

**REDE DOCTUM DE ENSINO  
FACULDADES INTEGRADAS DE CARATINGA**

**RANGEL TEODORO MIRANDA**

**SUPERVISÓRIO DIDÁTICO COM APLICAÇÃO A CONVERSORES CHOPPERS**

**CARATINGA**

**2018**

**REDE DOCTUM DE ENSINO  
FACULDADES INTEGRADAS DE CARATINGA**

**RANGEL TEODORO MIRANDA**

**SUPERVISÓRIO DIDÁTICO COM APLICAÇÃO A CONVERSORES CHOPPERS**

**Trabalho de Conclusão de curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Elétrica da Faculdade Integradas de  
Caratinga, como requisito parcial à  
obtenção de título de Bacharel em  
Engenharia Elétrica**

**Área de concentração: Novas  
tecnologias.**

**Orientador: Prof. Guilherme Cassimiro  
Araújo Borges.**

**CARATINGA**

**2018**

**TERMO DE APROVAÇÃO COM RESTRIÇÃO**

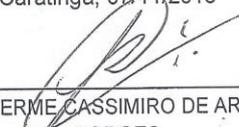
**RANGEL TEODORO MIRANDA**

A aprovação do(s) aluno(s) fica condicionada à apresentação ao professor orientador, das alterações solicitadas pelos avaliadores através das versões corrigidas que passam a fazer parte deste termo, ou as elencadas ao final do mesmo.

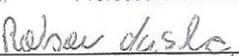
As alterações devem ser apresentadas em versão definitiva no prazo de três dias corridos a contar dessa data, conforme o disposto nas Normas de TCC da Instituição.

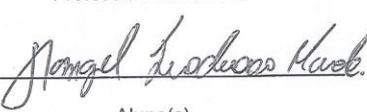
A aprovação final fica condicionada ao parecer favorável emitido pelo professor orientador.

Caratinga, 07/11/2018

  
\_\_\_\_\_  
GUILHERME CASSIMIRO DE ARAÚJO  
BORGES  
Professor Orientador e Presidente da Banca

  
\_\_\_\_\_  
RICARDO BOTELHO CAMPOS  
Professor Avaliador 1

  
\_\_\_\_\_  
ROBSON DA SILVA  
Professor Avaliador 2

  
\_\_\_\_\_  
Aluno(s)

**CORREÇÕES A SEREM FEITAS E PARECER FINAL  
ALTERAÇÕES NECESSÁRIAS APONTADAS PELA BANCA:**

*Corrigir conforme as solicitações dos trabalhos devolvidos.*

PARECER FINAL DO ORIENTADOR:

DATA: 07/11/2018 Assinatura do Professor Orientador:

## **AGRADECIMENTOS**

A minha amada esposa, aos meus pais e minhas irmãs pelo incentivo e apoio, sem os quais teria sido impossível alcançar meus objetivos, incluindo a realização deste trabalho.

Aos amigos e aos colegas da Engenharia Elétrica pelo companheirismo em todos os momentos e auxílio nas atividades da graduação.

Ao meu orientador, pelo auxílio e tempo dedicado.

À Rede Doctum - Caratinga pela oportunidade de estudar numa grande instituição de ensino. A todos os professores, pelos conhecimentos transmitidos e por servirem de inspiração.

A todas as pessoas que, de alguma forma ou outra, contribuíram para minha evolução pessoal e intelectual.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Forma simples de um conversor CC-CC e sua forma de onda.....	14
Figura 2 - Diagrama elétrico do Conversor Buck .....	15
Figura 3 - Diagrama elétrico do Conversor Boost .....	16
Figura 4 - Diagrama elétrico do Conversor Buck - Boost .....	16
Figura 5 - Janela de trabalho do GUI .....	21
Figura 6 - Diagrama em blocos do Controlador PID .....	23
Figura 7 - Diagrama do Conversor Buck.....	25
Figura 8 - Diagrama do controlador PID para Conversor Buck .....	26
Figura 9 - Diagrama do conversor Buck com Controlador PID .....	26
Figura 10 - Simulação do Conversor Buck.....	27
Figura 11 - Simulação do Conversor Buck com Controlador PID .....	28
Figura 12 - Diagrama do Conversor Boost.....	30
Figura 13 - Diagrama do Controlador PID.....	30
Figura 14 - Conversor Boost com Controlador PID.....	31
Figura 15 - Simulação do Conversor Boost.....	32
Figura 16 - Simulação do Conversor Boost com Controlador PID .....	32
Figura 17 - Diagrama do Conversor Buck - Boost Abaixador de tensão .....	34
Figura 18 - Diagrama do Conversor Buck - Boost Elevador de tensão .....	35
Figura 19 - Diagrama do Controlador PID.....	35
Figura 20 - Diagrama do Conversor Buck – Boost Elevador de tensão .....	36
Figura 21 - Diagrama do Conversor Buck – Boost Abaixador de tensão .....	36
Figura 22 - Simulação do Conversor Buck - Boost abaixador de tensão .....	37
Figura 23 - Simulação do Conversor Buck – BoostPID abaixador de tensão .....	38
Figura 24 - <i>Panels</i> utilizados no GUIDE para construção da Interface .....	41
Figura 25 - <i>Panel</i> da construção dos Conversores Choopper.....	41
Figura 26 - <i>Panel</i> da construção dos Componentes Eletrônicos.....	43
Figura 27 - <i>Panel</i> de construção Simulação.....	43
Figura 28 - Interface para simulação dos conversores Choppers .....	44
Figura 29 - Simulação da Interface com Conversor Buck .....	45
Figura 30 - Simulação da Interface com Conversor Boost .....	45
Figura 31 - Simulação da Interface com Conversor Buck - Boost.....	46

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resultado da comparação conversor Buck com Controlador PID .....	29
Gráfico 2 - Resultado da comparação conversor Boost com Controlador PID .....	33
Gráfico 3 - Resultado da comparação Conversor Buck - Boost abaixador de tensão com Controlador PID .....	38

## LISTA DE SIGLAS

CC-CC - Corrente Continua

PID – Proporcional, Integrativo e Derivativo

*GUI – Graphical User Interface*

*GUIDE - Graphical User Interface Development Environment*

R – Resistor

L – Indutor

C – Capacitor

V – Voltage

*CAI - Computer Assisted Instruction*

Gu – Ganho crítico

Pu – Período crítico

H – Unidade de medida Henry

F – Unidade de medida Faraday

Ohm – Unidade de medida Ômicos

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes utilizados para elaboração dos conversores .....	18
Tabela 1 - Componentes utilizados para elaboração dos conversores “ <i>continuação</i> ” ..	19
Tabela 2 - Componentes utilizados para elaboração da Interface .....	21
Tabela 2 - Componentes utilizados para elaboração da Interface “ <i>Continuação</i> ” .....	22
Tabela 3 - Equações de ajustes para Controladores PID .....	24
Tabela 4 - <i>Panels</i> criados para construção do GUI.....	40

## RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de plataforma educacional, com intuito de auxiliar tanto o professor e o aluno na matéria de eletrônica de potência, com assunto específico, portando ele será todo produzido e elaborado no software Matlab, para projeto, simulação e interface dos conversores Choppers (conversor CC-CC), Buck, Boost e Buck – Boost, a escolha do software Matlab, partiu do momento que ele permitirá a troca de conteúdo de entre suas ferramentas, para construção dos circuitos e as simulações, será feita pela ferramenta Simulink, já para a criação da interface será pela ferramenta GUI. As imagens dos resultados obtidos pelas simulações com gráficos no Simulink poderão ser exportadas para a Interface, o professor poderá fazer um planejamento da sua aula através da simulação e expor na Interface, visando uma aula mais dinâmica e produtiva. O layout da Interface é bem simplificado e organizado, de fácil manuseio.

**Palavras Chaves:** Conversores Choopers. Matlab. Interface.

## ABSTRAT

This work describes the development of an educational platform, with the aim of assisting both the teacher and the student in the matter of power electronics, with specific subject matter, with it being all produced and elaborated in the software Matlab, for design, simulation and interface of the Choppers (DC-DC converter), Buck, Boost and Buck-Boost, the choice of Matlab software, started from the moment it will allow the exchange of content between its tools, for circuit construction and simulations, will be made by the Simulink tool, already for the creation of the interface will be by the GUI tool. The images of the results obtained by simulations with graphs in the Simulink can be exported to the Interface, the teacher can make a planning of his class through the simulation and expose in the Interface, aiming a more dynamic and productive class. The interface layout is very simplified and organized, easy to handle.

**Keywords:** Converters Choppers. Matlab. Interface.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>1.1 História</b> .....	13
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
<b>2.1 Conversores Eletrônicos de Potência (Choppers)</b> .....	15
2.1.1 Conversor Buck.....	15
2.1.2 Conversor Boost.....	15
2.1.3 Conversor Buck-Boost .....	16
<b>2.2 Software</b> .....	17
2.2.1 Matlab.....	17
2.2.2 Simulink/Simscape .....	17
2.2.3 Gui.....	20
<b>2.3 Sistema de Controle</b> .....	22
2.3.1 Controlado PID.....	22
<b>3. DESENVOLVIMENTO</b> .....	25
<b>3.1 Conversores Choopers</b> .....	25
3.1.1 Conversor Buck.....	25
3.1.1.1 Conversor Buck controlador PID .....	26
3.1.1.2 Simulação.....	27
3.1.1.3 Resultado .....	28
3.1.2 Conversor Boost.....	29
3.1.2.1 Conversor Boost controlador PID .....	30
3.1.2.2 Simulação.....	31
3.1.2.3 Resultado .....	33
3.1.3 Conversor Buck-Boost .....	33
3.1.3.1 Conversor Buck-Boost controlador PID.....	35
3.1.3.2 Simulação.....	37
3.1.3.3 Resultado .....	38
<b>3.2 Interface</b> .....	39
3.2.1 GUI.....	39
3.2.1.1 Criação da interface .....	39
3.2.1.2 Painel Conversores Chooper .....	41
3.2.1.3 Painel Componente Eletrônicos .....	42
3.2.1.4 Painel Simulação.....	43
3.2.1.5 Interface .....	44
3.2.1.6 Simulação da Interface .....	44
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	47
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	49

## 1. INTRODUÇÃO

Partindo do princípio sobre a introdução de novas tecnologias no ensino, o supervisorio proposto poderá proporcionar uma melhoria na qualidade de aprendizagem do estudante.

Neste contexto esse trabalho consiste em desenvolver um sistema de aprendizagem, um supervisorio didático, que será aplicado sobre controles eletrônicos, o estudante através do supervisorio poderá modelar e verificar sua variação de tensão na saída, através dos conversores Choppers (conversor CC-CC), tanto para abaixador de tensão e elevador de tensão, abordará remos três tipos de conversores CC-CC: Buck, Boost e Buck-Boost, juntamente aos conversores terá um sistema de controle, controlador PID, para isso, planeja se desenvolver o conjunto de circuitos no Matlab, que permitirá a simulação dos conversores, podendo utilizar à interface didática para a escolha de qual conversor o estudante irá ver a simulação na aula prática.

Com embasamento no sistema educacional, foi possível perceber que certas aulas práticas não se têm tanta clareza, pela falta de tempo ou falta de interesse dos estudantes, ao perceber certas dificuldades de aprendizagem em algumas matérias, que são relacionadas em aulas prática, referente a isso surgiu uma possibilidade de elaborar um supervisorio didático, para o auxiliando do estudante no seu processo de aprendizagem, visando o crescimento didático dos mesmos, esse supervisorio facilitará aprendizagem, forçando o estudante a sempre buscar algo mais, com isso o rendimento do mesmo em sala de aula será mais aproveitado. Com tudo será possível criar um supervisorio de didático?

O objetivo proposto para realização do supervisorio é confeccionar uma plataforma de ensino, prática e teste de conversores CC-CC. Para a construção deste supervisorio didático será necessário um amplo conhecimento em eletrônica, programação IDE e conhecimento no software Matlab, nesse caso se utilizará:

- a) Construção do Sistema de conversores e o controlador no Matlab.
- b) Elaboração do supervisorio através do GUI.

### c) Funcionamento dos Sistemas através Simulink.

O texto está organizado da seguinte forma: O Capítulo 2 mostrará os fundamentos da revisão bibliográfica, descrevendo brevemente os conversores de eletrônica de potência (Choppers), sendo eles, Buck, Boost e Buck-Boost, uma pequena introdução ao software Matlab e suas ferramentas a ser utilizadas, como: Simulink e GUI. O sistema de controle será o controlador PID. O Capítulo 3 abordará o desenvolvimento do projeto, começando pela construção de cada conversor no Simulink, para comparação de parâmetros será colocado um controlador PID para cada conversor, gerando gráficos provenientes das simulações para ser alocada na interface do supervisor. Nesse mesmo capítulo também será descrito passo a passo, toda a construção da interface, até a sua finalização. Na última parte será discutida as conclusões que se obteve com o trabalho e sugestões de melhorias futuras.

## 1.1 História

Historicamente em meados das décadas de 70 e 80, com avanço da tecnologia e surgimentos de microprocessadores, o computador se tornou um grande auxílio para o ser humano e passou a ser uma peça chave no setor industrial e no meio acadêmico com isso surgiram os primeiros sistemas supervisórios.

Em motivo de curiosidade o primeiro Software educacional foi *CAI*, do inglês, *Computer Assisted Instruction* (Instrução Assistida por Computador), na sua função o aluno tinha de responder o que máquina desejava, assim a mesma não aceitava respostas segundo a sua compreensão, a linguagem para elaboração dessa ferramenta educacional foi LOGO muito utilizada na década de 80.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será abordado aspectos teóricos sobre os assuntos envolvendo, os conversores choppers, Matlab e suas extensões e sistema de controle.

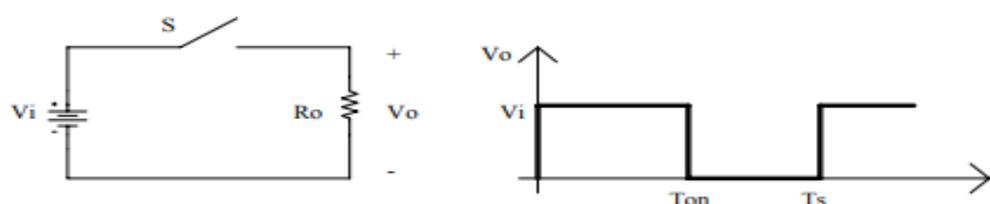
### 2.1 Conversores Eletrônicos de Potência (Choppers)

Segundo Barbi (2006 pag. 2) diz ser “Eletrônica de Potência pode ser definida como uma ciência aplicada, dedicado ao estudo de conversores estáticos de energia elétrica” (BARBI, I. 2006 pag.2).

