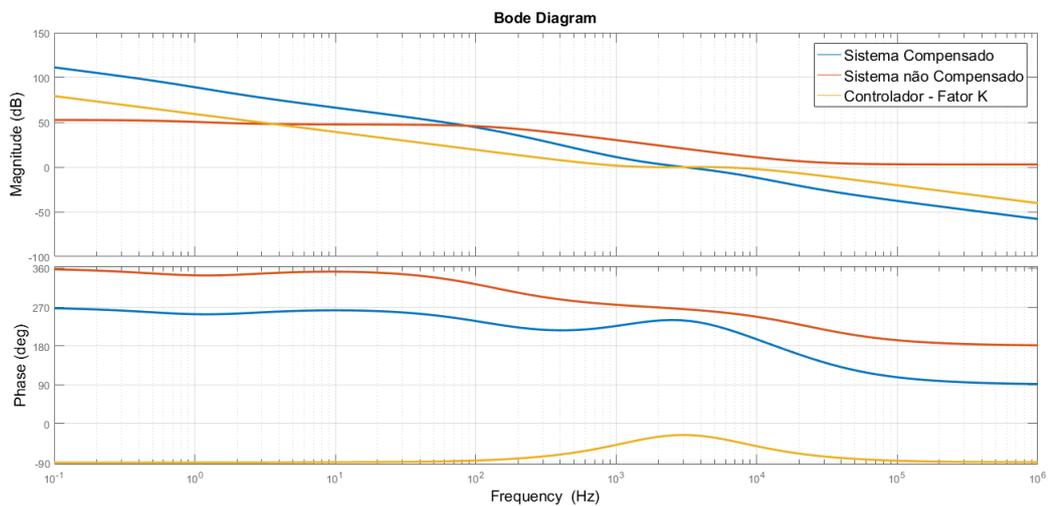


Figura 26 – Diagrama de Bode do conversor boost

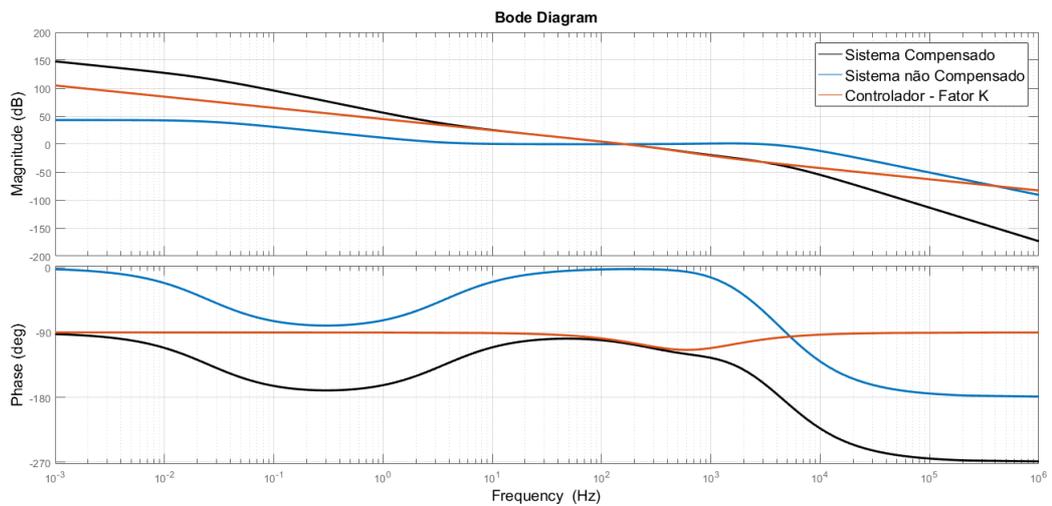


Figura 27 – Diagrama de Bode do conversor buck - Malha completa

Na tabela (6), são demonstradas as margens de estabilidade nos dois modos de operação do conversor bidirecional. Nela, são observadas tanto as de fase quanto as de módulo. Como é definido pelo método do fator k, arbitra-se a margem de fase, além de se conseguir uma melhoria para os ganhos para baixas frequências.

Tabela 6 – Margens de estabilidade

<b>Tipo de Margem</b>	<b>Valor</b>
Boost-Magnitude	15.8 dB
Boost-Fase	59°
Buck-Magnitude	37.7 dB
Buck-Fase	75.1°

## 5.2 Análise da dinâmica dos compensadores calculados

Para o conversor do tipo elevador, é apresentado a seguir o comportamento do sistema junto com a referência de tensão prevista.

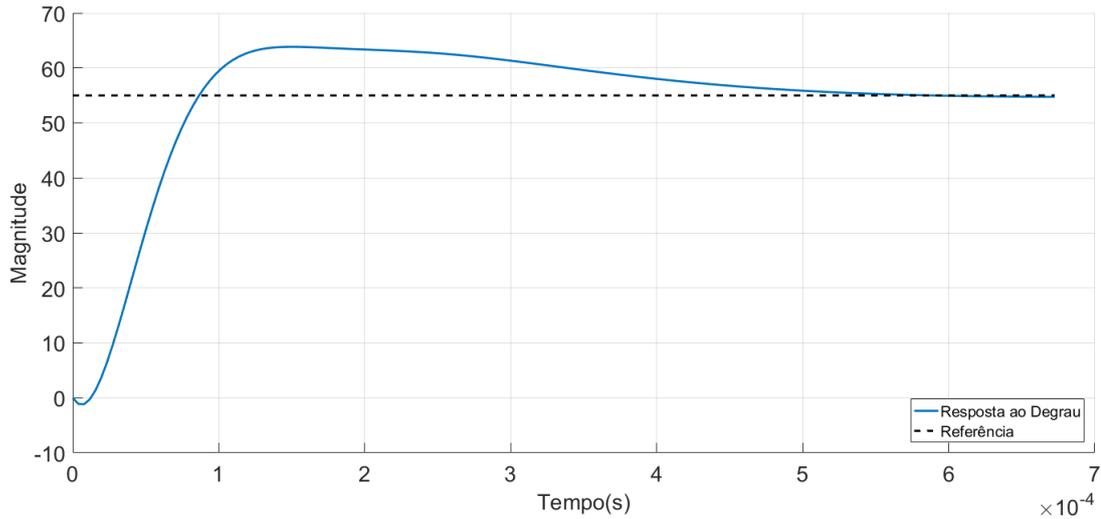


Figura 28 – Degrau aplicado ao conversor boost

É observado que a dinâmica é validada, pois a referência é seguida com um baixo *overshoot* e tempos de subida e de acomodação. Com a finalidade de demonstrar a ação do compensador, é adicionado um distúrbio no sistema, no valor de 8,25V.

