

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUÍS FERNANDO FUNARI GOMES

**MODELAGEM DE UMA FONTE DE CORRENTE CONTÍNUA
CONTROLADA COM CONVERSOR BUCK**

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018

LUÍS FERNANDO FUNARI GOMES

**MODELAGEM DE UMA FONTE DE CORRENTE CONTÍNUA
CONTROLADA COM CONVERSOR BUCK**

Proposta para Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à disciplina de Trabalho De Conclusão De Curso 2, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Scannavino Júnior.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Luís Fernando Funari Gomes

Modelagem de uma fonte de corrente contínua controlada utilizando conversor buck

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 16:00hs do dia 01/11/2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Francisco de Assis Scannavino Junior - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Rodrigo Augusto Modesto - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Kleber Romero Felizardo - (Membro)

Dedico este trabalho aos meus avós Arlete Dias Funari e Dirceu Funari que sempre foram referência de seres humanos em minha vida, torceram por mim durante a graduação e hoje cuidam de mim lá do céu.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pelo dom da vida, por ser um Pai que nunca desiste de mim e a Nossa Senhora que sempre intercede meu caminho, guia e ilumina meus passos.

Todo o meu amor e gratidão aos meus pais, Edson Gomes e Maria Lúcia Funari Gomes, e ao meu irmão Luís Eduardo Funari Gomes, que proporcionaram uma formação de qualidade, que me motivaram e deram um sentido maior para minha vida.

Agradeço também, ao meu orientador, Professor Doutor Francisco de Assis Scannavino Junior, grande amigo, que com sua paciência e sabedoria sempre soube me tranquilizar.

Aos professores doutores Rodrigo Augusto Modesto e Cristiano Marcos Agulhari que me auxiliaram nos conhecimentos teóricos, disponibilizando materiais necessários e sanando todas as minhas dúvidas.

Ao engenheiro, quase mestre, Herman Lucas dos Santos, que conheço desde pequeno e que, com sua generosidade, não poupou esforços para o auxílio na realização das simulações deste estudo.

Aos meus primos Ana Luísa Funari Pimenta e Elcio Faria Pimenta Filho que, nos momentos de cansaço, deram ouvidos para meus desabafos, além do auxílio com as traduções da língua inglesa.

A todos os colegas e todo o corpo docente do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, bem como ao Diretório Acadêmico da Elétrica e ao Cursinho Prisma, que fizeram do meu período de graduação um grande aprendizado nos mais diversos âmbitos.

Por fim, mas não menos importante, todo o meu amor e gratidão à prima, professora e doutora Roberta Negrão de Araújo, que não só auxiliou com a correção ortográfica e com a formatação deste, como foi a maior incentivadora e o maior exemplo profissional que tenho na vida.

Em síntese, agradeço a todos que contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

GOMES, Luís Fernando F. Modelagem de uma fonte de corrente controlada com conversor buck. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

RESUMO

Fontes de Corrente fornecem os valores de corrente independentemente da carga a qual for ligada. Tem extrema importância para todo graduando de Engenharia Elétrica, já que se refere a uma significativa área do referido curso. O presente estudo caracteriza-se como uma complementação teórica no âmbito da construção de uma fonte de corrente utilizando um conversor *buck* que, por sua vez, tem por objetivo baixar a tensão do circuito elétrico. Assim, pretende-se com esta pesquisa, oportunizar a criação de um futuro protótipo de uma fonte de corrente controlada para aplicação nas bancadas dos laboratórios da Universidade. Tal fonte utiliza um conversor *buck* e a topologia estudada neste trabalho visa suprir uma necessidade de uma carga fixa de 100Ω , com possibilidade de fornecimento de corrente entre 5 mA à 1 A. A validação do protótipo da fonte de corrente controlada foi realizada por simulação através do software *Matlab/Simulink*.

Palavras Chave: Fontes de Corrente, conversor *buck*, controle.

GOMES, Luís Fernando F. Development of a controlled current source using *buck* converter, 2018. Completion of course work – Electrical Engineering. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

ABSTRACT

Current sources provide the value of current regardless of the load of their connected charge. It has utmost importance for every electrical engineer student, since it is referring to a major subject of graduation. The present study is characterized as a theoretical complementation of a current source with a buck converter that aims to lower the voltage of the electric circuit. The main goal of the study is to create a source's prototype for using in lessons at University, in order to develop a micro controlled current source with a buck converter for didactic purposes. The topology in this study aims to supply a load of $100\ \Omega$, with a current source between 5mA a 1A. The approval of the controlled current source will be performed by software, as Matlab/Simulink.