Um conversor estático pode ser definido como um sistema, constituído por elementos passivos (resistores, capacitores e indutores) e elementos ativos (interruptores), tais como Diodos, Transistores, Transmissores, GTO`s, Triacs, IGBT`s e Mosfet`s, associados segundo uma lei pré-estabelecida. (BARBI, I. 2006 pag.2).

Os conversores promovem o tratamento eletrônico da energia elétrica, são empregados no controle do fluxo da energia elétrica entre dois pontos ou mais de um sistema elétricos. Como, por exemplos podem ser chamados de circuitos chaveados, podemos citar os conversores Buck, Boost e Buck-Boost, também conhecidos como conversores Choppers, para engenharia elétrica são sistemas formados por semicondutores de potência operando como interruptores, e por elementos passivos, normalmente indutores e capacitores que tem por função controlar o fluxo de potência de uma fonte de entrada para uma fonte de saída. Representada pela figura 1.

Figura 1 - Forma simples de um conversor CC-CC e sua forma de onda

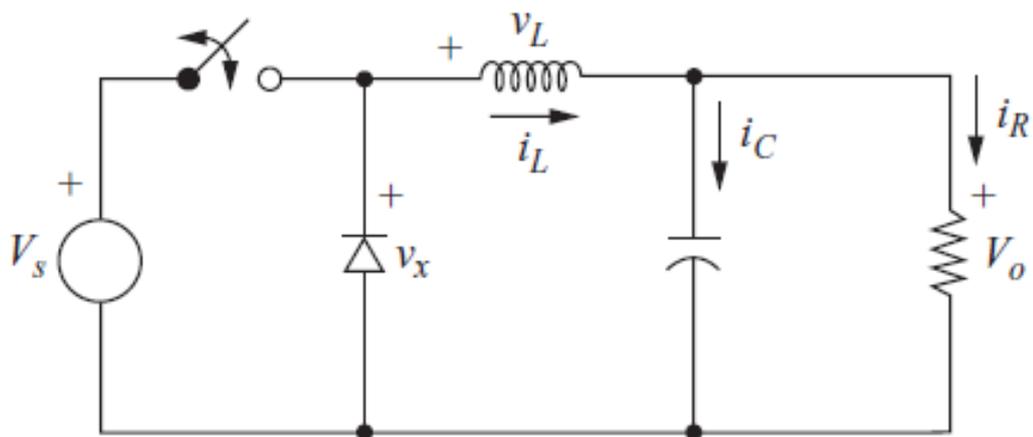


Fonte: INEP/EEL – UFSC (2018)

### 2.1.1 Conversor Buck

É um circuito eletrônico abaixador de tensão, caracterizado por ter a entrada em tensão e sua saída em corrente. São amplamente utilizados em fontes de alimentações e aplicações envolvendo acionamento de motores. Através de sua utilização de chaves semicondutoras, é possível controlar o valor médio da tensão CC que pode ser vista na carga de saída do conversor através do ciclo, entre o tempo que a chave fica fechada e o tempo que a chave fica aberta. O Conversor Buck de uma forma simples será representado pela figura 2.

Figura 2 - Diagrama elétrico do Conversor Buck

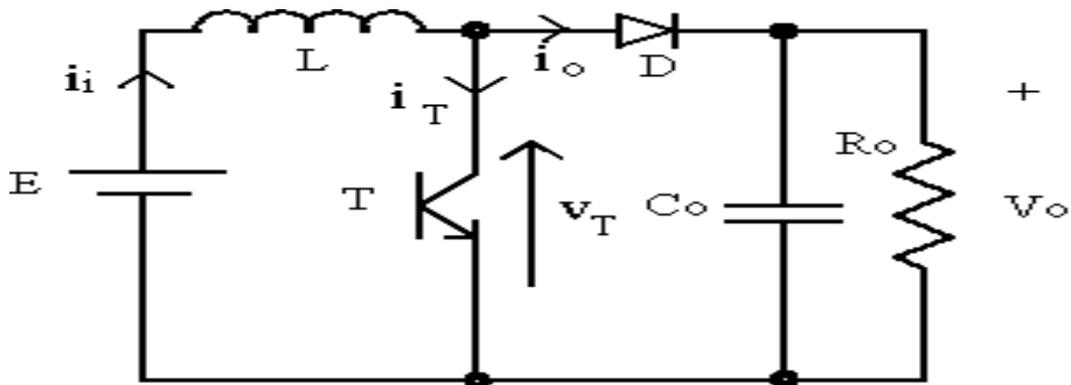


Fonte: Hart, D. W. (2012). (2018)

### 2.1.2 Conversor Boost

Segundo Mohan, N., Undeland, T. M., Robbins, W. P. A sua principal aplicação está no poder de controlar ou regular tensão e a frenagem regenerativa dos motores de corrente contínua. Como o nome já indica a saída da tensão é sempre maior que a tensão de entrada, ou seja, ele é conhecido como conversor elevador de tensão. Quando o interruptor ou Mosfet' está ligado, o diodo está reversamente polarizado, isolando assim, estágio de saída. A entrada fornece energia para o indutor. Quando o interruptor ou Mosfet' está desligado, o estágio de saída recebe energia do indutor, bem como a entrada. O conversor Boost de uma forma simples representada pela figura 3.

Figura 3 - Diagrama elétrico do Conversor Boost



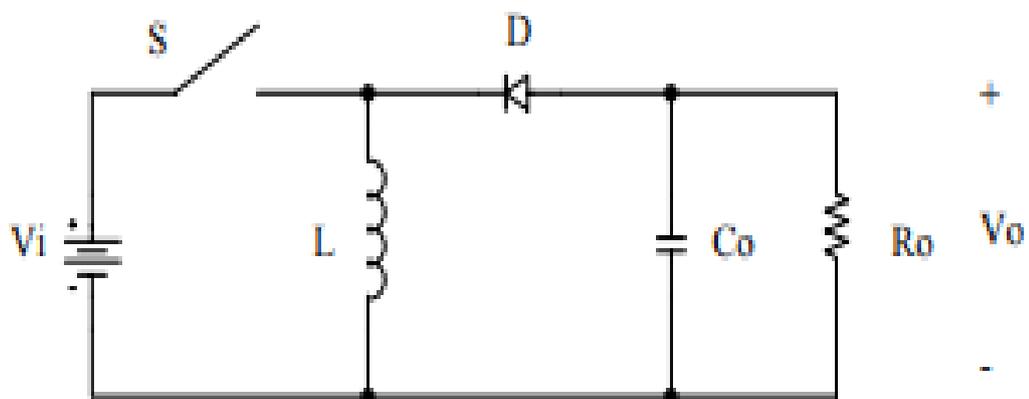
Fonte: Hart, D. W. (2012). (2018)

### 2.1.3 Conversor Buck - Boost

A principal aplicação de um conversor Buck-Boost está em fontes de alimentação, onde uma saída de polaridade negativa pode ser desejada em relação ao terminal comum da tensão de entrada e a tensão de saída pode ser maior ou menor que a tensão de entrada. Um conversor Buck-Boost pode ser obtido pela junção dos dois conversores: o conversor Buck e o conversor Boost.

É um conversor que pode operar como abaixador ou elevador de tensão, caracterizado por ter entrada em tensão e saída em tensão. Que pode ser representada de modo simples pela figura 4.

Figura 4 - Diagrama elétrico do Conversor Buck - Boost



Fonte: HART, 2012 (2018)

## 2.2 Softwares

São conjuntos de componentes lógicos de um sistema ou computador, para um processamento de dados, como; conjunto de instruções que controlam o funcionamento de um computador, programa e suporte lógico.

### 2.2.1 Matlab

Elaborado e produzido pela empresa MATHWORKS, o Matlab possui linguagem de programação em um ambiente de computação numérica bastante distribuída, inclusive utilizada em enumeras aplicações, podemos citar: imagem e processamento de sinais, comunicação, design de controle, teste e medição, entre outros. Matlab é uma ferramenta muito utilizada entre engenheiros desde a vida acadêmica. (ENOCKSSON, 2011).

Tanto o projeto e a interface serão construídos e elaborados no Matlab R2016, que te proporciona à integração total ao Simulink, juntos eles combinam a programação textual e gráfica, para projetar um sistema em um ambiente de simulação. Ele é um software interativo direcionado ao cálculo numérico, combinando cálculo com matrizes, análise numérica, construção de gráficos e processamento de sinais em ambiente de fácil uso. O elemento básico de sua informação é uma matriz adimensional, permitindo a solução de problemas numéricos em muito menos tempo que levaria para escrever um programa em outra linguagem como C, Básico, etc. (MATWORKS, 2017).

### 2.2.2 Simulink/Simscape

Simulink foi criado e projetado como uma ferramenta comercial de modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos e embutidos em multi-domínio, fornecendo um ambiente gráfico interativo e um conjunto personalizável de biblioteca de blocos. (ENOCKSSON, 2011).

Ele é uma plataforma de simulação disponível do Matlab é aplicado regularmente pra projetar, simular e praticar teste de variedade de sistemas variável no tempo, tais como, comunicação, teoria de controle, processamento de sinal digital etc. (ENOCKSSON, 2011).

Simscape é uma extensão do software da MATHWORKS, apresenta uma linguagem de modelagem importante no MATLAB e dirigida ao ambiente do Simulink e seu acesso através de uma biblioteca dentro do Simulink. Dentre seus sistemas operacionais destacam-se; um conjunto de blocos funcionais e recursos para simulação e modelagem de sistemas físicos fornecem ferramentas para modelar sistemas de elétrica, mecânica, hidráulica, e outros domínios físicos, a exemplo; controladores e conversores. Apartir desses domínios físicos e distintos, que são possíveis criarem modelo personalizado de seus componentes. (ENOCKSSON, 2011).

Para elaboração da simulação, serão listados na tabela 1, os componentes utilizados e uma pequena descrição do mesmo.

Tabela 1 - Componentes utilizados para elaboração dos conversores

<b>Nome</b>	<b>Descrição</b>
<b>Capacitor</b>	Componente eletrônico.
<b>Display</b>	Irá mostra o valor da tensão desejada na saída do conversor.
<b>Constant</b>	Aonde será alocado o valor de referencia da tensão desejado.
<b>Add</b>	Tem a função de adicionar ou subtrair entradas.
<b>Indutor</b>	Componente eletrônico.
<b>Diodo</b>	Componente eletrônico. Funciona como uma chave de acionamento automático (fecha quando este diretamente polarizado, e abre quando esta inversamente polarizada).
<b>Gain</b>	Elemento para obter o ganho, será utilizado juntamente com o controlado PID.

“Continua”

Tabela 2 - Componentes utilizados para elaboração dos conversores “*continuação*”

<b>Mosfet</b>	<b>Componente semicondutor, no projeto terá a função de um interruptor.</b>
<b>Resistor</b>	Componente eletrônico.
<b>Scope</b>	Nele iremos ver a simulação da tensão, funciona como osciloscópio.
<b>Repeating Sequence</b>	Saída de uma seqüência repetitiva de sinal.
<b>PID Controller</b>	Este bloco implementa algoritmos de controle PID de tempo contínuo e discreto e inclui recursos avançados. Podendo ajustar os ganhos do PID automaticamente usando o botão ' <i>Tune</i> '.
<b>Relay</b>	Emite o valor 'ligado' ou 'desligado' especificado, comparando a entrada com os limites especificados. O estado on / off do relé não é afetado pela entrada entre os limites superior e inferior, ou seja, ele irá retransmitir a tensão, sem ser afetado.
<b>Pulse Generator</b>	Será o nosso gerador de pulso PWM, através da sua geração da largura do pulso de uma onda quadrada, é possível o controle do Mosfet.
<b>Voltage Measurement</b>	Medição da tensão ideal na simulação.
<b>Relational Operator</b>	Aplica o operador relacional selecionado às entradas e saídas do resultado.

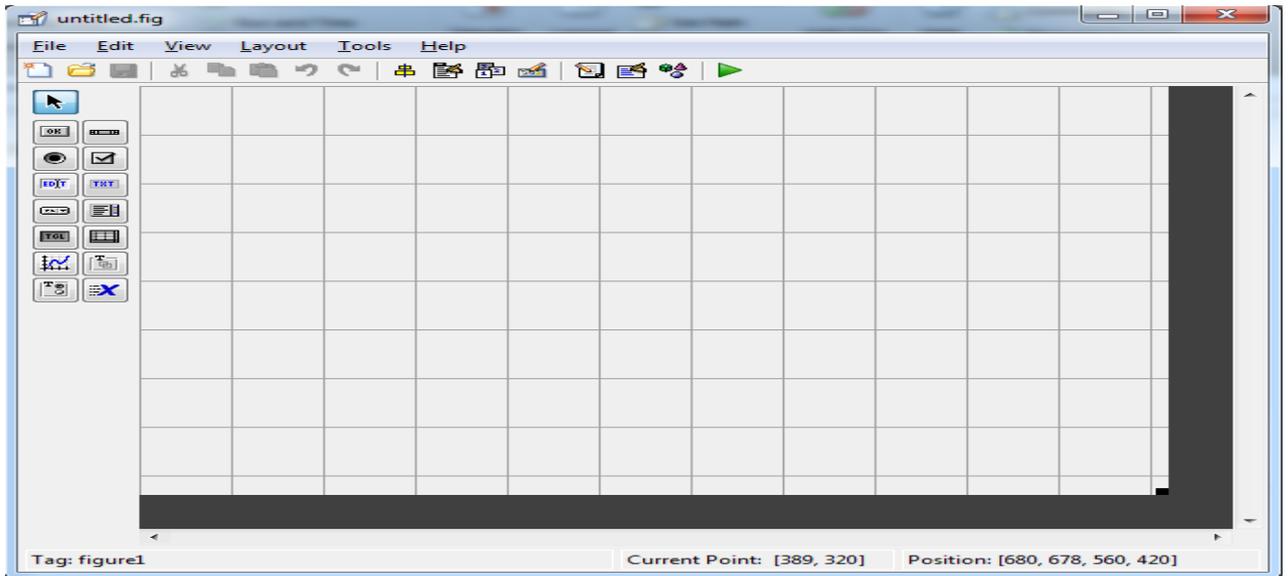
### 2.2.3 GUI

No Matlab existe dois de meio de se desenvolver uma GUI; uma delas é a GUIDE (esse termo vem de *Graphical User Interface Development Environment*, ou ambiente de desenvolvimento de interface gráfica com o usuário, ou seja, às GUIs, fornecendo ferramentas para elaboração ou criação da parte gráfica) e pela sua programação ser direta em um script. Desenvolver uma GUI por programação implica em descrever todos os componentes, suas propriedades e comportamento por meio de linhas de código. Quando se emprega o GUIDE, as informações sobre o layout gráfico são armazenadas em um arquivo de extensão .fig e associado a esse arquivo é criado outro, de extensão .m, contendo linhas de código para determinar o comportamento de cada componente gráfico da GUI e suas interações com o usuário.