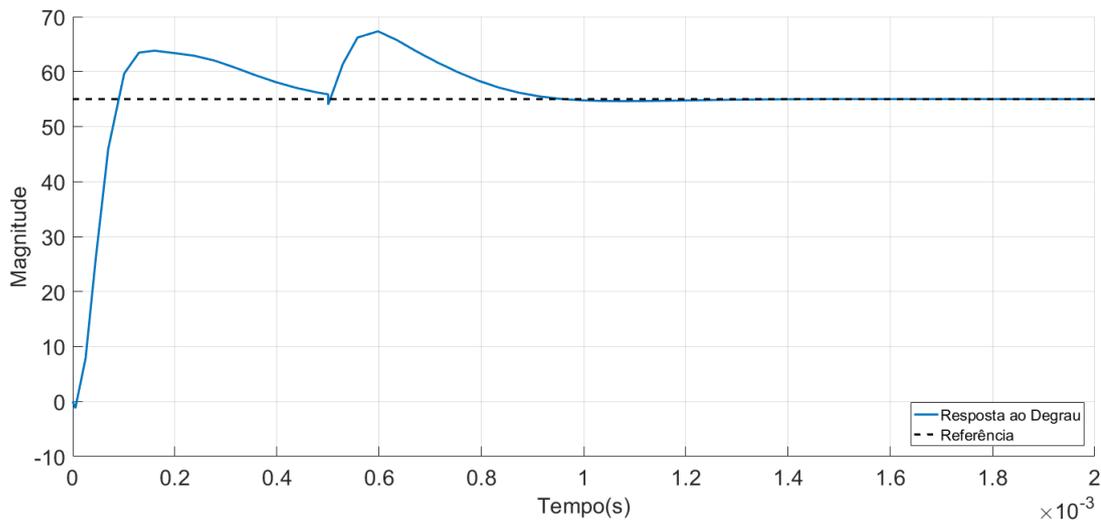


Figura 29 – Dinâmica do Conversor Boost, aplicado um distúrbio no sistema

O gráfico presente na figura (29) mostra a ação do compensador junto ao sistema do conversor elevador boost. É observado que mesmo após a inserção de um distúrbio de valor elevado, o sistema mantém a referência em regime.

Para o conversor do tipo abaixador, por possuir duas malhas de controle, são apresentados a seguir o comportamento junto ao *step* como referência e à introdução de distúrbios para análise da dinâmica dos compensadores.

A representação do comportamento da malha interna de corrente logo após a inserção de um distúrbio no valor de 0,3A junto à referência de 0,47A, é apresentada na figura (31).