Keywords: Current source, buck converter, Simulink.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	3
1.2 JUSTIFICATIVA	4
1.3 OBJETIVOS	4
1.3.1 Objetivo Geral	4
1.3.2 Objetivos Específicos	5
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1 RESISTOR ELÉTRICO	6
2.2 CAPACITOR	6
2.2.1 Capacitância	7
2.3 INDUTOR	7
2.3.1 Indutância	7
2.4 DIODOS	7
2.5 FILTROS	8
2.5.1 Filtros RC	8
2.5.2 Filtros RLC	9
2.6 TRANSISTORES	10
2.6.1 Filtros de Efeito de Campo	12
2.7 CONVERSORES CC-CC	13
2.7.1 Conversores Buck	13
2.7.2 Conversores Buck operando de modo contínuo	17
2.8 SISTEMA DE CONTROLE	17
2.8.1 Controladores Automáticos	18
2.8.1.1 Controladores Proporcionais	18
2.8.1.2 Controladores Proporcional Integrativo	18
2.8.1.3 Controladores Derivativo	19
2.8.1.2 Controladores Proporcional Derivativo - Integrativo	19
3 DESENVOLVIMENTO E METODOLOGIA	20
3.1 PROJETO DO INDUTOR E CAPACITOR	21
3.1.1 Cálculo do Fio de Cobre	21
3.1.2 Cálculo do Indutor	21
3.1.3 Cálculo do Capacitor	22
3.1.4 Cálculo da Resistência série do Capacitor e do Indutor	23
3.2 TRANSISTORES	25
3.3 MODELAGEM DO CONVERSOR EM CONDIÇÃO CONTÍNUA	25
3.3.1.1 Função transferência do conversor $V_o(s)/d(s)$	26
3.3.1.2 Função transferência do conversor $I_o(s)/d(s)$	29
3.3.2 Característica dinâmica do conversor <i>buck</i>	30
3.3.2.1 Função transferência do conversor $V_o(s)/d(s)$ considerando a característica dinâmica	30
3.3.2.2 Função transferência do conversor $I_o(s)/d(s)$ considerando a característica dinâmica	33
4 OBTENÇÃO E ANÁLISE DE DADOS	34
4.1 PROJETO DO CONVERSOR	34
4.2 SIMULAÇÃO DO CONVERSOR EM MALHA ABERTA	35
4.3 SIMULAÇÃO DO CONVERSOR EM MALHA FECHADA	38
4.3.1 Simulação da Fonte de Corrente	38
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
REFERÊNCIAS	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Filtro RC.....	8
Figura 2 - Filtro RLC com ligações em série	9
Figura 3 - Filtro RLC com ligações em paralelo	9
Figura 4 - Representação de um transistor	10
Figura 5 - Configuração de um transistor	11
Figura 6 - Fonte de corrente utilizando transistor com a carga no emissor	11
Figura 7 - Fonte de corrente utilizando transistor com a carga no coletor.....	12
Figura 8 - Fonte de corrente utilizando transistor com a carga no emissor	12
Figura 9 - Conversor CC-CC e forma de onda da tensão de saída.....	13
Figura 10 - Diagrama do conversor Buck.....	14
Figura 11 - Diagrama equivalente do conversor Buck.....	14
Figura 12 - Formas de onda do conversor Buck (condução contínua).....	15
Figura 13 – Sistema de malha fechada.....	17
Figura 14 – Parâmetros do núcleo de ferrite EE genérico.....	24
Figura 15 – Modelo simplificado do conversor buck.....	26
Figura 16 – Alternativas topológicas de conversor abaixador de tensão	30
Figura 17 – Conversor buck simulado no Psim	35
Figura 18 - Formas de ondas obtidas para V_o , I_L e I_o utilizando D_{min}	36
Figura 19 - Formas de ondas obtidas para V_o , I_L e I_o utilizando D_{max}	37
Figura 20 – Esquemático do projeto no Matlab/Simulink	39
Figura 21 – Resposta ao degrau utilizado no sistema.....	40
Figura 22 – Ajuste no ganho do controlador.....	41
Figura 23 – Gráfico referente a ação de controle utilizando referência 0,006	42
Figura 24 – Gráfico referente a corrente na saída utilizando referência 0,006.....	42
Figura 25 – Gráfico referente a ação de controle utilizando referência 0,05	43
Figura 26 - Gráfico referente a corrente na saída utilizando referência 0,05	44
Figura 27 – Gráfico referente a ação de controle utilizando referência 0,2	44
Figura 28 - Gráfico referente a corrente na saída utilizando referência 0,2	45
Figura 29 – Gráfico referente a ação de controle utilizando referência 0,5	45
Figura 30 - Gráfico referente a resposta na saída utilizando referência 0,5.....	46
Figura 31 – Gráfico referente a ação de controle utilizando referência 0,78	46