Vendo por esse lado que GUIDE apresenta maior simplicidade no desenvolvimento do *layout* gráfico, também já pertence ao grupo MATHWORKS, será projetada a interface do supervisor didático nessa ferramenta.

GUIDE como demonstrado figura 5, assim que aberto no Matlab o GUIDE oferece alguns elementos com quais se podem construir a parte gráfica do GUI. A cada um desses elementos será associado ao um *callback*, que é a linha de código que descrevem o comportamento de cada elemento e suas interações. Todos os elementos podem ser utilizados em um *callback* distinto, sendo que ele aciona o *callback* por evento em particular, podendo ser um clique, uma tela sendo pressionado.

Figura 5 - Janela de trabalho do GUI



Fonte: MATHWORKS (2018)

Alguns dos elementos importantes a serem utilizados nesse projeto serão apresentados na tabela 2, com uma pequena descrição de seu funcionamento.

Tabela 3 - Componentes utilizados para elaboração da Interface

Nome	Descrição
<b><i>Push Button</i></b>	Botão de apertar.
<b><i>Edit Text</i></b>	Caixa de texto editável que pode aceitar uma ou mais linhas de entrada e mostrar um texto inicial
<b><i>Static Text</i></b>	Caixa de texto não editável, normalmente não necessita de um <i>callback</i> . Exibe uma string estática
<b><i>Axes</i></b>	Elemento que permite exibir gráficos e imagens.
<b><i>Panel</i></b>	Elemento que cria um painel com bordas e título, tornando a GUI mais organizada e fácil de compreender. Normalmente não necessita de um <i>callback</i> .

“Continua”

Tabela 4 - Componentes utilizados para elaboração da Interface  
 “*Continuação*”

<b><i>Tag</i></b>	Propriedade do elemento com qual será nomeado um <i>callback</i> e partir da qual se define o elemento a ser manipulado pelo código dos <i>callbacks</i> .
<b><i>Title</i></b>	Propriedade que define o título do elemento, no projeto será utilizado nos <i>Panels</i> .

Fonte: MATHWORKS (2018)

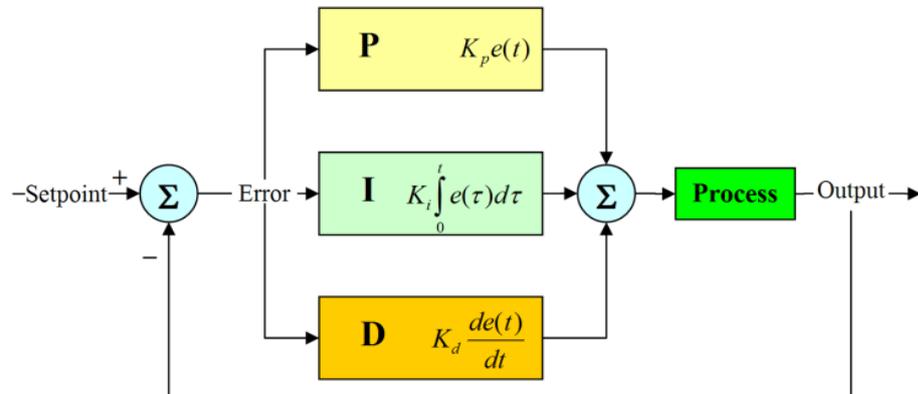
## 2.3 Sistema de Controle

Os sistemas de controle são projetados para melhorar o desempenho dos conversores em geral, tais como; precisão, velocidade de resposta e estabilidade.

### 2.3.1 Controlador PID

Proporcional Integral Derivativo (PID), como ilustrado na figura 6, ele é o algoritmo de controle de processo mais utilizado na indústria em geral, essa popularidade de controladores PID pode ser atribuída em parte ao seu desempenho e eficiência, em um enorme gama de condições de funcionamento, em parte à sua simplicidade funcional permite as pessoas da área acadêmica e engenheiros, para operá-los de uma forma simples e direta (BEGA, E. 2006).

Figura 6 - Diagrama em blocos do Controlador PID



Fonte: Google imagem (2018)

O método de ajuste de controladores em malhas fechadas, mais conhecido e utilizado até hoje, foi desenvolvido em 1942 por J.G. Ziegler e N.B. Nichols. Esse método, apesar de ser o mais antigo, ainda é o mais utilizado por instrumentistas e profissionais da área de controle de processos. O método consiste em determinar um ganho chamado de ganhocrítico ( $G_u$ ) e um período crítico ( $P_u$ ). Para isso, devem-se seguir alguns passos, tira-se a ação integral e a ação derivativa do controlador, deixando apenas a ação proporcional, mantém-se o controlador em modo automático em malha fechada, ajusta-se o ganho do controlador em um nível baixo a fim de se evitar oscilações no sistema, aumenta-se o ganho, passo a passo, até que a oscilação fique constante em amplitude e período.

Com base nos ajustes descritos acima, os controladores, são calculados para um ajuste ideal. Ziegler e Nichols observaram que em um controlador proporcional o ganho ideal é a metade do ganho crítico, isto é,  $\text{Ganho} = G_u/2$  e, com esse ganho obtemos aproximadamente uma razão de caimento de  $1/4$ .

Através de testes, Ziegler e Nichols descobriram que as equações mostradas na tabela 3 fornecem bons valores de ajustes para controladores PID.

Tabela 5 - Equações de ajustes para Controladores PID

	<b>Ganho Proporcional</b>	<b>Tempo Integral</b>	<b>Tempo Derivativo</b>
<b>Controle Proporcional (P)</b>	$G_u/2$	-	-
<b>Controle Proporcional e Integral (PI)</b>	$G_u/2.2$	$1.2/P_u$	
<b>Controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID)</b>	$G_u/1.7$	$2/P_u$	$P_u/8$

Fonte: ZIEGLER, John G; NICHOLS, Nathaniel B. 1942 (2018)

### 3. DESENVOLVIMENTO

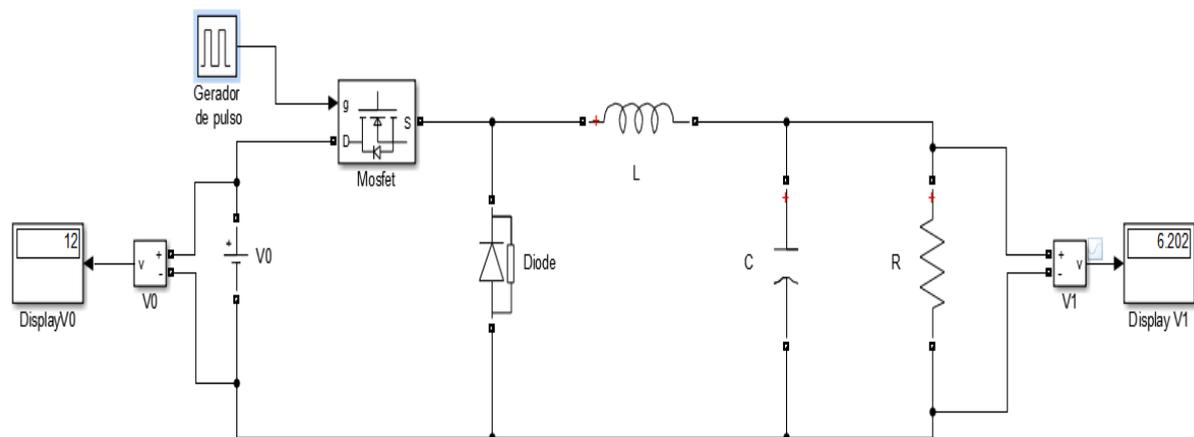
Neste capítulo será detalhado todo processo de montagem da simulação de cada conversor e ganho do controlador PID no processo de simulação, e a elaboração da interface do supervisor.

#### 3.1 Conversores Choppers

##### 3.1.1 Conversor Buck

O conversor Buck na eletrônica de potência tem a função de abaixador de tensão, ou seja, significa que a tensão aplicada à carga, na saída do conversor, é sempre menor que à tensão de entrada, montagem do conversor no Simulink, foi utilizado componentes eletrônicos: diodo, indutor, resistor, capacitor, MOSFET, gerador de pulso, Scope, display e Fonte de tensão. Esse conversor será de 12 V para 6 V, onde seus componentes já estão com seus valores predefinidos, lembrando que para interface, tanto o estudante e professor irá simular qualquer valor no seu projeto, neste caso para simulação, os valores já foram predefinidos, o conversor Buck foi demonstrado na figura 7. Onde os valores dos componentes são: Indutor  $2.26 \times 10^{-3}$  H, Capacitor  $1 \times 10^{-6}$  F, Resistor: 10 Ohms, Gerador de Pulso: 55% (modulação do pulso), Fonte de tensão: 12 V e Tensão saída: 6 V.

Figura 7 - Diagrama do Conversor Buck

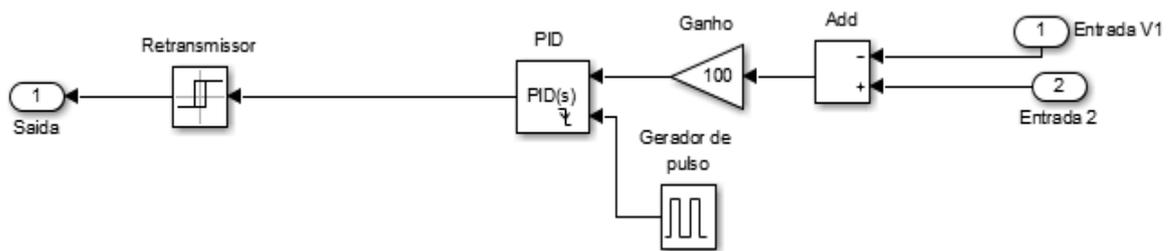


Fonte: O próprio autor (2018)

### 3.1.1.1 Conversor Buck com controlador PID

Para o melhor ganho e estabilidade do conversor, foi utilizado controlador PID, em parâmetros de comparação e simulação do conversor Buck, deste modo, veremos a diferença relacionada ao ganho como sistema de controle, através das simulações. O circuito será o mesmo, com os mesmos componentes, o parâmetro do controlador já vem predefinido no Simulink, precisando de somente de alguns ajuste para cada tipo de circuito a ser utilizado, desta forma o controlador será demonstrado pelo diagrama ilustrado pela figura 8.

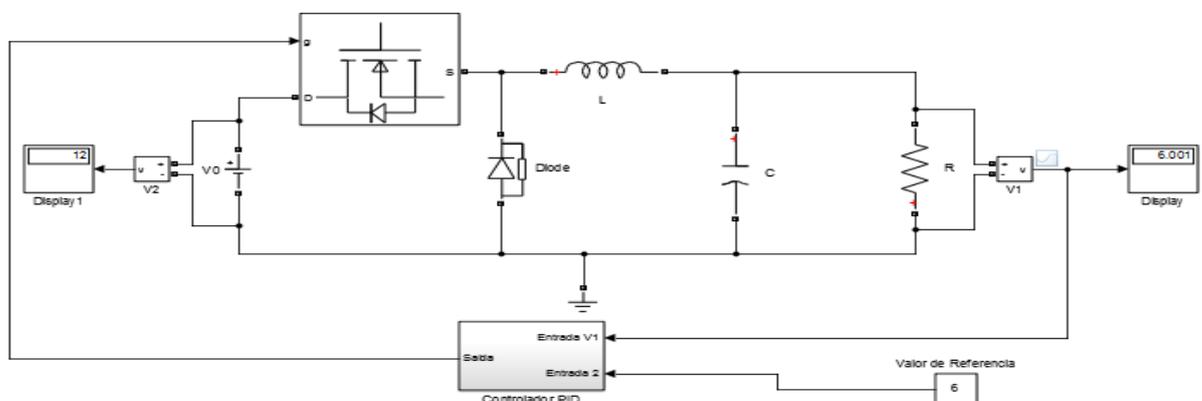
Figura 8 – Diagrama do controlador PID para Conversor Buck



Fonte: O próprio Autor (2018)

O controlador PID ficará na saída do conversor, aonde ele pega a tensão V1, atribui o ganho necessário do circuito, retornando ao circuito até estabilizar o controlador. Como ilustrada na figura 9.

Figura 9 - Diagrama do conversor Buck com Controlador PID



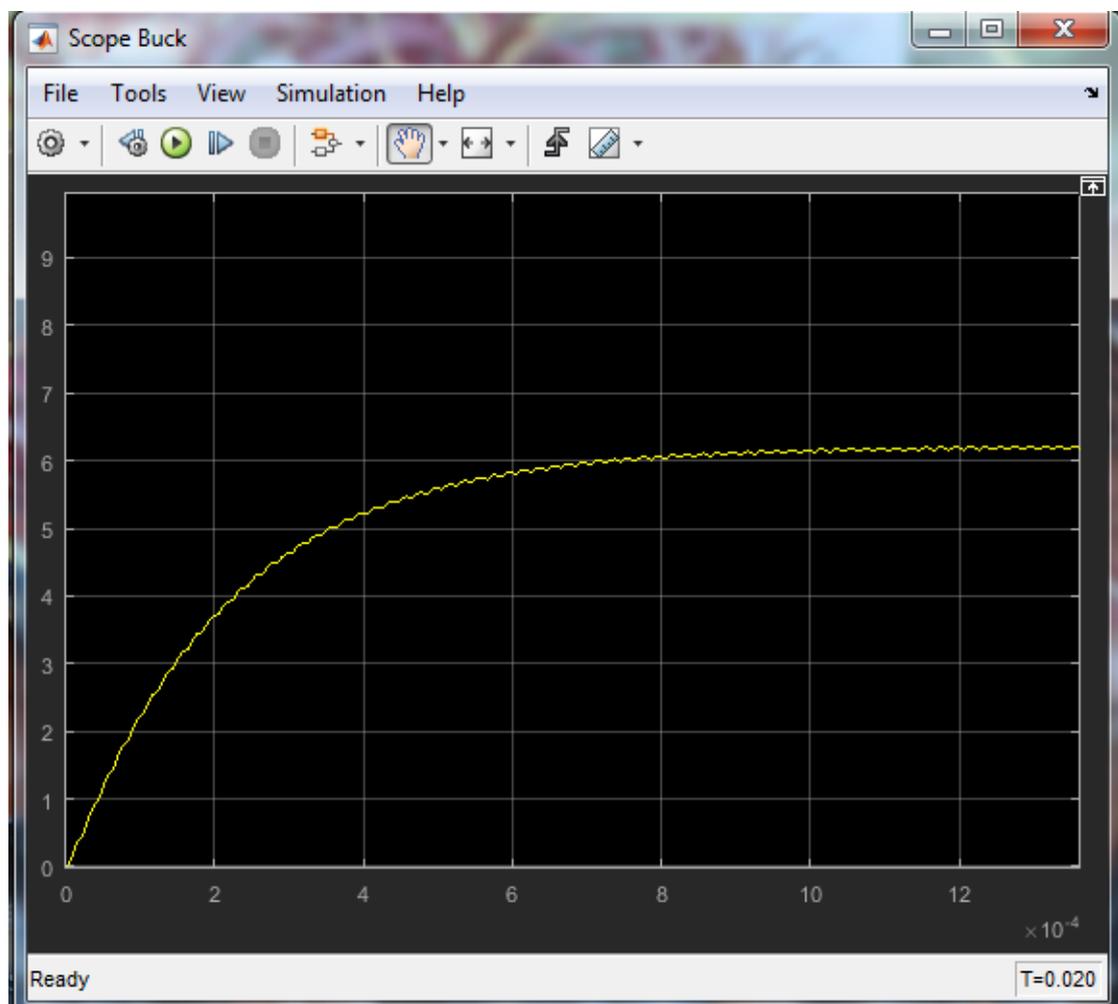
Fonte: O próprio Autor (2018)

### 3.1.1.2 Simulação

Através da simulação podemos comparar os conversores, ganho que foi obtido com controlador PID sobre o conversor Buck simples, à tensão de saída se manteve estável com o sistema de controle PID, sem força o conversor.