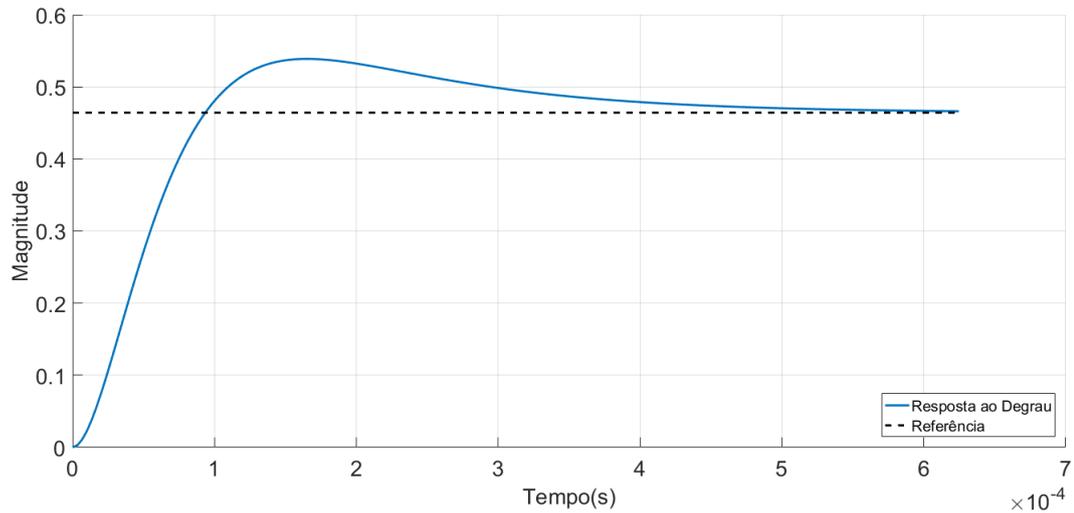


Figura 30 – Degrau aplicado à malha interna do conversor Buck

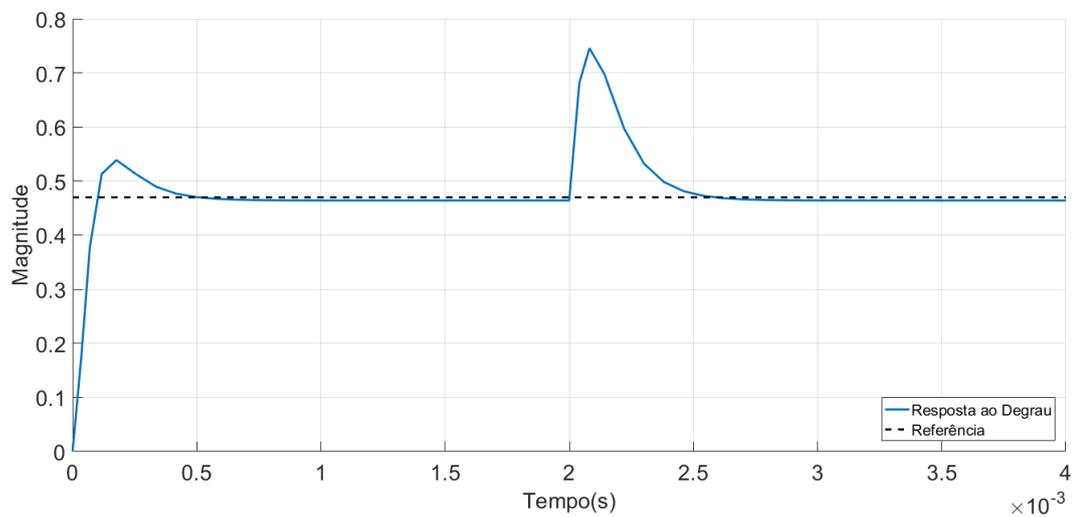


Figura 31 – Dinâmica na malha interna do Conversor Buck, aplicando um distúrbio no sistema

A análise é descrita a seguir também para a malha externa de tensão.

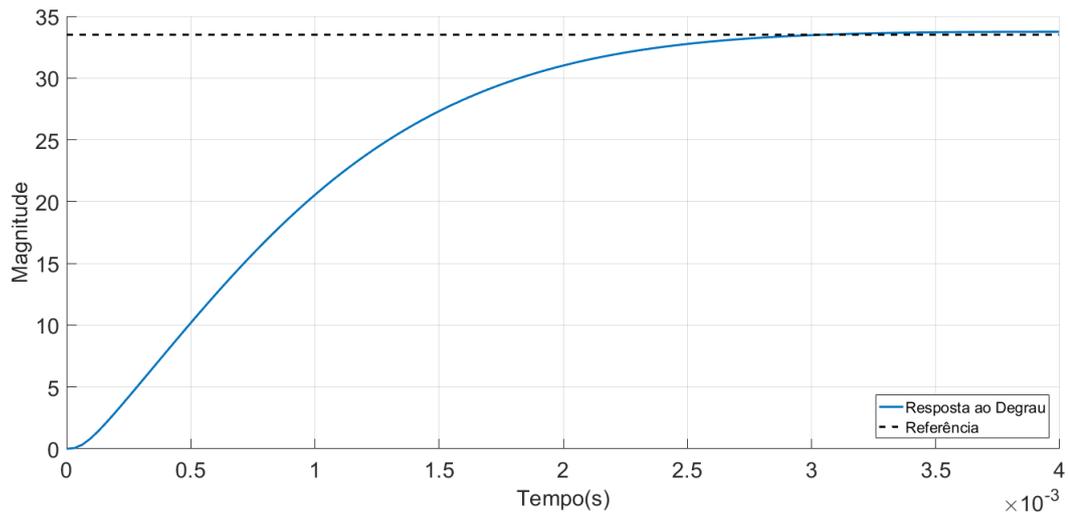


Figura 32 – Degrau aplicado à malha externa do conversor Buck

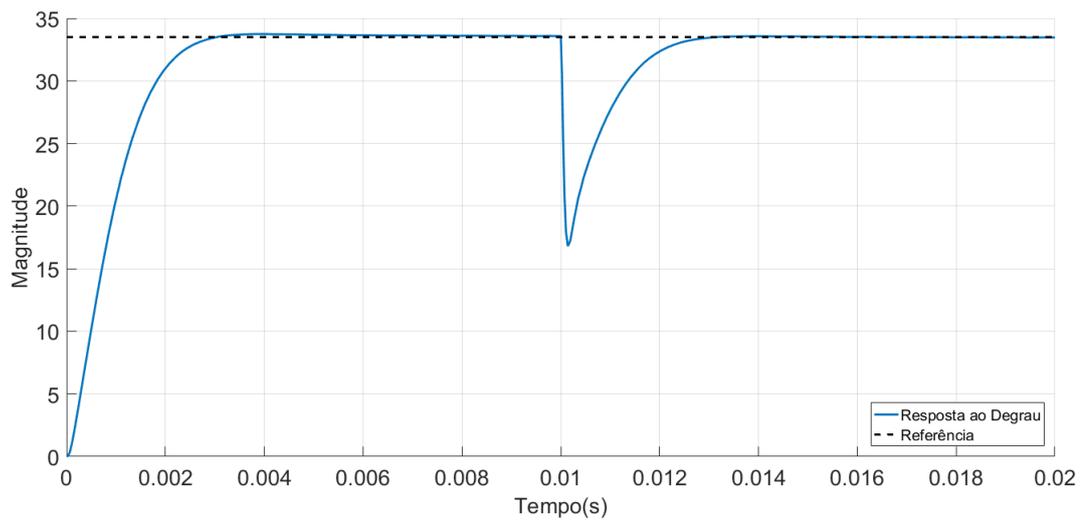


Figura 33 – Dinâmica na malha externa do Conversor Buck, aplicado um distúrbio no sistema no valor de 15V

Com este modelo e os parâmetros físicos obtidos, é utilizado o software MATLAB<sup>®</sup> Simulink para a verificação do comportamento do sistema de armazenamento de energia nos procedimentos de carga e de descarga.

Para a simulação que conecta os valores obtidos pelo processo de otimização adotado, emprega-se o modelo de bateria presente no Simulink. Ele consiste em um bloco no qual se determina parâmetros de funcionamento, como a temperatura de operação, SOC inicial, tipo de bateria utilizada, além de outras variáveis de trabalho.