Figura 32 - Gráfico referente a corrente na saída utilizando referência 0,78	47
Figura 33 – Gráfico refernte a ação de controle utilizando referência 0,9	47
Figura 34 - Gráfico referente a corrente na saída utilizando referência 0,9	48
Figura 35 – Gráfico refernte a ação de controle utilizando $K_p= 0,2$ e referência 0,05	49
Figura 36 - Gráfico referente a corrente na saída utilizando $K_p= 0,2$ e referência 0,05	49
Figura 37 – Gráfico refernte a ação de controle utilizando $K_p= 0,4$ e referência 0,05	50
Figura 38 - Gráfico referente a corrente na saída utilizando $K_p= 0,4$ e referência 0,05	51

LIS TA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de Especificações de Resistência Série	23
Tabela 2 – Projeto do Conversor Buck.....	34
Tabela 3 – Valores de Máximo e Mínimo utilizando Dmin.....	37
Tabela 4 – Valores de Máximo e Mínimo utilizando Dmax.....	37
Tabela 5 – Dados de validação do projeto	38

1 INTRODUÇÃO

Quando se fala em fontes de correntes nota-se que, durante a graduação, muitos acadêmicos têm dificuldade de evidenciar os resultados e valores, bem como compreender todo o processo realizado para a obtenção destes apenas por simulações. Isto porque diferentemente dos geradores de tensão, elas não possuem aplicações dentro da área acadêmica.

Uma fonte de corrente ideal é um bipolo, que fornece uma corrente de valor fixado em função do tempo, independentemente do valor da tensão entre seus terminais (ORSINI, 2002).

Existem várias maneiras de se construir uma fonte de corrente. Para uma fonte de corrente com caráter didático utiliza-se uma fonte de tensão com uma resistência em série de alto valor. Vale ressaltar que as fontes de corrente precisam de resistores e transistores em sua construção (ALBUQUERQUE, 2001).

Uma maneira mais dinâmica de criar uma fonte de corrente é utilizando controladores, que combinados com os transistores e amplificadores operacionais torna-se possível fazer o controle da corrente fornecida à carga, deixando-a no valor ajustado na fonte (SOUZA, 2015).

O presente estudo caracteriza-se como uma complementação teórica no âmbito relacionado à construção de uma fonte de corrente utilizando um conversor *buck*. Dessa forma, espera-se, através de uma carga fixa, conseguir medir valores de corrente entre 5 mA a 1 A.

Uma de suas aplicações a ser analisada é a possibilidade de determinar os valores da corrente dentro de um circuito elétrico.

Por fim, torna-se necessária uma análise da viabilidade da construção da fonte, desde a aplicação do controlador ideal até uma simulação da maneira mais próxima aos valores reais, com componentes disponíveis no mercado e com os valores relacionados às bancadas do laboratório da instituição.

Dessa maneira, este trabalho oportuniza a criação de um protótipo da fonte para utilização nos cursos de Engenharia Elétrica, Engenharia de Controle e Automação e de Engenharia Eletrônica.

1.2 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de uma fonte de corrente controlada tem como utilidade principal ser um complemento na formação de um graduando de Engenharia Elétrica, pois é uma maneira de visualizar o que foi aprendido na teoria e que por ventura pôde ser simulado em softwares. Portanto, para complementar a formação do discente e como forma de aprimorar os conceitos vistos durante a graduação, o aluno discorre sobre a produção de uma fonte de corrente contínua controlada utilizando um conversor Buck.

Os materiais de apoio elaborados neste trabalho então, visam auxiliar não só os alunos do curso, mas também qualquer pessoa interessada em se aprofundar no estudo e elaboração de fontes de corrente controladas utilizando tais conversores.

O trabalho também desenvolve uma função de aprimorar e visualizar a implementação dos circuitos em malha aberta e malha fechada em dois softwares distintos, os quais o aluno teve acesso durante o período de graduação.

O resultado final desta pesquisa ficará disponível para os acadêmicos, em especial aos matriculados na disciplina de Circuitos Elétricos, sendo possível que outros acadêmicos aprimorem os dados e criem um protótipo desta fonte, através de novos ajustes.

Outras disciplinas que tem conceitos necessários para o desenvolvimento deste trabalho são: Eletrônica de Potência, Eletrônica Analógica, Sistemas Microcontrolados e Princípio e Sistemas de Controle.

Pretende-se com esta pesquisa, um futuro protótipo da fonte para aplicação nas bancadas dos laboratórios da Universidade.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Modelagem de uma fonte de corrente controlada que utiliza o conversor Buck para fins didáticos.