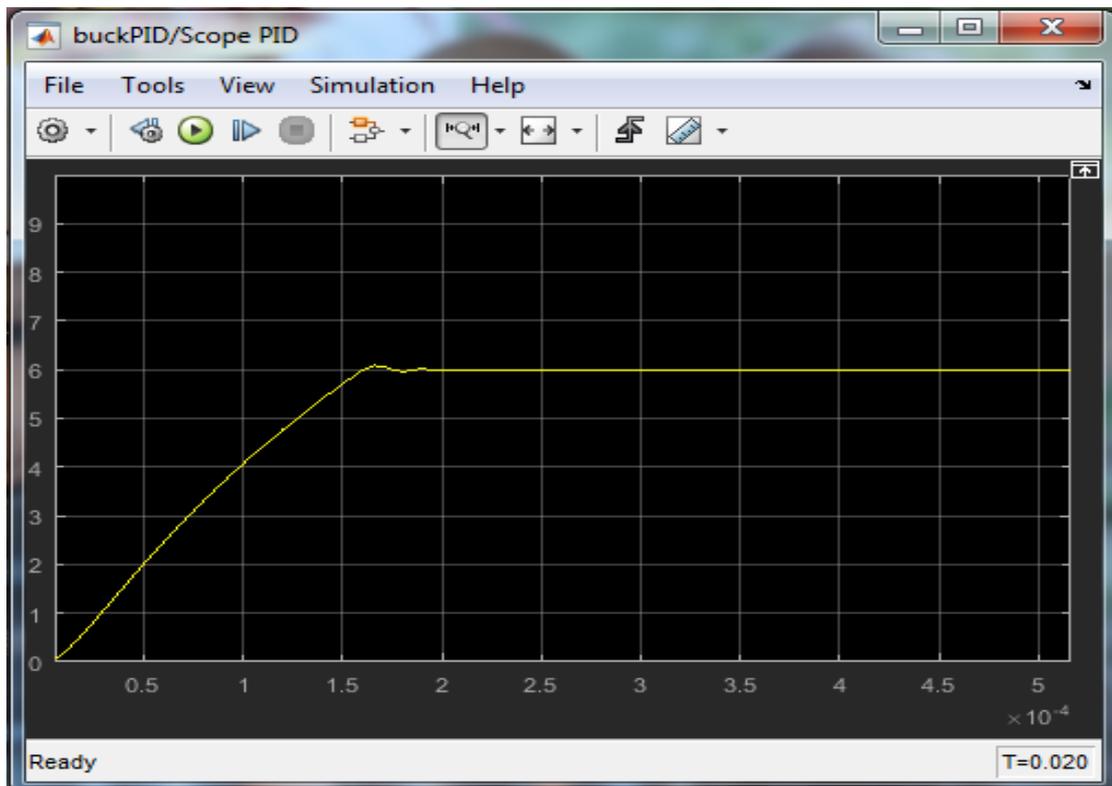
As comparações entre os dois foram obtidas através da ferramenta *Scope*, do Simulink, a simulação teve duração de 0.02s, como veremos na figura 10 e figura 11 abaixo.

Figura 10 - Simulação do Conversor Buck



Fonte: O próprio Autor (2018)

Figura 11 - Simulação do Conversor Buck com Controlador PID

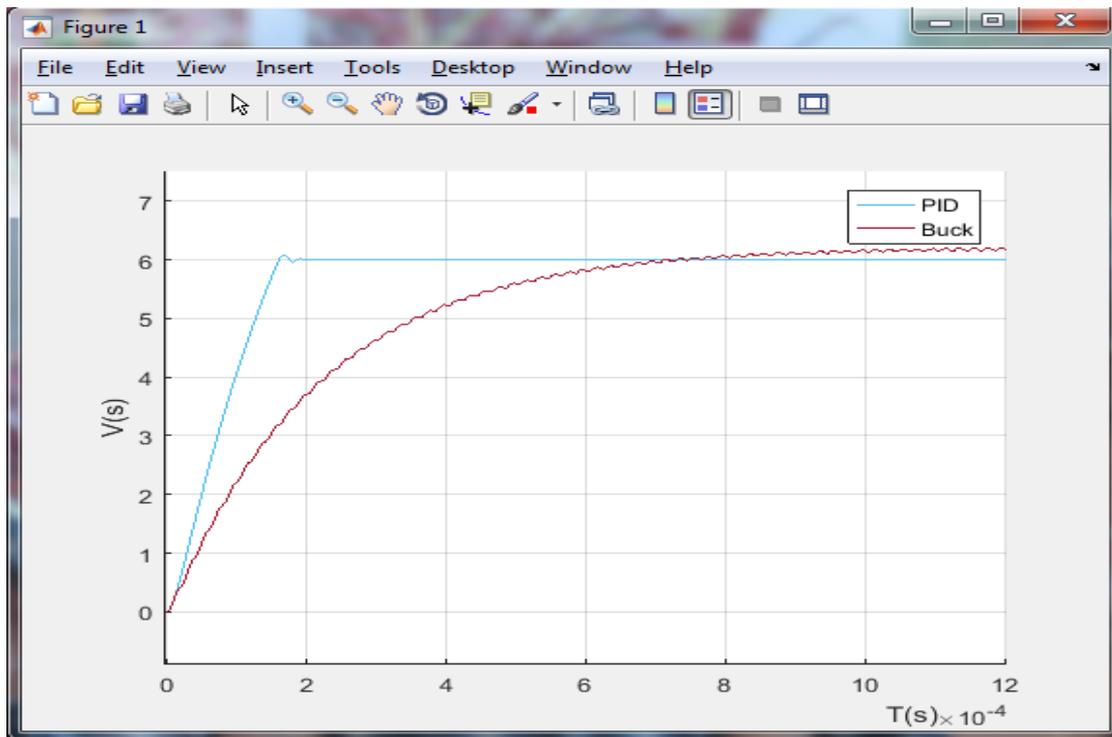


Fonte: O próprio Autor (2018)

### 3.1.1.3 Resultado

Resultados obtidos através das simulações do conversor Buck, demonstraram que o conversor utilizando o sistema de controle PID, teve a estabilidade da tensão, mas rápida, de modo que os ruídos gerados pela na tensão fossem menores que o conversor Buck simples, como demonstrado pelo gráfico 1.

Gráfico 1 - Resultado da comparação conversor Buck com Controlador PID

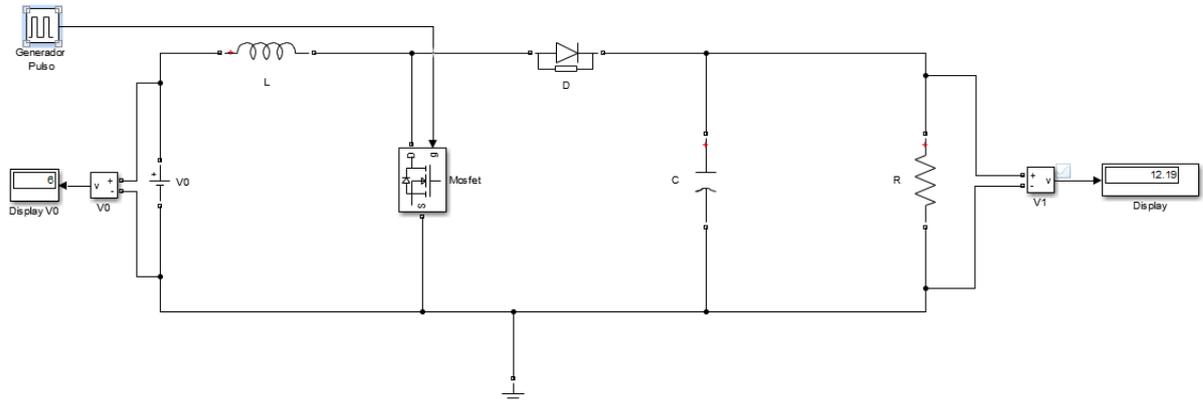


Fonte: O próprio Autor (2018)

### 3.1.2 Conversor Boost

O conversor Boost na eletrônica de potência tem a função de elevador de tensão, aplicada à carga, na saída do conversor, é sempre maior que à tensão de entrada, montagem do conversor no Simulink, foi similar ao conversor Buck, a principal diferença entre eles, e a posição do diodo, utilizando os mesmos componentes. Conversor Boost simulado teve sua tensão  $V_0$  6 V e tensão de saída de  $V_1$  12 V, como ilustrado pela figura 12. Para a simulação os valores foram predefinidos como: Indutor  $1000 \times 10^{-6}$  H, Capacitor:  $100 \times 10^{-6}$  F, Resistor: 1000 Ohms, Gerador de Pulso: 45% (modulação do pulso), Fonte de tensão: 6 V e Tensão saída: 12 V.

Figura 12 - Diagrama do Conversor Boost

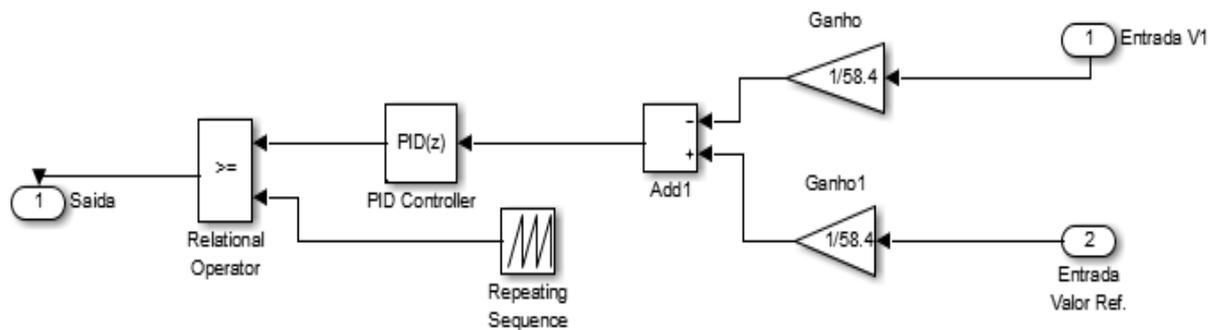


Fonte: O próprio Autor (2018)

### 3.1.2.1 Conversor Boost com controlador PID

Para o melhor ganho do conversor, Foi utilizado controlador PID em motivo de comparação do conversor Boost, neste modo, notaremos a diferença do ganho. O circuito será o mesmo, com o mesmo componentes, o parâmetro do controlador já vem predefinido no Simulink. O controlador será ilustrado na figura 13.

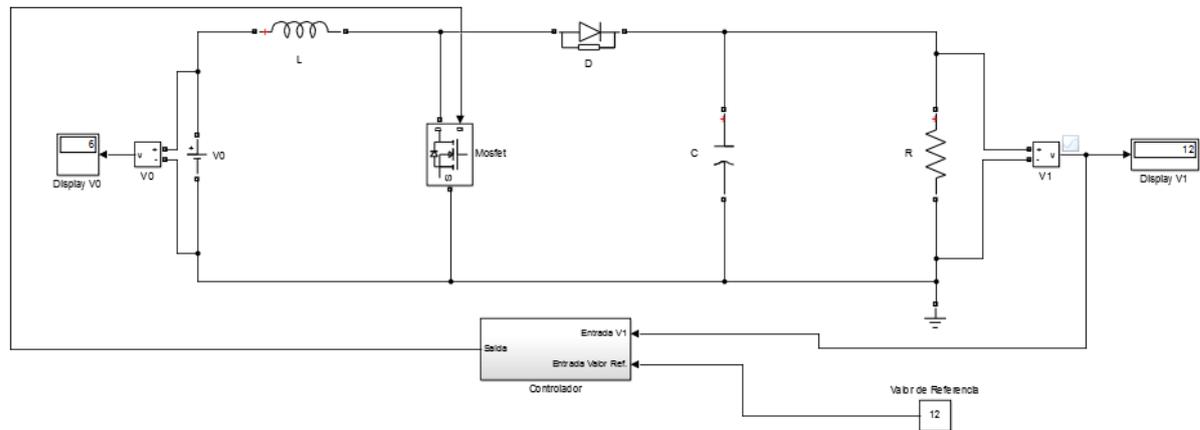
Figura 13 - Diagrama do Controlador PID



Fonte: O próprio Autor (2018)

Para esse comparativo, o controlador PID será colocado na saída do conversor, pegando o valor de tensão V1, atribui o ganho que o circuito necessita, retornará ao circuito ate estabilizar o controlador. Como ilustrado pela figura 14.