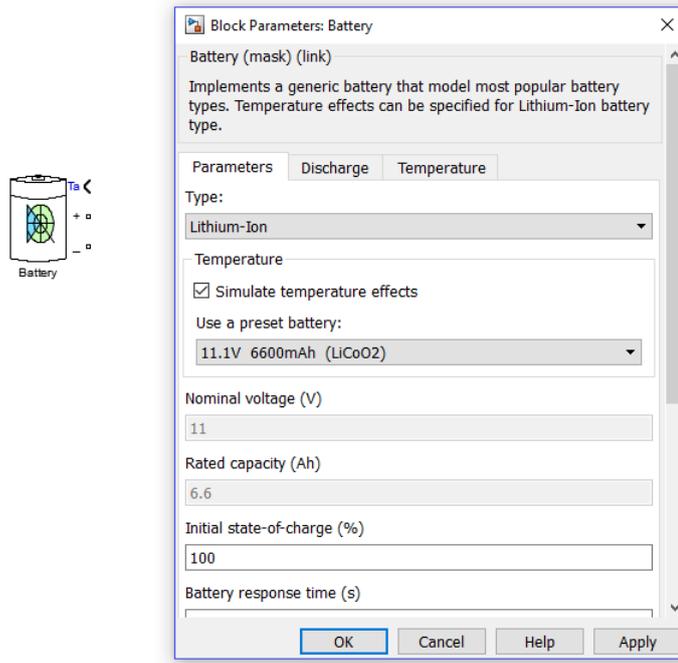


Figura 34 – Modelo de Baterias presente no MATLAB<sup>®</sup> Simulink

Assim, o sistema é dado de forma completa a seguir, na figura (35): o circuito do conversor bidirecional e o banco de baterias utilizado.

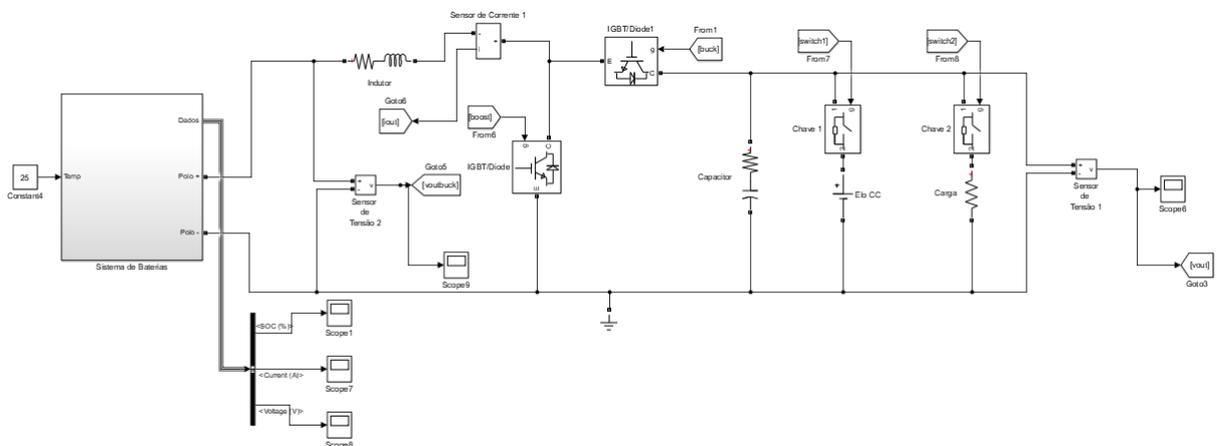


Figura 35 – Modelo Completo do conversor Bidirecional junto ao Sistema de Baterias

O diagrama apresentado na figura (35) mostra o sistema montado no MATLAB<sup>®</sup> Simulink para verificar os resultados obtidos. As chaves *switch1* e *switch2* são as saídas do algoritmo responsável em analisar em qual período de operação o sistema está funcionando, se está em carga ou em descarga. No bloco *Banco de Baterias*, são utilizadas três módulos de bateria, conectados em série, do tipo  $LiCoO_2$ , 11,1V e 6600mAh.

Como o sistema é pequeno para trabalhar com este complexo de baterias, o processo de carga é lento, devido sobretudo à baixa corrente entregue. Entretanto, para verificar a variação do SOC, são adicionados capacitores em paralelo para injetar uma quantidade significativa de potência ao sistema de armazenamento, observado na figura (36).

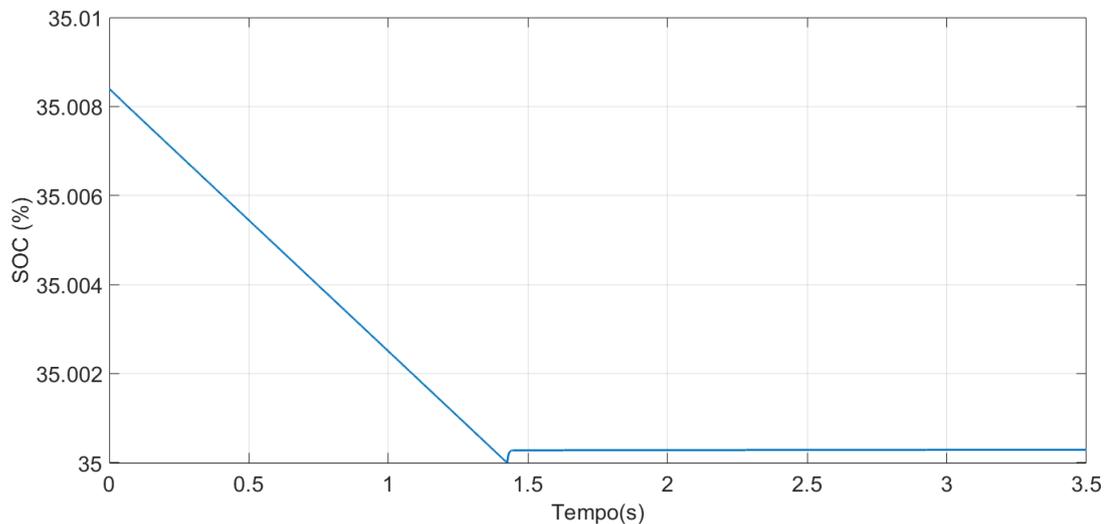


Figura 36 – Evolução do SOC para corrente elevada de entrada na no sistema de Armazenamento de Energia

Assim, para avaliar a variação do estado operacional do sistema, é definido que a partir de um SOC menor que 35%, valor mínimo de operação de uma célula de Lítio-Íon para trabalho, o sistema deve carregar a bateria para que ela possa ser reutilizada. A figura (37) mostra o comportamento da corrente, ao efetuar a troca do estado operacional.