1.3.2 Objetivos Específicos

Tem-se como objetivos específicos deste estudo:

- Estudar a condução de um conversor Buck.
- Desenvolver uma fonte com um sistema de malha aberta.
- Analisar corrente de saída e tensão de saída em um sistema de malha aberta.
- Estabelecer parâmetros iniciais do projeto.
- Dimensionar indutor, capacitor, resistência série do capacitor e indutor.
- Estudar os controladores de um sistema com malha fechada.
- Desenvolver as funções transferência do sistema com malha fechada.
- Modelar o sistema a ser implementado.
- Estudar conceitos relacionados ao controle de um sistema, tais como a resposta e a função degrau.
- Analisar comportamento gráfico da razão cíclica.
- Analisar comportamento gráfico da corrente de saída do sistema em malha fechada.
- Validar o projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Uma fonte de corrente controlada é desenvolvida com o estudo profundo de conceitos que conciliam a área da eletrônica, da programação e do controle de sistemas, tais conceitos classificam-se em triviais para quaisquer engenheiros eletricitas bem como conceitos mais complexos referentes a aplicação de conversores e modelagem de controle.

A seguir, descrito neste item estão destacados os principais conceitos necessários para a realização desta pesquisa.

2.1 RESISTOR ELÉTRICO

Resistores elétricos são dispositivos elétricos que têm a função de limitar a corrente elétrica de um circuito. Os mais utilizados são chamados de resistores ôhmicos ou lineares, que obedecem a proporcionalidade entre a diferença de potencial, também chamada de tensão e a corrente elétrica, segundo a Primeira Lei de Ohm, dada pela equação (1) onde R é o resistor, com unidade em ohms [Ω], V é a tensão, dada em volts [V] e I a corrente elétrica, em Ampères [A].

$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$

2.2 CAPACITOR

Segundo Irwin, capacitores são dispositivos elétricos que têm o objetivo de armazenar energia elétrica. Ele é constituído de duas peças condutoras chamadas de armaduras separadas por um material não condutor denominado de dielétrico. Eles são classificados de acordo com o material dielétrico utilizado na sua composição.

São estruturas capazes de armazenar energia na forma de campo elétrico no seu processo de carga, liberando energia. São utilizados para diversas finalidades tais como na correção do fator de potência em correntes alternadas, como filtros e na aplicação de corrente contínua.

2.2.1 Capacitância

Todo capacitor tem um parâmetro chamado de capacitância, que serve para quantificar a capacidade de armazenamento da carga. Sua unidade é representada por F (Faraday).

2.3 INDUTOR

Ainda segundo o Irwin (2014), indutores, também conhecidos como bobinas ou solenoides, são componentes de um circuito que consistem de um fio condutor comumente em forma de bobina. São classificados de acordo com o material presente no seu interior, onde a bobina está enrolada.

Assim como os capacitores, têm a função de armazenar energia. O que diferencia estes disponíveis, é que neste caso, o armazenamento ocorre em forma de campo magnético.

2.2.2 Indutância

Indica a grandeza física relacionada aos indutores, sua medida é dada em H (Henry). É um parâmetro que relaciona a tensão induzida no campo magnético com a corrente que passa por ele.

2.4 DIODOS

São componentes eletrônicos semicondutores chamados de tipo N e tipo P que permitem a passagem de corrente elétrica em apenas um sentido. Existem diversas aplicações para os diodos, entre as quais, a atuação como retificador, convertendo tensão alternada em contínua.

Um dos inconvenientes na utilização do diodo é a dissipação de potência em forma de calor.

Esses compostos são fabricados a base de Silício ou de Germânio. O material do tipo N é um cátodo, material composto por impurezas penta valentes enquanto o tipo P é um ânodo, material composto por impurezas trivalentes, o que altera a sua condutividade. (SILVA, 2003)

2.5 FILTROS

Filtros são estruturas que objetivam em selecionar, igualizar ou rejeitar as frequências de um sinal elétrico. São muito utilizados em diversos campos de atuação, especialmente na eletrônica, na aquisição e processamento de sinais de audição, de telecomunicações, entre outros.

2.5.1 Filtros RC

Filtros RC são circuitos formados por resistores e capacitores que utilizam as características da reatância capacitiva para atenuar a corrente elétrica da entrada para a saída, conforme a frequência aplicada (MUSSOI, 2004).

Um filtro RC passa-baixa, é um filtro de primeira ordem, que permite a passagem de frequências baixas, reduzindo ou atenuando a amplitude das frequências maiores que a do seu corte. A Figura 1 mostra a composição de um filtro RC.

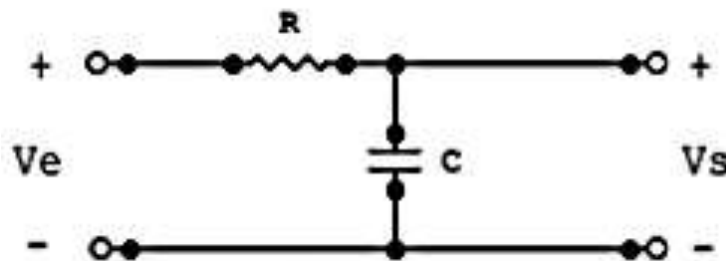


Figura 1 – Filtro RC

Fonte: Mussoi (2004).