Figura 14 - Conversor Boost com Controlador PID



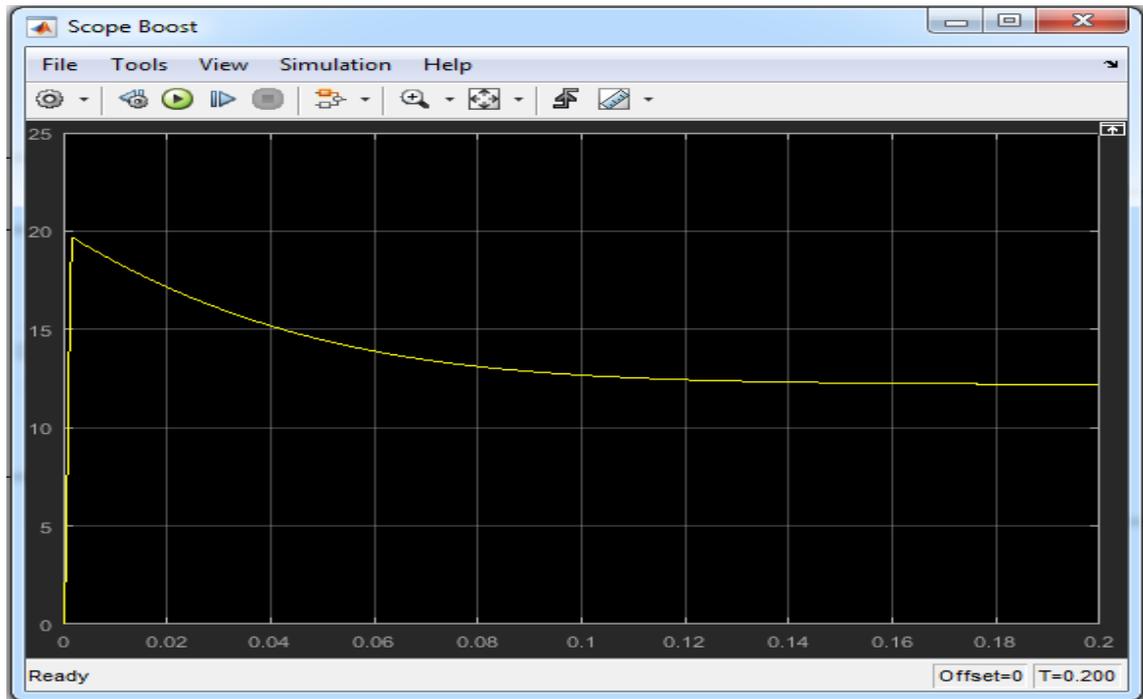
Fonte: O próprio Autor (2018)

### 3.1.2.2 Simulação

Através da simulação podemos comparar os dois conversores, para essa simulação analisaremos o conversor Boost elevador de tensão, o ganho obtido pelo controlador PID sobre o conversor Boost simples, a tensão de saída se manteve estável, com o controlador atuando no circuito, de modo que o circuito não está sendo muito exigido, trabalhando de modo mais leve.

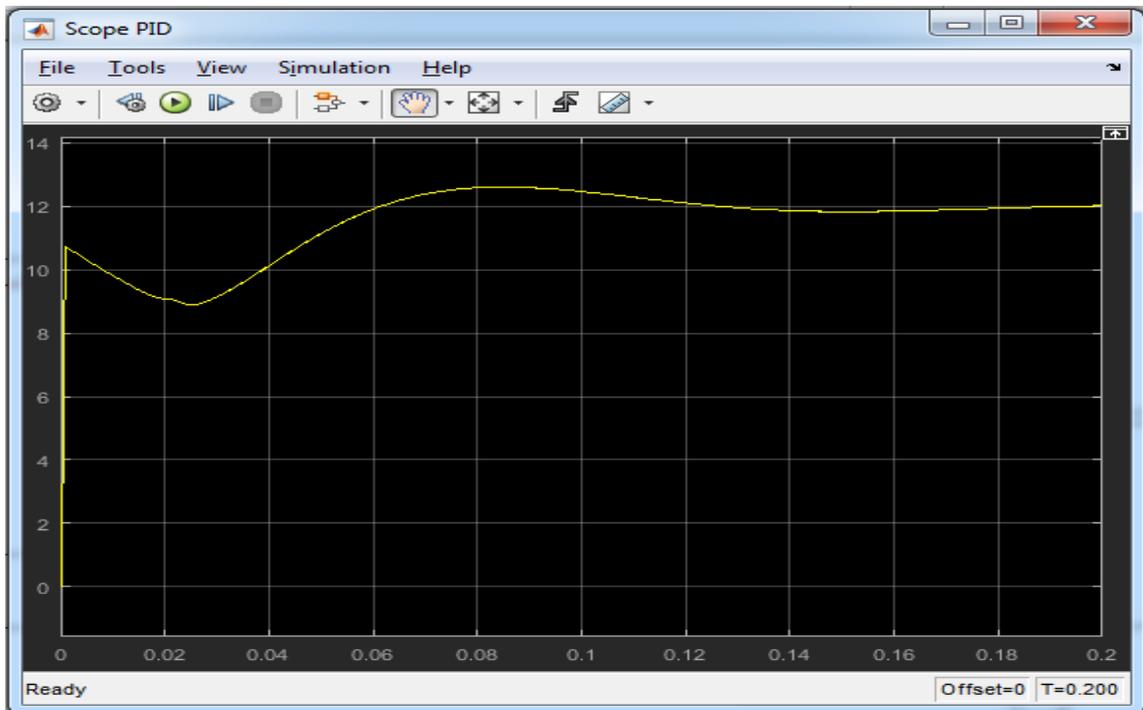
O comparativo entre os dois foram obtidas através da ferramenta *Scope*, do Simulink, a simulação teve a duração de 0.2s, como veremos na figura 15 e figura 16 abaixo.

Figura 15 - Simulação do Conversor Boost



Fonte: O próprio Autor (2018)

Figura 16 - Simulação do Conversor Boost com Controlador PID

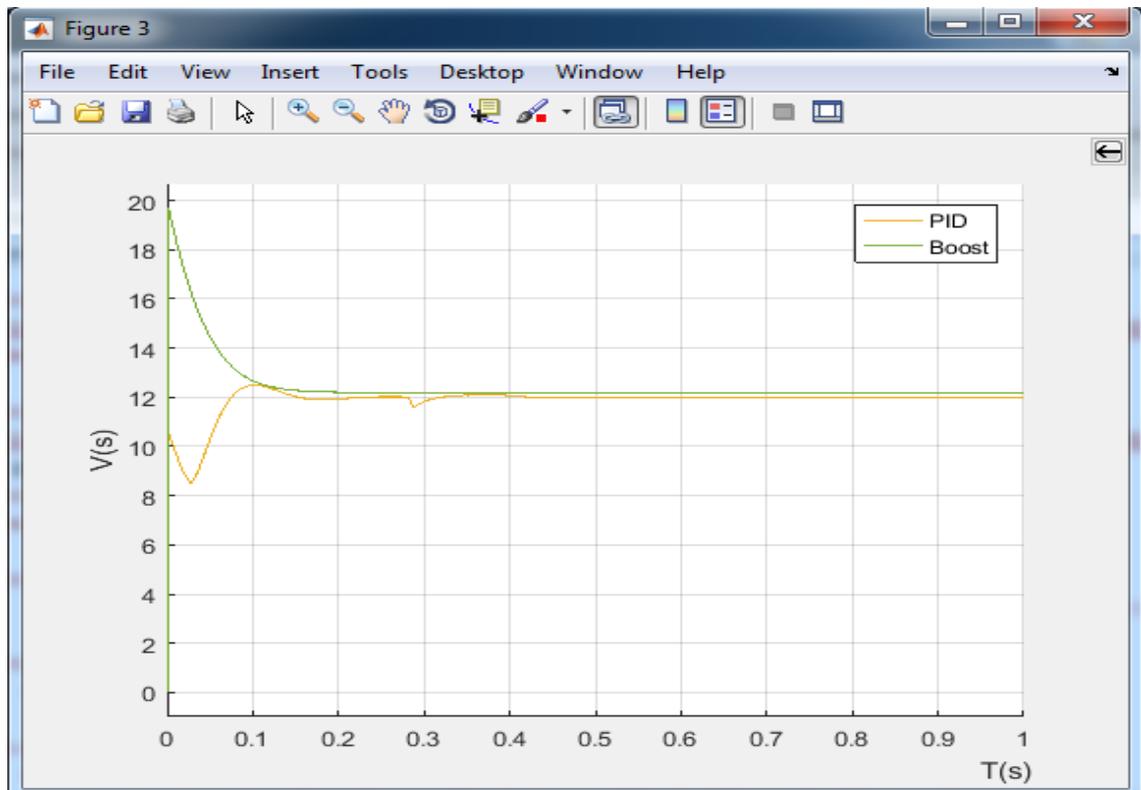


Fonte: O próprio Autor (2018)

### 3.1.2.3 Resultado

Resultados obtidos através da comparação entre o conversor Boost demonstraram que o conversor utilizando o sistema de controle PID, teve sua tensão na saída estabilizada, mas rápida, de modo que os ruídos gerados pela na tensão fossem menores que o conversor Boost na cor verde, como ilustrado pelo gráfico 2.

Gráfico 2 - Resultado da comparação conversor Boost com Controlador PID



Fonte: O próprio Autor (2018)

### 3.1.3 Conversor Buck - Boost

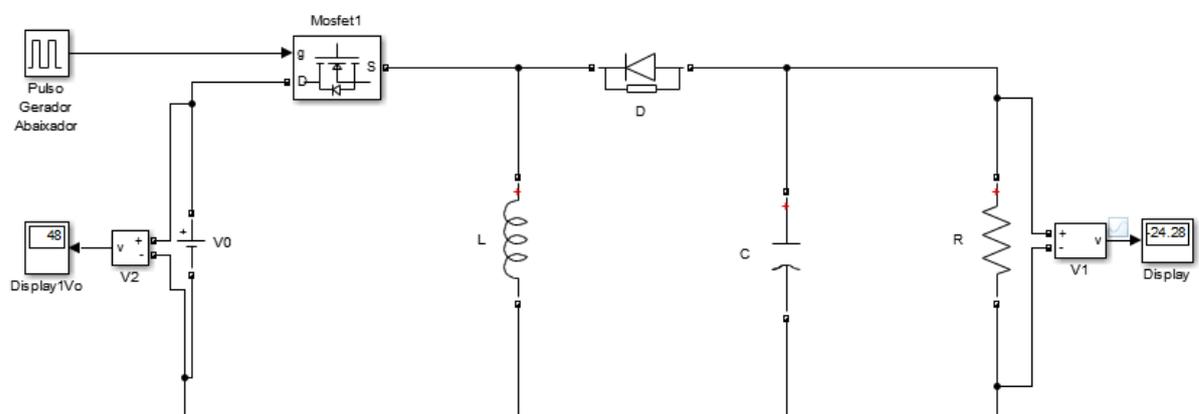
O conversor Buck-Boost na eletrônica de potência, tem a função de operar como abaixador ou elevador de tensão, caracterizado por ter entrada em tensão e saída em tensão.

A montagem do conversor no Simulink, à junção em cascata dos dois conversores, o Buck e Boost, na montagem do conversor, o diodo é colocado

invertido. Os componentes utilizados foram: Mosfet, Indutor, Capacitor, Resistor, Fonte de tensão e *display* para visualização, para ele ser elevador de tensão sua entrada foi estabelecida como V0 12 V e à tensão de saída de V1 24 V, para abaixador de tensão sua entrada foi estabelecida V1 48 V e a tensão de saída de V2 24 V, para obter este valor, foi utilizado um gerador pulso, seu ajuste é manual. Para a simulação do conversor foram utilizados componentes com os valores predefinidos.

Para a simulação com a função de abaixador de tensão, onde a tensão de entrada for V0 48 V, ele tem que trabalhar com a saída de tensão de V1 de 24 V, ele obriga o circuito a abaixar a tensão, como ilustrado na figura 17, os valores para simulação foram: Indutor  $1 \times 10^{-3}$  H, Capacitor:  $47 \times 10^{-3}$  F, Resistor: 10 Ohms, Gerador de Pulso: 34,5% (modulação do pulso), Fonte de tensão: 48 V e Tensão saída: 24 V.

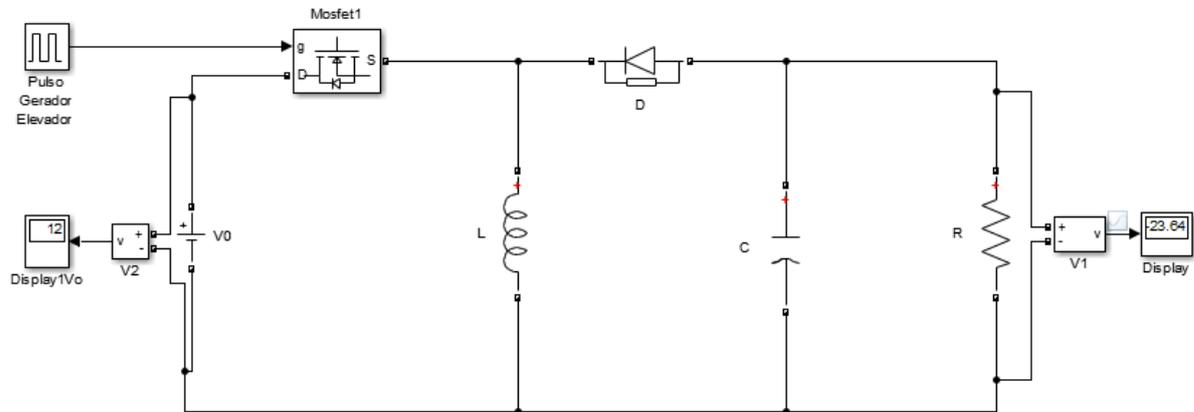
Figura 17 - Diagrama do Conversor Buck - Boost Abaixador de tensão



Fonte: O próprio Autor (2018)

Já na função de elevador de tensão, o conversor teve gerador de pulso reajustado, Tensão de entrada V0 12 V, ele tem que trabalhar com a saída de tensão de V1 de 24 V, ele obriga o circuito a elevar à tensão, como ilustrado na figura 18, os valores para simulação foram: Indutor  $1 \times 10^{-3}$  H, Capacitor:  $47 \times 10^{-3}$  F, Resistor: 10 Ohms, Gerador de Pulso: 68,5% (modulação do pulso), Fonte de tensão: 12 V e Tensão saída: 24 V.