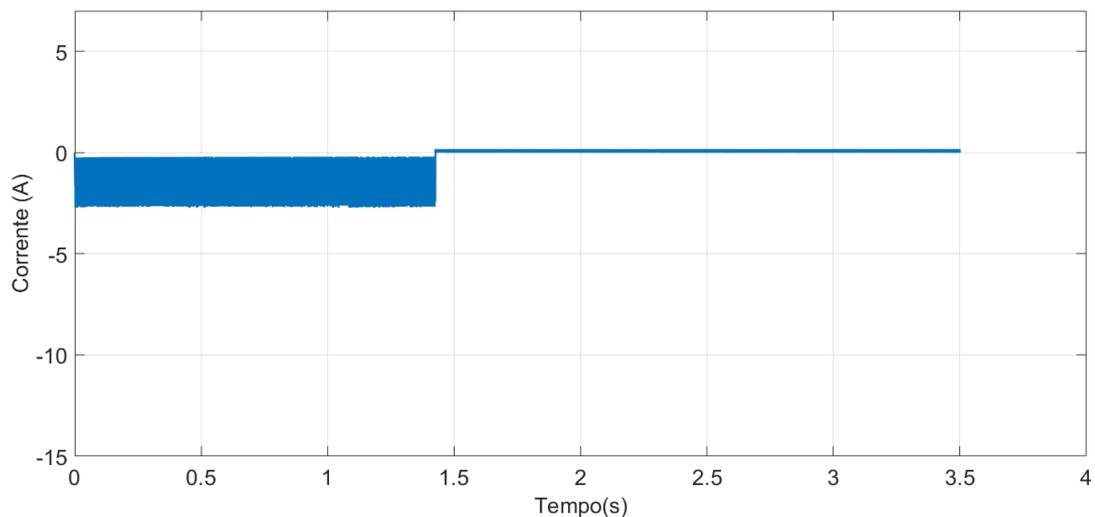


Figura 37 – Comportamento da corrente ao mudar do estado de descarga para carga

Neste caso, ocorre a variação de sentido, quando a bateria deixa de operar no modo descarga para o de carregamento. Os valores obtidos são relativamente pequenos devido sobretudo ao baixo valor de tensão utilizado para o sistema de baterias empregado.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia para a definição de valores ótimos para a construção de um conversor bidirecional buck-boost aplicado na operação de sistema de armazenamento à base de baterias. Esta metodologia é inovadora, não tendo sido encontrada similar na literatura, o que contribui para o estado da arte sobre definição de controles para sistemas de armazenamento.

A metodologia baseia-se na aplicação de uma técnica meta-heurística para tratamento da natureza discreta do problema de otimização, haja vista a necessidade de definição de parâmetros dentro de uma faixa de valores discretizados disponíveis no mercado. Mais especificamente, a técnica proposta é bioinspirada no sistema imune natural adaptativo presente em mamíferos, denominada Sistema Imunológico Artificial. Esta escolha deveu-se à aplicação prévia bem-sucedida desta técnica a outros problemas envolvendo sistemas elétricos de potência e sistemas de energia elétrica.

O valor final é colocado como passo inicial para o uso dessa metodologia junto à eletrônica de potência. Os resultados obtidos foram satisfatórios em termos de aproximação da resposta do conversor ao comportamento ideal esperado. Para tanto, variáveis de decisão foram definidas para minimização, numa abordagem que converte o problema multi-objetivo, considerando seus diferentes requisitos operacionais, em um problema mono-objetivo pela introdução de ponderações para cada requisito. Estas ponderações foram definidas com base em conhecimento prévio sobre o comportamento esperado dos conversores, além da importância de cada parâmetro para este comportamento.

Adicionalmente, o uso da ferramenta de otimização proposta pode ser aplicado em diversas áreas, de acordo com a modelagem do problema e a função objetivo em que se deseja minimizar mediante as variáveis de decisão. A metodologia é empregada em um problema atual, pois além de minimizar os valores físicos e de controle, ela pode ser utilizada para reduzir perdas e melhorar a presença de componentes harmônicas no sistema.

Portanto, como conclusões finais, pôde-se depreender a potencialidade da aplicação de otimização a questões envolvendo sistemas de potência e energia, como o problema de controle de carga e descarga de baterias, com interface com eletrônica de potência. Esta potencialidade aponta para uma nova tendência de investigação haja vista sua confirmação através dos resultados, com abertura de novas possíveis linhas de pesquisa no campo do conhecimento.

## 6.1 Trabalhos Futuros

No cenário atual, a demanda pelo uso de energia renováveis com o amparo de sistemas para armazenamento de energia está cada vez mais em foco. Logo, algumas possibilidades para avançar com o estudo deste trabalho são:

1. inserção de gerações no elo de corrente contínua, como solar fotovoltaica, eólica e oceânica;
2. emprego de técnicas de controle mais aprimoradas, como o uso de realimentação de estados e discretização de controladores; e
3. uso de inversores de frequência para fazer a ligação do sistema à rede de distribuição ou de transmissão.