A frequência de corte é calculada pela equação (2), onde f_c é a frequência de corte, R o valor da resistência e C o valor do capacitor.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2)$$

A função do filtro RC na fonte de corrente é que ele recebe um sinal alternado ou pulsante (PWM) e a partir desse sinal gere uma tensão constante na saída.

2.5.2 Filtros RLC

Filtros compostos por resistores, indutores e capacitores, também chamados de circuitos ressoantes e podem ser utilizados como filtros passa-baixa. São filtros de segunda ordem que possuem dois parâmetros, sendo eles: a frequência de ressonância e o fator de carga, que é a razão entre a energia ativa consumida e a energia máxima.

A Figura 2 representa os componentes: resistor, capacitor e indutor ligados em série.

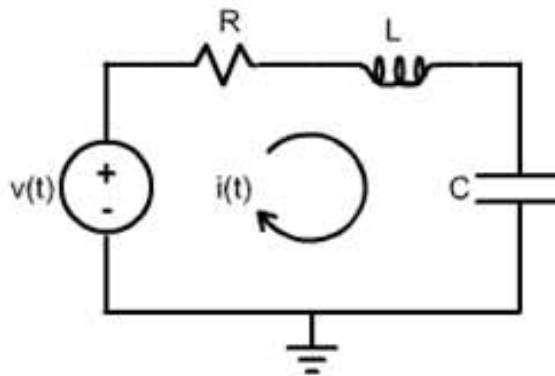


Figura 2 – Filtro RLC com ligações em série

Enquanto a Figura 3 apresenta os mesmos componentes ligados de três maneiras distintas usando o paralelo.

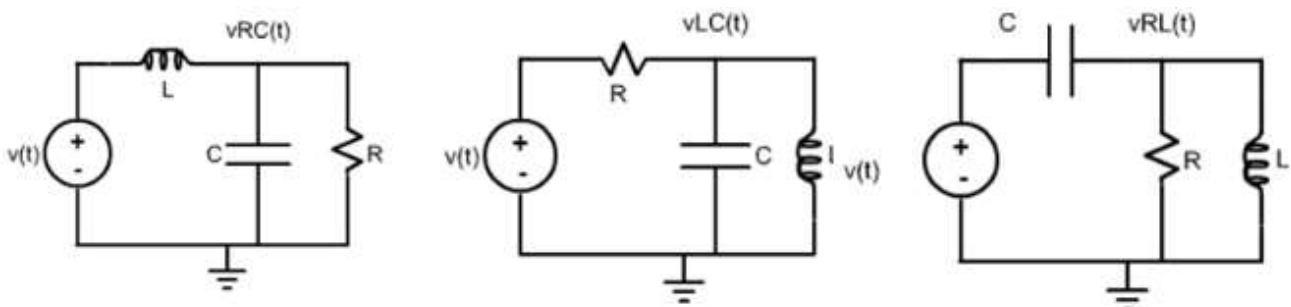


Figura 3 – Filtro RLC com ligações em paralelo

Fonte: Maxwell

Vale destacar que neste trabalho, o conversor *buck* utilizado tem a função de um filtro RLC.

2.6 TRANSISTORES

Transistores são dispositivos semicondutores, também chamados de resistores de transferência, que possuem três camadas, sendo duas dela de material do tipo n e uma do tipo p ou duas camadas do tipo p e uma do tipo n. Dentre muitas funções, uma das mais importantes é que eles são capazes de aumentar e chavear os sinais elétricos. Em ambas as configurações, o transistor é composto por um canal entre as regiões p e n. (BOYLESTAD, 2013).

Os transistores são pequenas chaves, formadas por três terminais, sendo eles: o dreno (*drain*) que é de onde os elétrons saem, a fonte (*source*) que indica onde os elétrons entram e a parte (*gate*) que é responsável por fazer o controle da passagem dos elétrons. (WENDLING, 2010)

Eles têm a função de controlar a passagem de corrente para o circuito e são amplamente utilizados como amplificadores ou interruptores de sinais dentro de um circuito elétrico.

Sua utilização tem uma gama de opções e estes são utilizados no cotidiano do ser humano, desde eletrodomésticos à laptops.

A Figura 4 ilustra uma estrutura básica do transistor. É composta pela base, coletor e emissor.

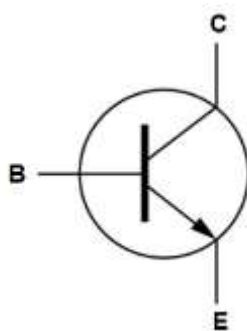


Figura 4 - Representação de um transistor

Fonte: Boylestad (2013).

O transistor pode apresentar diferentes tipos de configurações. Essas estão representadas pela Figura 5.