Figura 18 - Diagrama do Conversor Buck - Boost Elevador de tensão

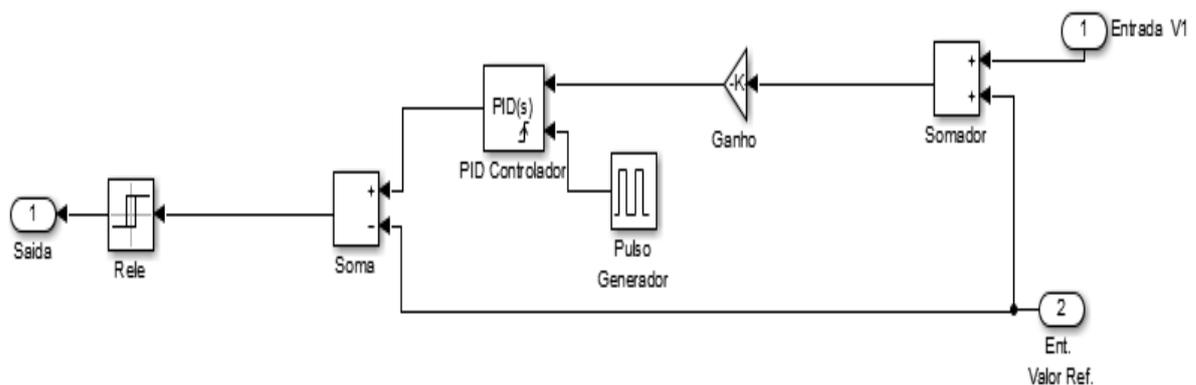


Fonte: O próprio Autor (2018)

### 3.1.3.1 Conversor Buck-Boost com controlador PID

Para o melhor ganho do conversor, foi utilizado um controlador PID para parâmetros de comparação do conversor Buck-Boost, neste modo, à diferença no conversor, como ele tem o valor de referência definido, independente do valor de entrada da tensão, o valor da saída sempre será a mesma, ou seja, comparado o conversor simples tinha que ser reajustado manualmente, com sistema de controle o conversor se reajusta sozinho. O circuito será o mesmo, com o mesmo componentes, o parâmetro do controlador já vem predefinido no Simulink. O controlador será ilustrado na figura 19.

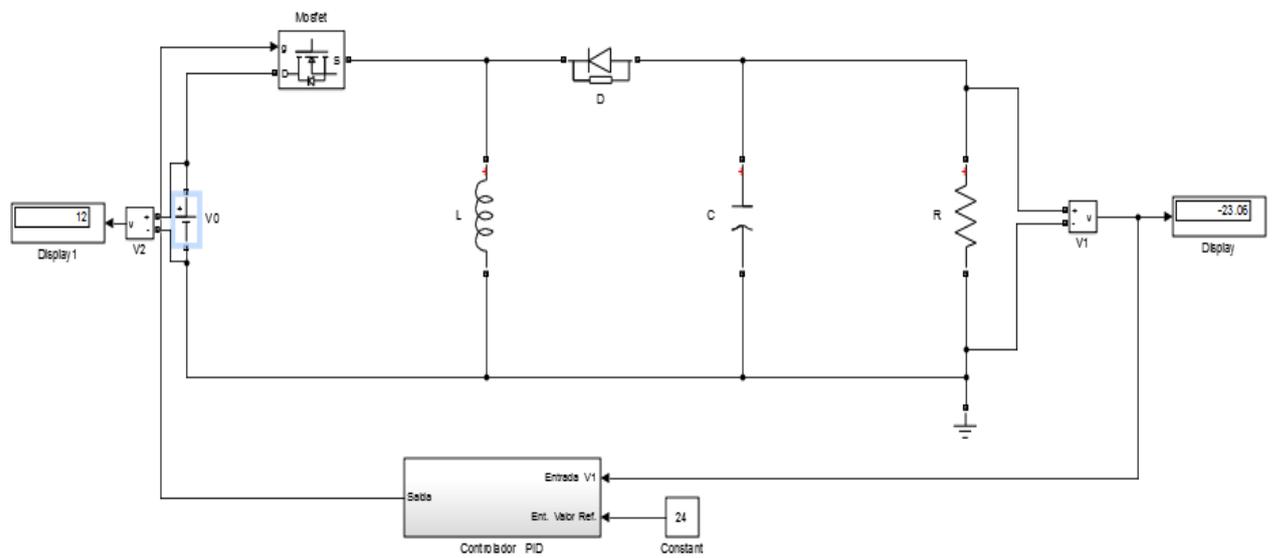
Figura 19 - Diagrama do Controlador PID



Fonte: O próprio Autor (2018)

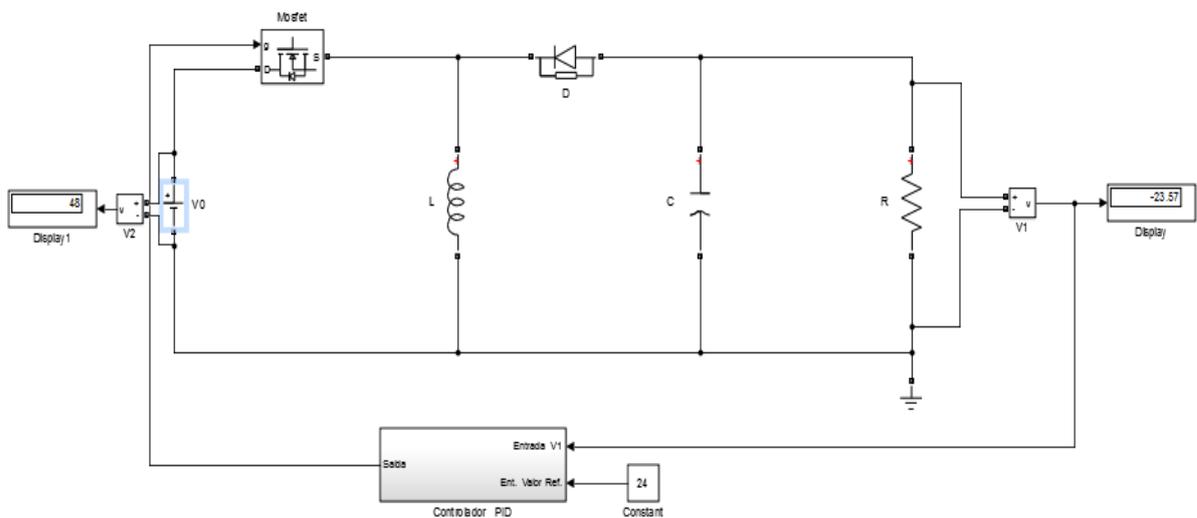
O controlado PID ficara na saída do conversor; pegando o valor da tensão de saída V1, atribui o ganho necessário do circuito, pegando o valor de referencia como parâmetro, para estabilizar o circuito, retornando ao circuito até estabilizar o conversor. Como ilustrada na figura 20 e figura 21. Tanto para elevador ou abaixador de tensão.

Figura 20 - Diagrama do Conversor Buck – Boost Elevador de tensão



Fonte: O próprio Autor (2018)

Figura 21 - Diagrama do Conversor Buck – Boost Abaixador de tensão



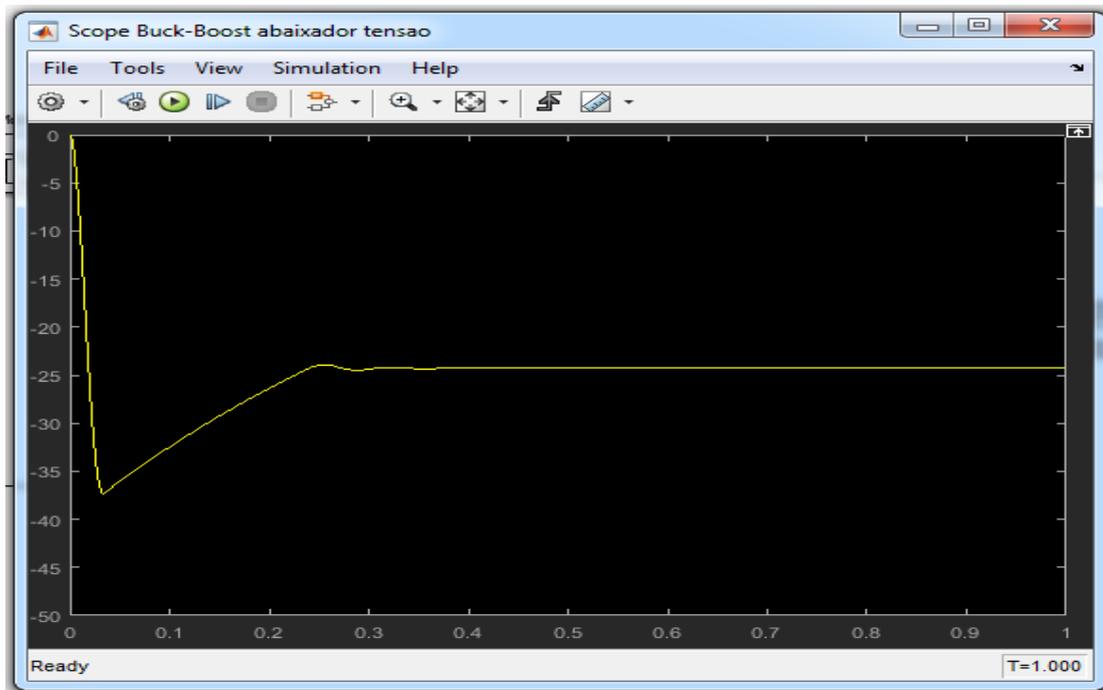
Fonte: O próprio Autor (2018)

### 3.1.3.2 Simulação

Através da simulação podemos comparar os conversores, para essa simulação analisaremos o do conversor Buck-Boost abaixador de tensão, tensão inicial  $V_0$  48 para a tensão de trabalho  $V_1$  24 V, ganho obtido pelo controlador PID no conversor Buck-Boost, a tensão de saída se manteve estável com o controlador atuando.

As comparações entre os dois foram obtidas através da ferramenta Scope, do Simulink, a simulação teve duração de 1s, como veremos na figura 22 e figura 23 abaixo.

Figura 22 - Simulação do Conversor Buck - Boost abaixador de tensão



Fonte: O próprio Autor (2018)

Figura 23 - Simulação do Conversor Buck – BoostPID abaixador de tensão

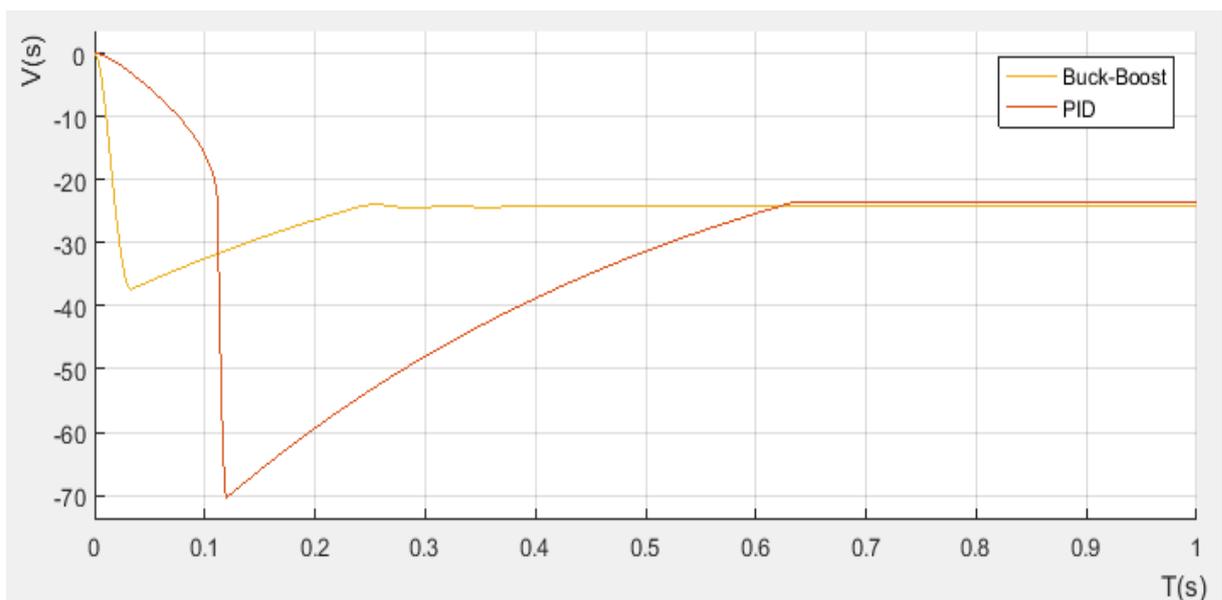


Fonte: O próprio Autor (2018)

### 3.1.3.3 Resultado

A simulação do mostra que conversor Buck – Boost estabilizou primeiro em comparação ao conversor com sistema de controle, mas pelo fato de ter o reajuste automático, o sistema de controle leva alguma vantagem sobre o conversor tradicional, como ilustrado pelo gráfico 3.

Gráfico 3 - Resultado da comparação conversor Buck - Boost abaixador de tensão com Controlador PID



Fonte: O próprio Autor (2018)

## 3.2 Interface

A interface do supervisor foi toda elaborada na plataforma do Matlab, a GUI (do inglês, *Graphical User Interface*, Interface Gráfica do Usuário), para o projeto de simulação dos conversores Choopers.

### 3.2.1 GUI

O processo de elaboração da Interface levou em consideração um usuário final, portanto teve como objetivo, uma interface simples, amigável, funcional e uma organização dos elementos da GUI.

A criação da Interface deve conter alguns componentes principais, citados: A escolha dos Conversores, Valores de entradas dos componentes eletrônicos e A simulação dos Conversores

Para que os componentes acima fossem incorporados na Interface elaborada, optou-se por criar um *layout*, com três seções: Conversores, Componentes e Simulação. Para que tanto o estudante ou professor possam ver claramente as informações, mostrada pela interface.

Os objetivos a serem alcançados na elaboração da GUI, foram definidos para garantir que a mesma operasse de maneira eficiente, levando em conta a interação do usuário.

#### 3.2.1.1 Criação da interface

Para construção da interface desejada, utilizou sete *Panels* de controle, como mostrado na tabela 2, onde serão informados *Tag* e *Title* de cada de *Panel* bem como uma pequena orientação de suas funções.

O primeiro *Panel* servira de *Background*, ou seja, o TabManager criará no GUI uma janela que será alocados os outros *Panels*, para que mantenho uma posição na tela, o *background*. Os demais *Panels* criados corresponderão às funções da interface. Deste modo, o *background* deverá ter, por exemplo, TabA como *Tag*, enquanto o segundo *Panel* deverá ter a *Tag*, TabA1, e o terceiro TabA2 e assim por diante, respeitando sempre o prefixo e a ordem alfabética ou numeral.