## REFERÊNCIAS

- [1] Sanath Alahakoon, “Significance of Energy Storages in Future Power Networks”, *Energy Procedia*, Volume 110, 2017, Pages 14-19.
- [2] Pandya MH, Aware MV. “Enhancing the distribution feeder capacity through energy storage”. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) 2013*; Cape Town: pp. 1739-.
- [3] Fauci RL, Heimbach B, Mangani M, Luternauer H, Bader J, Küng L. “Investigating Applications of Energy Storages for the Integration of Renewables in the Distribution Grid — View from a Distribution Grid Operator”. *Integration of Renewables into the Distribution Grid-CIRED workshop 2012*; Lisbon, pp 1-4.
- [4] D Sutanto, W.R Lachs, “Battery energy storage systems for sustainable energy development in Asia”, *Electric Power Systems Research*, Volume 44, Issue 1, 1998, Pages 61-67.
- [5] R. S. Bhatia, S. P. Jain, Dinesh Kumar Jain and B. Singh, "Battery Energy Storage System for Power Conditioning of Renewable Energy Sources," 2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems, Kuala Lumpur, 2005, pp. 501-506.
- [6] S. R. Cikanek and K. E. Bailey, "Regenerative braking system for a hybrid electric vehicle," *Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No.CH37301)*, Anchorage, AK, USA, 2002, pp. 3129-3134 vol.4.
- [7] IEEE Virtual Museum, “The Battery: Using Chemistry to Make Energy”. Disponível em: <<http://www.ieee-virtual-museum.org/collection/tech.php?id=2345793>>. Acesso em: 16 de novembro de 2017.
- [8] IEEE History Center, “Milestones : Volta’s Electrical Battery Invention, 1799”. Disponível em: [http://ethw.org/Milestones:Volta%27s\\_Electrical\\_Battery\\_Invention,\\_1799](http://ethw.org/Milestones:Volta%27s_Electrical_Battery_Invention,_1799). Acesso em: 16 de novembro de 2017.
- [9] D. Linden, T. B. Reddy, "Handbook of batteries", third edition, McGraw-Hill Handbooks.
- [10] M. Wakihara, O. Yamamoto, "Lithium Ion Batteries - Fundamental and Performance", Wiley.
- [11] L. W. Oliveira, E. J. Oliveira, F. V. Gomes, Silva Jr. I. C., A. L. M. Marcato, and P. V. C. Resende, "Artificial immune systems applied to the reconfiguration of electrical power distribution network for energy loss minimization," *Int. J. Electr. Power Energy Systems*, vol. 56, pp. 64-74, Mar.2014.
- [12] L. N. Castro and F. J. V. Zuben, “Learning and Optimization Using the Clonal Selection Principle,” *IEEE Trans Evol Comput*, vol. 6, no. 3, pp. 239-51, 2002.
- [13] Hsiao, Y.-T., Chuang, C.-L. and Chien, C.-C. (2004). Ant colony optimization for designing of PID controllers. In: 2004 IEEE Int. Symp. Comp. Aided Contr. Syst. Des., pp.321-326.

- [14] R. D. Middlebrook and S. Cuk, "A general unified approach to modelling switching-converter power stages," 1976 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Cleveland, OH, 1976, pp. 18-34.
- [15] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3rd Edition, October 2002.
- [16] Candiá Júnior, Antônio. Alocação Ótima de Dispositivos de Manobra e Proteção para Planejamento de Sistemas de Distribuição. / Antônio Candiá Júnior - 2016.
- [17] VIDAL, P.H.D; dos SANTOS, A.L.M; OLIVEIRA, L. W.; de OLIVEIRA J.G. "Controle Dinâmico de Descarga de Baterias Através de Sistema Imunológico Artificial" Controle Dinâmico de Descarga de Baterias Através de Sistema Imunológico Artificial". In 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission (CLAGTEE 2017), 2017, Mar del Plata, ARG.
- [18] K Warwick (1996). An introduction to control systems (Second ed.). Singapore: World Scientific. Chapter 5, pp. 137–196.
- [19] J. A. Pomilio, "Fontes chaveadas, UNICAMP". Disponível em: <[www.dsce.fee.unicamp.br/antenor](http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor)> Acesso em: 16 de novembro de 2017.
- [20] I. Barbi, D. C. Martins. Conversores CC-CC Básicos Não Isolados. Florianópolis: ed. dos autores, 2000. CDU: 621.314.22.
- [21] K. Ogata, Modern Control Engineering, NJ, Englewood Cliffs:Prentice-Hall, 1970.
- [22] K. Ogata, Modern Control Engineering, NJ, Englewood Cliffs:Prentice-Hall, 1990.
- [23] Rosembach, Ricardo Henrique. Conversor CC-CC Bidirecional Buck-Boost atuando como Controlador de Carga de Baterias em um Sistema Fotovoltaico / Ricardo Henrique Rosembach - 2004.
- [24] Seguel, Julio Igor López, "Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital" / Julio Igor López Seguel. –Belo Horizonte, MG: [s.n.], 2009.
- [25] K. M. Tsang and W. L. Chan, "Cascade controller for DC/DC buck convertor," in IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 152, no. 4, pp. 827-831, 8 July 2005.
- [26] Zhong Wu, Jianhui Zhao and Jiyang Zhang, "Cascade PID Control of Buck-Boost-Type DC/DC Power Converters," 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, 2006, pp. 8467-8471.
- [27] Ferreira, André Augusto, "Sistema supervisorio de gestão de múltiplas fontes de suprimento para aplicações em veículos elétricos" / André Augusto Ferreira. –Campinas, SP: [s.n.], 2007.
- [28] H. D. Venable: "The k-factor: A New Mathematical Tool for Stability Analysis and Synthesis", Proc. of Powercon 10, March 22-24, 1983, San Diego, USA.
- [29] A. Vangari, D. Haribabu and J. N. Sakamuri, "Modeling and control of DC/DC boost converter using K-factor control for MPPT of solar PV system," 2015 International Conference on Energy Economics and Environment (ICEEE), Noida, 2015, pp. 1-6.