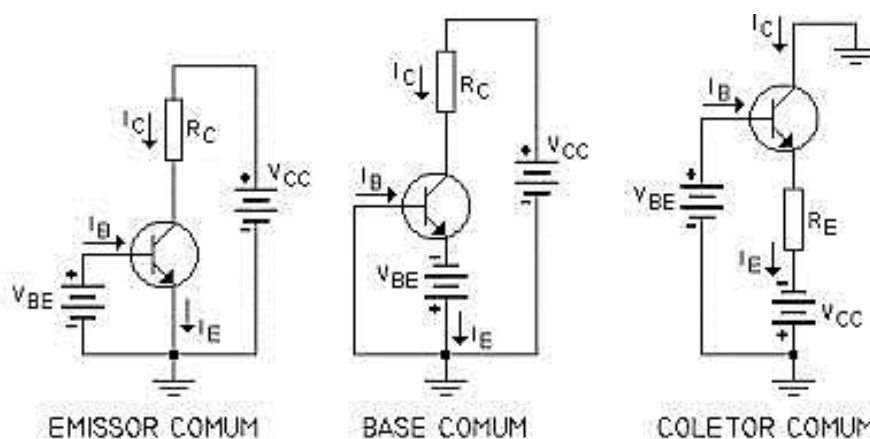


Figura 5 - Configuração de um transistor

Fonte: Boylestad (2013).

A Figura 6 tem-se um exemplo de fonte de corrente com um transistor bipolar, onde a polarização do transistor é dada pelo divisor de corrente R_1 e R_2 . Dessa forma, o valor de R_E é quem determina a corrente do emissor I_C , e assim, a corrente do coletor é a que está sobre a carga.

Já na Figura 7, tem-se um exemplo de configuração onde a carga é conectada no coletor R_E no emissor.

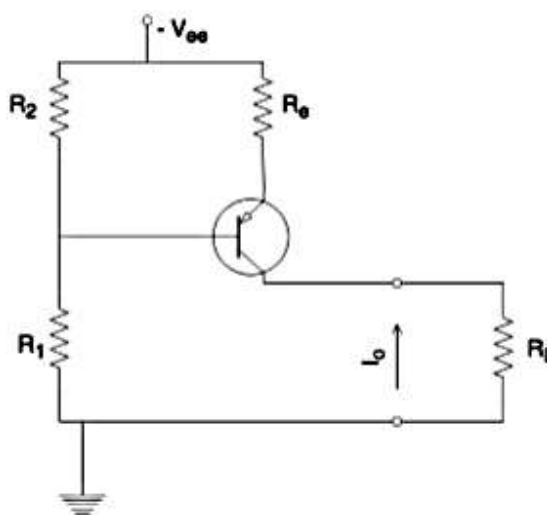


Figura 6 - Fonte de corrente utilizando transistor com a carga no emissor

Fonte: Brites (1981).

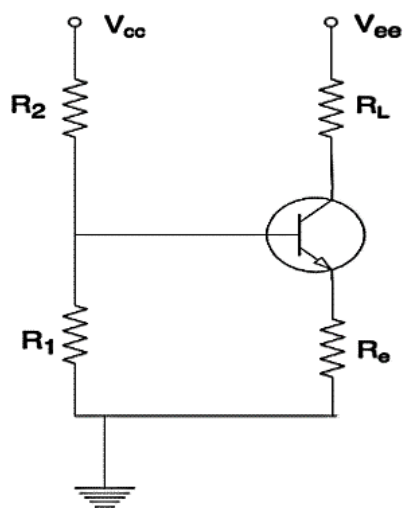


Figura 7 - Fonte de corrente utilizando transistor com a carga no coletor
 Fonte: Brites (1981).

2.6.1 Transistores de Efeito de Campo

A principal diferença entre os transistores bipolares e os de efeito de campo é que estes são tipicamente usados como amplificadores de tensão e não de corrente, como aqueles. Enquanto, em um transistor comum, a corrente é em função da base, em um transistor de efeito de campo, ela é função da tensão (BRAGA, 2014).

Na Figura 8 é possível observar a configuração de uma fonte de corrente para uma carga R_L utilizando transistores de efeito de campo.

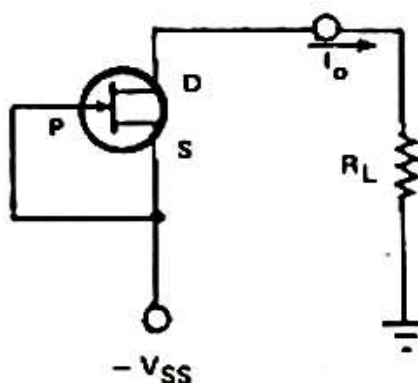


Figura 8 - Fonte de corrente utilizando transistor com a carga no emissor
 Fonte: Brites (1981).