Tabela 6 - *Panels* criados para construção do GUI

<b>Panel</b>	<b>Tag</b>	<b>Title</b>	<b>Descrição</b>
1º	TabA	Background	Painel que define o tamanho e a posição dos painéis
2º	TabA1	Conversores Choppers	Painel com os conversores
3º	TabA2	Componentes	Painel Componente
4º	TabA3	Simulação 1	Gráfico para os Conversores simples
5º	TabA4	Painel 1	Componentes Eletrônicos
6º	TabA5	Painel 2	Componentes Eletrônicos
7º	TabA6	Simulação 2	Gráfico para os conversores com controlador PID

Fonte: O próprio Autor (2018)

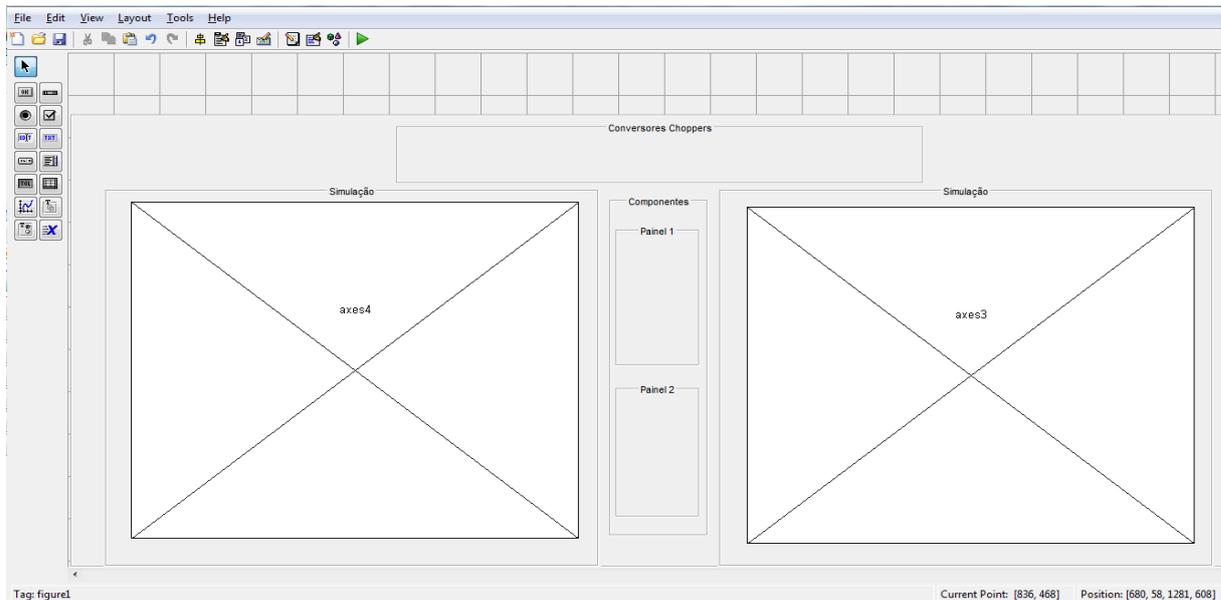
Os *Panels* já dimensionados ficaram predispostos, dimensionados eles possam ser exibidos na mesma imagem, como ilustrado na figura 24. Para os *Panels* serem iniciados juntamente do GUI, teve alocar a função `TabManager.m` no mesmo diretório onde está a GUI, utilizou-se a linha de código, mostrada no quadro 1, na *opening function*, função que é a primeira a ser executado e aberta pelo GUI.

Quadro 1 – Inicialização do TabManager

```
handles.tabManager = TabManager(hObject);
```

Fonte: O próprio Autor.

Figura 24 - *Panels* utilizados no GUIDE para construção da Interface

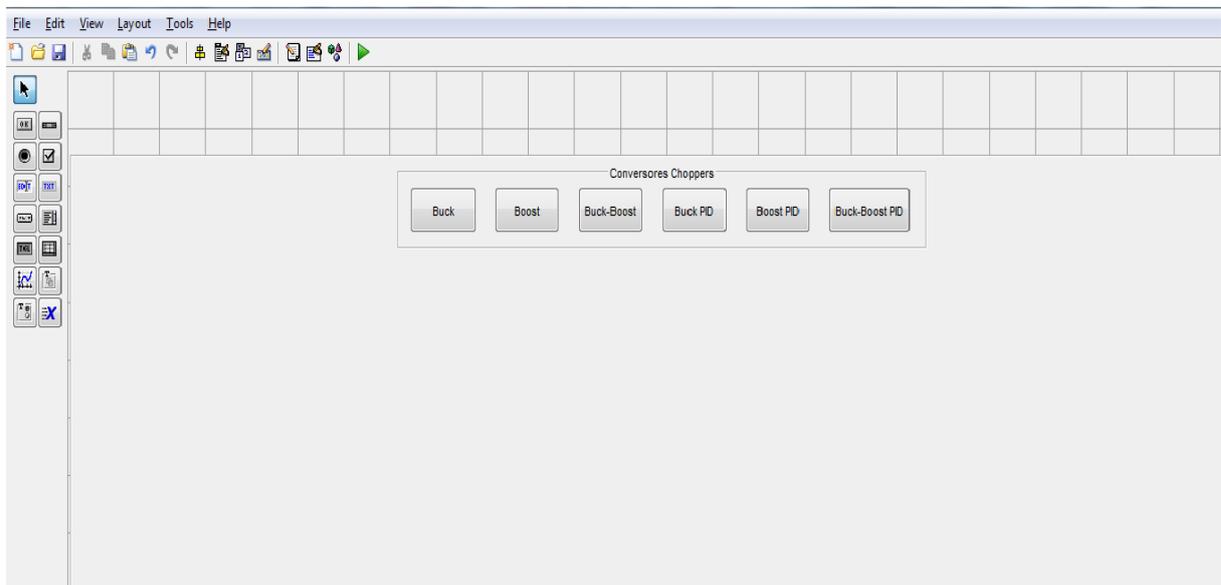


Fonte: O próprio Autor (2018)

### 3.2.1.2 Painel Conversores Choopper

O segundo *Panel*, onde ficaram alocados os conversores, de modo que o estudante e o professor veja facilmente na interface, como foi construído no *GUIDE*, demonstrado pela figura 25.

Figura 25 - *Panel* da construção dos Conversores Choopper



Fonte: O próprio Autor (2018)

Como podemos observar, a seis tipos de conversores, onde permitirá ao usuário, a seleção de qual conversor irá querer escolher. Sua seleção será feita pelo *Pushbutton*, que terá função de escolher qual conversor ir buscar no Simulink.

Mas a primeiro momento para simulação da Interface as funções dos *Pushbutton* terá a função de puxar as imagens simuladas no Simulink, por esse motivo as simulações já estarão prontos, como demonstradas no capítulo anterior.

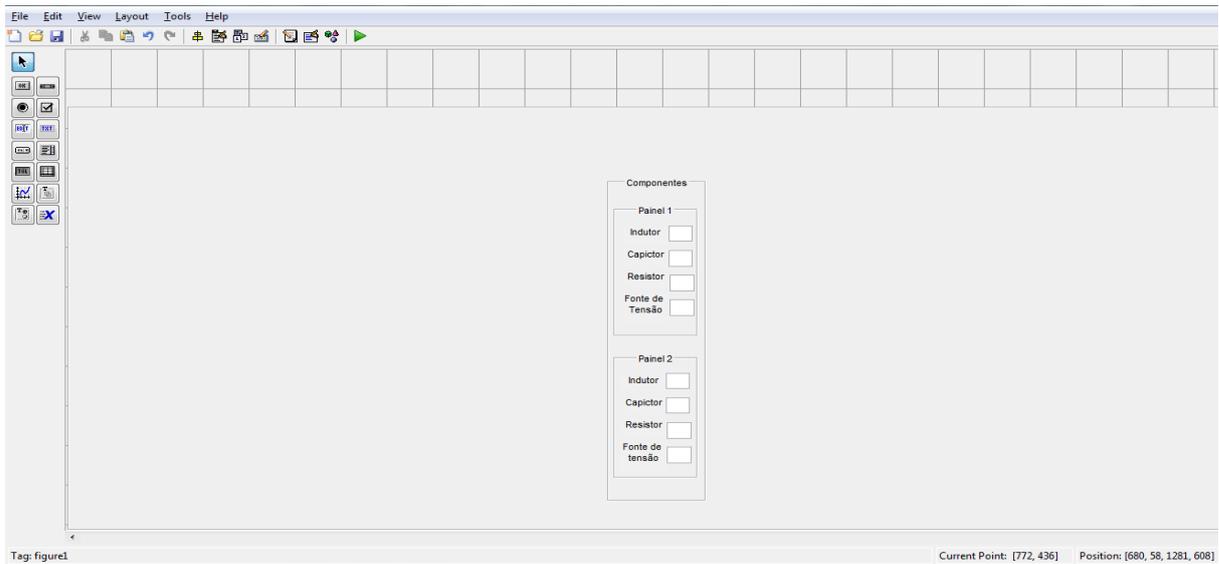
Para chamar as imagens com as simulações, a ser exibidas na interface, o quadro 2 mostrará os comandos que foram utilizados na programação.

Quadro 2 – Comandos para exibição da simulação das imagens.jpg

```
axes(handles.axes1);  
im=imread('Buck.jpg');  
imshow(im);
```

### 3.2.1.3 Painel de Componentes

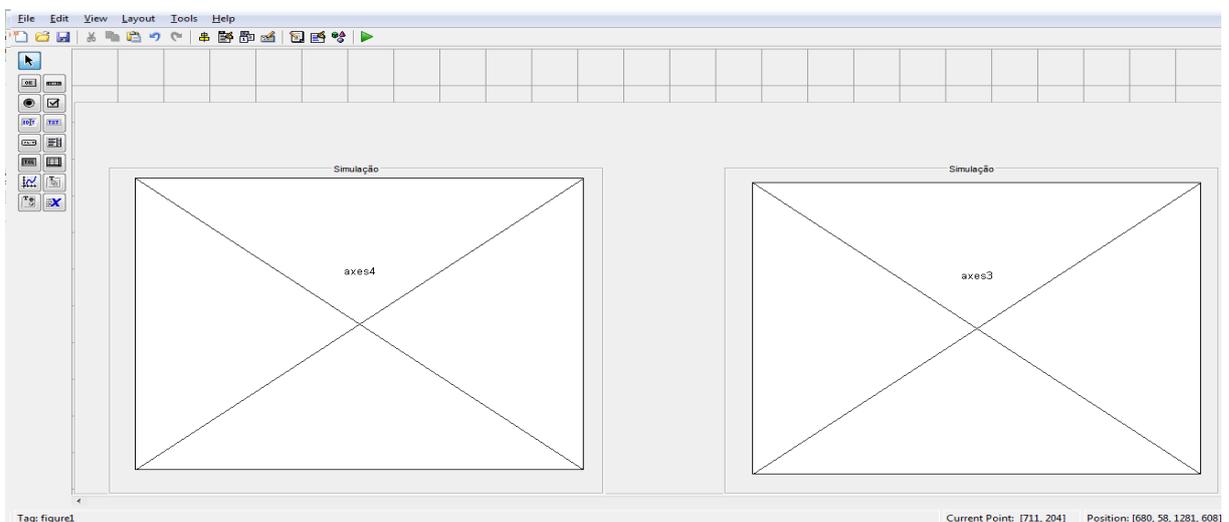
O terceiro *Panel*, onde ficaram os componentes eletrônicos dos conversores, mostrando os valores dos componentes, portanto assim quando o usuário escolher qual conversor irá simular, aparecerão os valores dos componentes, para isso foi criado outros dois *Panel*, sendo o Painel 1 para o primeiro conversor selecionado e Painel 2 para o segundo selecionado, p foi utilizado à ferramenta *Edit Texte Static Text*. A figura 26 mostrará a organização do Painel de Componentes.

Figura 26 - *Panel* da construção dos Componentes Eletrônicos

Fonte: O próprio Autor (2018)

### 3.2.1.4 Painel Simulação

O quarto *Panel* e sétimo *Panel*, como ilustrado na figura 27, ficarão os gráficos da simulação dos conversores selecionados, nele o usuário final poderá comparar os ganhos, o valor da tensão de entrada e da tensão de saída, analisar qual conversor irá querer utilizar para seu projeto, a ferramenta utilizada do GUI foi Axes.

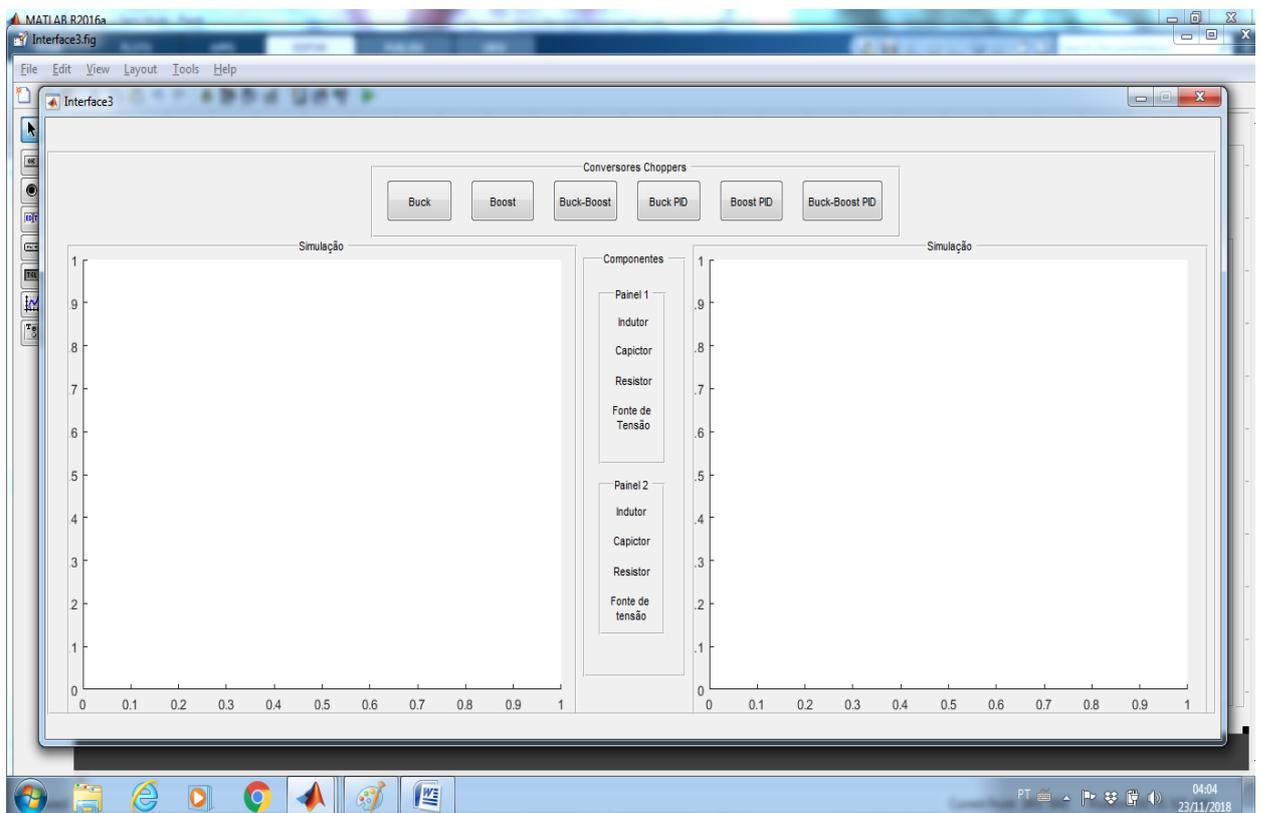
Figura 27 - *Panel* de construção Simulação

Fonte: Próprio Autor (2018)

### 3.2.1.5 Interface

Na figura 28 será demonstrada a interface, nela eles poderão fazer as simulações no Simulink de um modo prático, na parte cima da interface esta alocada o conjunto de conversores, de modo que o estudante e o professor poderá escolher qual conversor irá utilizar, abaixo dele vem o painel de componentes que nele será alocado os valores de todos os componentes usados para simulação e do lado dois painéis para a simulação dos conversores.