- [30] A. Ghosh, S. Banerjee, M. K. Sarkar and P. Dutta, "Design and implementation of type-II and type-III controller for DC–DC switched-mode boost converter by using K-factor approach and optimisation techniques,"in IET Power Electronics, vol. 9, no. 5, pp. 938-950, 4 20 2016.

## ANEXO A – Código utilizado MATLAB Simulink

### A.1 Modelo do Buck

```

close all;

clc;

[R,C,L,Fase,Km,Ks] = leitura_SIA (RESULT);

Vin = 55;

Vout = 33;

D = Vout/Vin;

Rse = 0.5;

Rl = 0.05;

H1s = 0.1;

H2s = 0.2;

Func_PWM = 0.1;

Gids = tf([(C*R*Vin + Rse*C*Vin) Vin],[L*C*(R+
Rse) (Rl*C*R+Rl*C*Rse + R*C*Rse + L) (R+Rl)]);

Gois = tf([Rse*C*R R],[ (R+Rse)*C 1]);

fr_hz = 30e3;

fr_hz = fr_hz/10;

[ganho_uni_i,fase_sys_i] = bode(Gids*H1s*
Func_PWM,fr_hz*2*pi);

```

```

ganho_db_i = 20*log10(ganho_uni_i);

ganho_sys_comp_db_i = 10^(-ganho_db_i/20);

marg_fase_sys_i = 60;

alfa_i = marg_fase_sys_i - fase_sys_i - 90;

fator_k_i = tand(alfa_i/2 + 45);

R1_i = 10e3;

C2_i = 1/(2*pi*fr_hz*ganho_sys_comp_db_i*
        fator_k_i*R1_i);

C1_i = C2_i * (fator_k_i^2-1);

R2_i = fator_k_i/(2*pi*fr_hz*C1_i);

control_i = tf([C1_i*R2_i 1],[R1_i*R2_i*C1_i*
        C2_i R1_i*(C1_i+C2_i) 0]);

MA_corrente = Gids * Func_PWM * control_i;

MF_corrente = feedback(Gids * Func_PWM *
        control_i, H1s);

Gvoi = minreal(MF_corrente * Gois);

[ganho_uni_v, fase_sys_v] = bode(Gvoi, fr_hz*2*pi
        /5);

ganho_db_v = 20*log10(ganho_uni_v);

ganho_sys_comp_db_v = 10^(-ganho_db_v/20);

marg_fase_sys_v = 60;

alfa_v = marg_fase_sys_v - fase_sys_v - 90;

```

```

fator_k_v = tand(alfa_v/2 + 45);

R1_v = 10e3;

C2_v = 1/(2*pi*fr_hz/5*ganho_sys_comp_db_v*
    fator_k_v*R1_v);

C1_v = C2_v * (fator_k_v^2-1);

R2_v = fator_k_v/(2*pi*fr_hz/5*C1_v);

control_v = tf([C1_v*R2_v 1],[R1_v*R2_v*C1_v*
    C2_v R1_v*(C1_v+C2_v) 0]);

[numc,denc] = tfdata(control_i);
numbuck1 = numc{1};
denbuck1 = denc{1};

[numc2,denc2] = tfdata(control_v);
numbuck2 = numc2{1};
denbuck2 = denc2{1};

[nums,dens] = tfdata(Gids);
nums = nums{1};
dens = dens{1};

[nums2,dens2] = tfdata(Gois);
nums2 = nums2{1};
dens2 = dens2{1};

opt = stepDataOptions('StepAmplitude',Vout*H1s/R
    );

[y,t] = step(MF_corrente,opt);

iref = Vout/R * ones(1,size((y),1));

figure('color',[1 1 1])

```

```

set(gca, 'FontSize', 20)

set(gca, 'LooseInset', get(gca, 'TightInset'))
xlabel('Tempo(s)', 'FontSize', 20)

ylabel('Magnitude', 'FontSize', 20)
hold on

plot(t, y, t, iref, 'k—')

grid on

set(gca, 'FontSize', 20)

xlabel('Tempo(s)', 'FontSize', 20)

ylabel('Magnitude', 'FontSize', 20)

lege.FontSize = 14;

opts = bodeoptions('cstprefs');

opts.FreqUnits = 'Hz';
opts.Grid = 'On';

MA_corrente_n_comp = Gids * H1s * Func_PWM;

figure('color', [1 1 1])
set(gca, 'FontSize', 20)

set(gca, 'LooseInset', get(gca, 'TightInset'))
xlabel('Tempo(s)', 'FontSize', 20)

ylabel('Magnitude', 'FontSize', 20)
bodeplot(MA_corrente, MA_corrente_n_comp,
         control_i, opts)

set(findall(gcf, 'Type', 'line'), 'LineWidth', 2)

```

```
set(findall(gcf,'Type','text'),'FontSize',14)
```

```
axes_handles = findall(gcf, 'type', 'axes');
```

```
lege.FontSize = 14;
```

```
sim('blocos_bucki.slx');
```

```
t = disturbio.time;
```

```
y = disturbio.signals.values;
```

```
vref = 0.47 * ones(1, size((y),1));
```

```
figure('color',[1 1 1])
```

```
set(gca,'FontSize',20)
```

```
set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
```

```
xlabel('Tempo(s)','FontSize',20)
```

```
ylabel('Magnitude','FontSize',20)
```

```
hold on
```

```
grid on
```

```
plot(t,y,t,vref,'k—')
```

```
lege.FontSize = 14;
```

```
MA_tensao = control_v * Gvoi * H2s;
```

```
MA_tensao_n_comp = Gvoi*H2s;
```

```
MF_tensao = (control_v * Gvoi)/(1 + MA_tensao);
```

```
figure('color',[1 1 1])
```

```
set(gca,'FontSize',20)
```

```
set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
```

```
xlabel('Tempo(s)','FontSize',20)
```

```

ylabel( 'Magnitude', 'FontSize',20)
bodeplot(MA_tensao, 'k',MA_tensao_n_comp,
         control_v ,opts)

set( findall(gcf, 'Type', 'line'), 'LineWidth',2)

set( findall(gcf, 'Type', 'text'), 'FontSize',14)

axes_handles = findall(gcf, 'type', 'axes');

lege.FontSize = 14;

opt = stepDataOptions( 'StepAmplitude',Vout*H2s);

[y,t] = step(MF_tensao,opt);

vref = 33.5 * ones(1, size((y),1));

figure( 'color',[1 1 1])
set(gca, 'FontSize',20)

set(gca, 'LooseInset',get(gca, 'TightInset'))
xlabel( 'Tempo(s)', 'FontSize',20)

ylabel( 'Magnitude', 'FontSize',20)
hold on

plot(t,y,t,vref, 'k—')

grid on

set(gca, 'FontSize',20)

xlabel( 'Tempo(s)', 'FontSize',20)

ylabel( 'Magnitude', 'FontSize',20)

lege.FontSize = 14;