2.7 CONVERSORES CC-CC

Conversores são dispositivos eletrônicos formados por semicondutores de potência, utilizados para converter uma tensão contínua em outra tensão contínua com um valor controlado. Eles operam como interruptores, e por elementos passivos, comumente indutores e capacitores, que tem como função controlar o fluxo de potência de uma fonte de entrada para uma fonte de saída. Tais conversores têm sido utilizados em várias aplicações, como por exemplo: equipamentos de telecomunicações e carregadores de bateria. (RODRIGUES, 2007)

A variável do controle do sistema de conversores é chamada de razão cíclica (*duty cycle*), representada por D , que possui valores no intervalo entre 0 e 1. Essa razão, em uma maneira simplificada, consiste na relação entre o tempo ligado e o período de um fenômeno que admite apenas dois estados, sendo eles: ligado e desligado.

2.7.1 Conversores *buck*

São circuitos mais simples utilizados para a conversão de CC/CC. São formados por um capacitor, um indutor, um diodo e um transistor. Com o auxílio do transistor é que se torna possível controlar o tempo de condução e corte, enquanto, na utilização do diodo, o tempo e o corte são definidos pela condição de operação do conversor (MELLO, 2012).

O conversor *buck* é utilizado para reduzir a tensão da saída em relação à tensão de entrada de uma maneira eficiente.

A Figura 9 mostra-se o diagrama elétrico e a forma de onda da tensão de saída de um conversor CC-CC básico. Admite-se T_{on} como o tempo em que a chave está aberta e T_s o tempo total do ciclo do conversor.

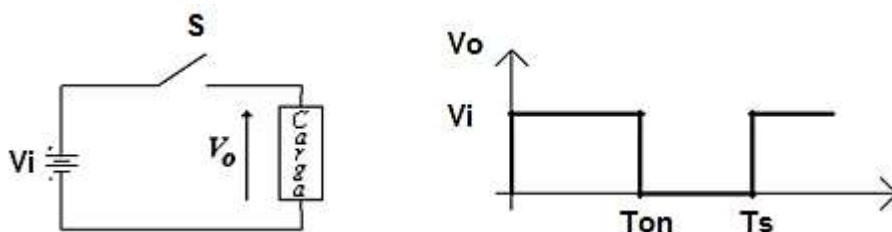


Figura 9 - Conversor CC-CC e forma de onda da tensão de saída

O diagrama do circuito do conversor Buck está mostrado na Figura 10. Como pode ser observado neste diagrama um filtro LC é colocado no estágio de saída de forma que a tensão de saída seja contínua e com baixa ondulação. Já a Figura 11 mostra um circuito equivalente do conversor *buck*.

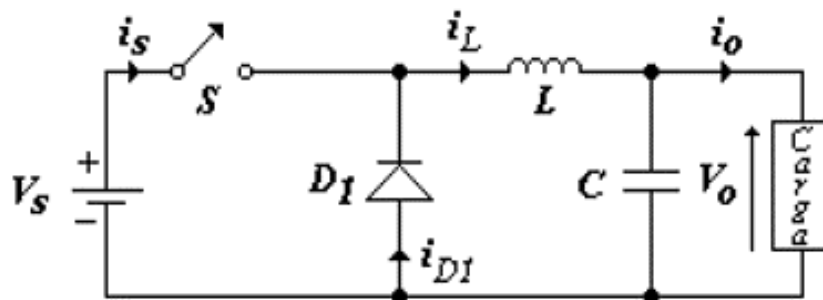


Figura 10 - Diagrama do conversor Buck

Fonte: Barbi (2005).

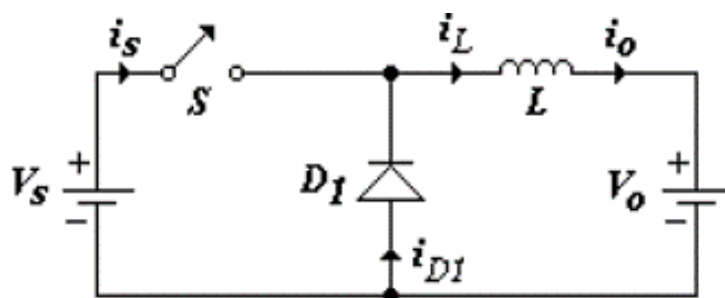


Figura 11 - Diagrama equivalente do conversor *buck*

Fonte: Barbi (2005).

Admitindo condução contínua, onde a corrente do indutor não se anula em nenhum instante dentro de um ciclo, as formas de onda são dadas pela Figura 12.