Figura 28 - Interface para simulação dos conversores Choppers

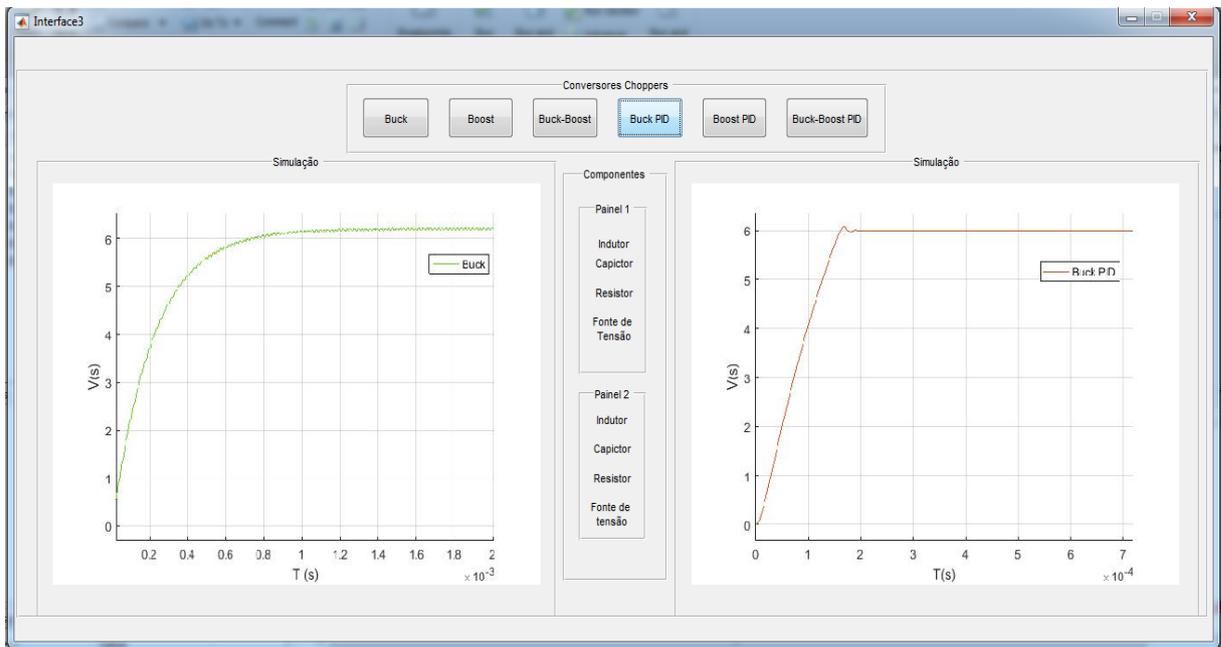


Fonte: O próprio Autor (2018)

### 4.2.1.6 Interface simulação

Para motivo de teste da interface utilizei imagens tiradas das simulações dos conversores, já que a interface não conseguiu fazer a comunicação necessária com o Simulink, desta forma, foram utilizadas as imagens das simulações do conversor Buck, juntamente do controlador PID. Conforme a ilustração na figura 29.

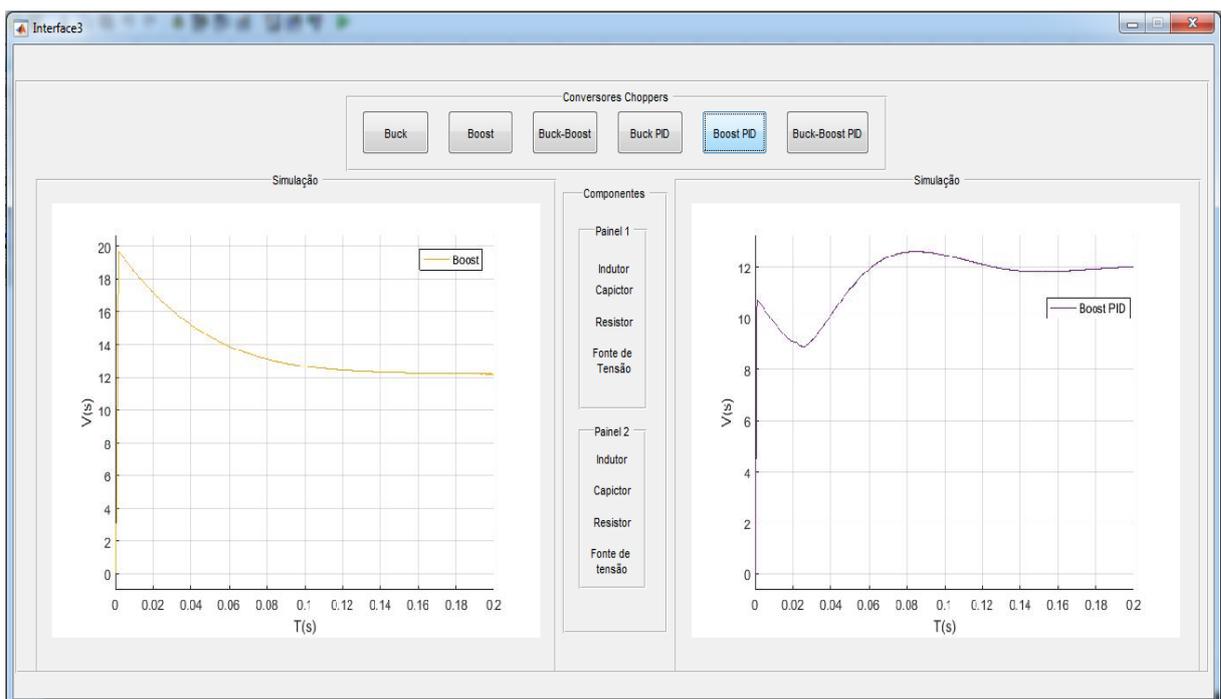
Figura 29 - Simulação da Interface com Conversor Buck



Fonte: O próprio Autor (2018)

Agora usaremos o conversor Boost juntamente com controlador PID para a simulação da Interface. Como demonstrado na figura 30.

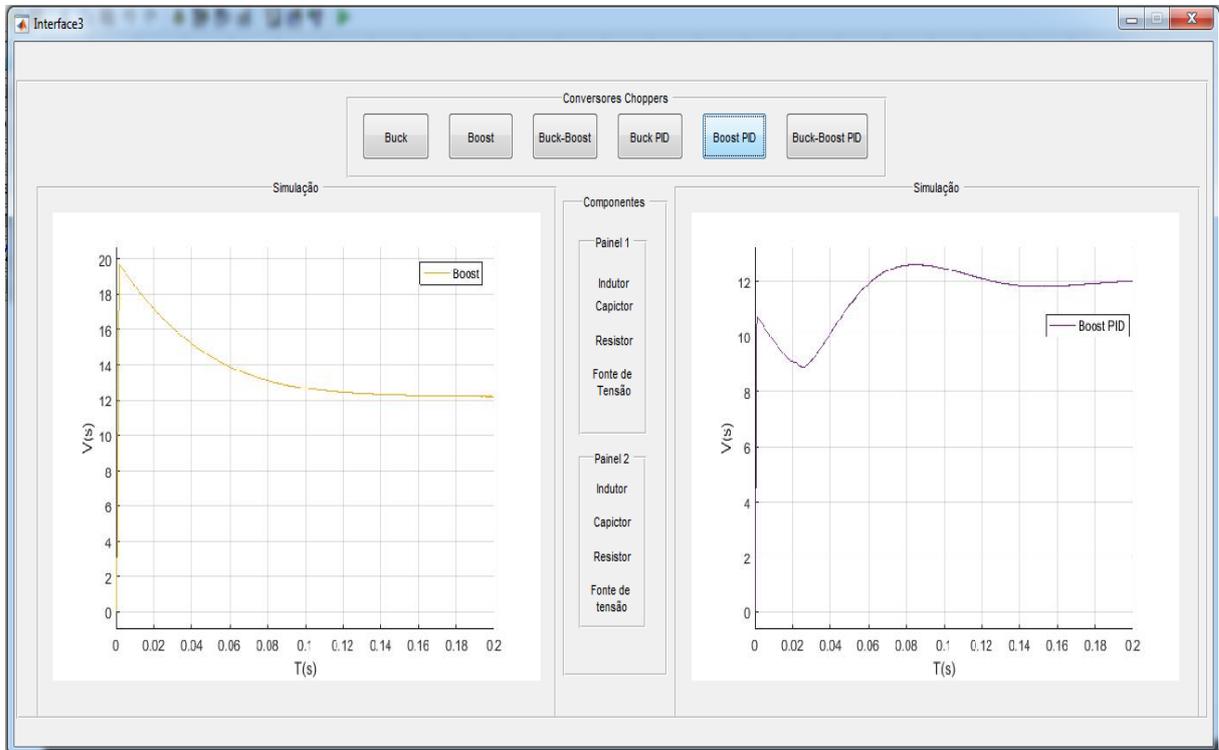
Figura 30 - Simulação da Interface com Conversor Boost



Fonte: O próprio Autor (2018)

Para ultima simulação da Interface, será com o conversor Buck-Boost, juntamente com o controlador PID, Como ilustrado com a Figura 31.

Figura 31 - Simulação da Interface com Conversor Buck - Boost



Fonte: O próprio Autor (2018)

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta inicial de estar criando um supervisor didático para aplicação aos conversores Choppers, através do Matlab, não obteve o esperado, pelo fato da interface não ter conseguido a comunicação necessária, para está fazendo as alterações dos valores de todos os componentes eletrônicos e demonstrar as simulações dos conversores em tempo real.

Portanto a comunicação entre as duas ferramentas do Matlab, Simulink e a Guide não cumpriu a proposta inicial, por outro lado meu ganho acadêmico através dessa experiência foi enorme, visualizando as simulações no Simulink, pode observar o ganho obtido pelo sistema de controle, como funciona cada tipo de conversor, toda plataforma que o software Matlab fornece ao meio acadêmico, facilitando aprendizagem do estudante e auxiliando o professor da matéria de eletrônica de potência ou em qualquer outra matéria.

Construção dos conversores Choppers juntamente com o controlador PID, na ferramenta do Matlab ficou no aspecto simples, de fácil visualização, nele notamos as tensões de entrada e saída de cada conversor, o ganho com a utilização do controlador PID através de gráficos, e do *Scope* (ferramenta de amostragem de parâmetros do Simulink) e gerando imagens das simulações para a interface.

Já a interface do projeto apresentou um *layout* simples e limpo, onde o usuário terá em seu campo de visão, todos os elementos necessários para ver a simulação, sendo que o próprio usuário querendo fazer alguma alteração na simulação e queira ver a simulação na interface, basta a salvar a imagem com o formato *imagen.jpg* e ir à função da programação do botão e colocar o nome que ele salvou da simulação, ou seja, sua flexibilidade nessa questão e muita prática, se caso o professor queira a vim a utilizar essa interface em sala de aula, basta criar um banco de imagens de acordo com seu planejamento de aula.

A partir do que foi exposto acima, segue algumas sugestões de proposta para trabalho futuros:

- a) Ter um local específico na interface para pode alocar varias imagens das simulações, assim ficando, mas fácil suas utilizações.

- b)** Permitir a impressão dos circuitos elaborados no próprio Simulink.
- c)** Conseguir fazer a interface ter uma comunicação direta com as simulações.

## REFERÊNCIAS

ALIANE, Nouridine. A MATLAB/Simulink-based interactive module for servo systems learning. **IEEE Transactions on Education**, v. 53, n. 2, p. 265-271, 2010.

BARBI, I. *Eletrônica de potência*, Ed. do Autor, 6 edição, Florianópolis, 2005.

BEGA, Egídio A.; FINKEL, Vitor S.; KOCH, Ricardo; *Instrumentação industrial*, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Rio de Janeiro, 2006.

BRUMATTI, M. *Eletrônica de Potência. Automação Industrial*. Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo – CEFET/ES.

ENOCKSSON, Staffan. Modelando em MathWorks Simscap construindo um modelo de uma caixa de câmbio automática. 2011

JAUMOT, Joaquim et al. A graphical user-friendly interface for MCR-ALS: a new tool for multivariate curve resolution in MATLAB. **Chemometrics and intelligent laboratory systems**, v. 76, n. 1, p. 101-110, 2005.

HART, D. W. *Eletrônica de potência*. AMGH editora Ltda., pagina 197-259,5. 2012.

MOHAN, N., UNDELAND, T. M., ROBBINS, W. P. "Conversores, Aplicações e Design ", 2ª Ed. John Wiley & Sons, Inc. Nova Iorque, 1995.

MOORE, Holly. **MATLAB for Engineers**. Pearson, 2017.

PETRY, C. A. (INEP/EEL – UFSC). Agosto de 2001.

SMITH, Scott T. MATLAB: advanced GUI development. Dog ear publishing, 2006.

VARGAS, Alessandro. Princípios de Controle, UTFPR.

ZIEGLER, John G; NICHOLS, Nathaniel B. Configurações ótimas para controladores automáticos. **trans. ASME**, v. 64, n. 11, 1942.