```

```

sim('blocos_buckv.slx');

t = disturbio.time;

y = disturbio.signals.values;

vref = 33.5 * ones(1, size((y),1));

figure('color',[1 1 1])

set(gca,'FontSize',20)

set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
xlabel('Tempo(s)','FontSize',20)

ylabel('Magnitude','FontSize',20)

hold on
grid on
plot(t,y,t,vref,'k—')

lege.FontSize = 14;

```

,

## A.2 Modelo do Boost

```

[R,C,L,Fase,Km,Ks] = leitura_SIA(RESULT);

close all;

clc;

rl = 0.05;

rc = 0.5;

syms s

Vbb = 33;

```

$$V_{out\_b} = 55;$$

$$D = 1 - V_{bb}/V_{out\_b};$$

$$V_{cc} = V_{bb};$$

$$a1 = -V_{bb} * r_c * R * L * C;$$

$$a2 = V_{bb} * (r_c * C * R^2 - r_c * L * R * L - 2 * r_c * C * R^2 * D^2 + D^2 * r_c * C * R^2 - r_c * r_l * C * R);$$

$$a3 = V_{bb} * (D^2 * r_c * R - 2 * D * r_c * R - r_l * R + r_c * R + R^2 - 2 * R^2 * D + R^2 * D^2 - r_c * r_l);$$

$$b1 = (r_c + r_l - D * r_c * R + R - 2 * R * D + R * D^2) * R * L * C;$$

$$b2 = (r_c + r_l - D * r_c * R + R - 2 * R * D + R * D^2) * (L + r_c * C * R + r_l * C * R - D * r_c * C * R);$$

$$b3 = (r_c + r_l - D * r_c * R + R - 2 * R * D + R * D^2)^2;$$

$$\text{systema} = \text{tf}([a1 \ a2 \ a3], [b1 \ b2 \ b3]);$$

$$f = 30e3;$$

$$f_{r\_hz} = f / 10;$$

$$[\text{ganho\_uni}, \text{fase\_sys}] = \text{bode}(\text{systema}, f_{r\_hz} * 2 * \pi);$$

$$\text{ganho\_db} = 20 * \log_{10}(\text{ganho\_uni});$$

$$\text{marg\_fase\_sys} = \text{Fase};$$

$$\text{alfa} = 360 + \text{marg\_fase\_sys} - \text{fase\_sys} - 90;$$

$$\text{fator\_k} = (\text{tand}(\text{alfa} / 4 + 45))^2;$$

$$R1 = 100e3;$$

```

C2 = (ganho_uni*Ks*Km)/(R1*fr_hz*2*pi);

C1 = C2 * (fator_k-1);

R2 = sqrt(fator_k)/(2*pi*fr_hz*C1);

R3 = R1/(fator_k-1);

C3 = 1/(R3*fr_hz*2*pi*sqrt(fator_k));

A = (C1*R2)/(R1*R3*C2*C3);

wz = fr_hz*2*pi/sqrt(fator_k);

wp = sqrt(fator_k)*fr_hz*2*pi;

zero = [-wz -wz];

polo = [-wp -wp 0];

control = zpk(zero , polo ,A);

opt = stepDataOptions('StepAmplitude',Vout_b*Ks)
    ;

[y,t] = step(feedback(control*istema*Km,Ks),opt
    );

vref = Vout_b * ones(1,size((y),1));

figure('color',[1 1 1])
set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
hold on

plot(t,y,t,vref,'k—')

grid on

```

```

set(gca, 'FontSize', 20)

xlabel('Tempo(s)', 'FontSize', 20)

ylabel('Magnitude', 'FontSize', 20)

lege.FontSize = 14;

MA = control*система*Ks*Km;

opts = bodeoptions('cstprefs');

opts.FreqUnits = 'Hz';

opts.Grid = 'On';

figure('color', [1 1 1])
set(gca, 'FontSize', 20)

set(gca, 'LooseInset', get(gca, 'TightInset'))
xlabel('Tempo(s)', 'FontSize', 20)

ylabel('Magnitude', 'FontSize', 20)
bodeplot(MA, система, control, opts)

set(findall(gcf, 'Type', 'line'), 'LineWidth', 2)

set(findall(gcf, 'Type', 'text'), 'FontSize', 14)

axes_handles = findall(gcf, 'type', 'axes');

lege.FontSize = 14;

[numc, denc] = tfdata(control);
numboost1 = numc{1};
denboost1 = denc{1};

[nums, dens] = tfdata(система);
nums = nums{1};

```

```
dens = dens{1};

sim('blocos_boost.slx')

t = disturbio.time;

y = disturbio.signals.values;

vref = Vout_b * ones(1, size((y),1));

figure('color',[1 1 1])

set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
hold on

plot(t,y,t,vref,'k—')

grid on

set(gca,'FontSize',20)

xlabel('Tempo(s)','FontSize',20)

ylabel('Magnitude','FontSize',20)

lege.FontSize = 14;
```