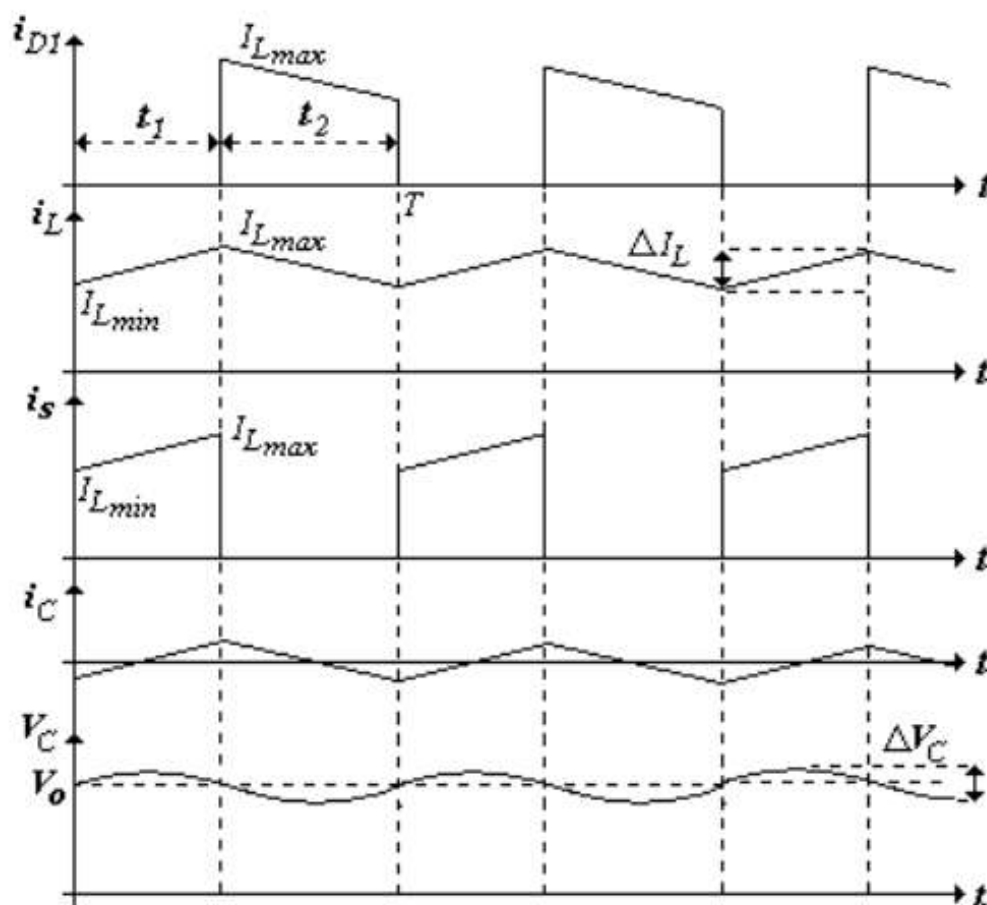


Figura 12 - Formas de onda do conversor *buck* (condução contínua)

Fonte: Barbi (2005).

Ainda, admitindo condução contínua, nota-se que existem duas etapas de funcionamento. Onde a primeira etapa inicia-se com $t = 0$, e a chave S encontra-se fechada. Nesta etapa, a corrente de entrada i_s cresce e flui através do indutor L , do capacitor C e da carga, ocorrendo a transferência de energia para a carga.

Para a primeira etapa de funcionamento da estrutura, a polaridade da tensão no indutor resulta em uma corrente de magnetização do indutor I_{mg} , dada por:

$$I_{mg} = \frac{(V_s - V_{cesat} - V_o) \cdot T_{on}}{L} \quad (3)$$

Onde V_s é a tensão de entrada contínua, V_{cesat} é a tensão de saturação do transistor, V_o é tensão de saída na carga e L a indutância.

Já, na segunda etapa de funcionamento, que se inicia quando em $t = t_1$, a chave S está aberta. Nesta etapa a corrente continua circulando de forma decrescente pelo

indutor L, capacitor C e carga, até que chave S seja fechada novamente e o diodo D₁ é quem conduz devido a energia armazenada no indutor na primeira etapa, conduzindo a corrente do indutor, cuja corrente de desmagnetização é dada pela equação (4), que considera V_D como a tensão direta do diodo.

$$I_{\text{dmg}} = \frac{V_o + V_D \cdot T_s}{L} \quad (4)$$

Como a corrente é contínua, considera-se

$$I_{\text{mg}} = I_{\text{dmg}} \quad (5)$$

O período T_{on} é definido como sendo a largura do pulso de chaveamento do conversor e a largura do pulso em função do período de chaveamento por:

$$T_{\text{on}} = D \cdot T \quad (6)$$

Sendo D, a razão cíclica, um valor adimensional, que varia de 0 a 1. Dessa forma, o T_s pode ser dado por:

$$T_s = (1 - D) \cdot T \quad (7)$$

Dessa forma, as equações (6) e (7) podem ser reescritas, lembrando que o período é o inverso da frequência. E ao igualar estas equações, tem-se que:

$$V_o = D \cdot (V_s - V_{\text{cesat}}) - V_D (1 - D) \quad (8)$$

Considerando os dispositivos de chaveamentos ideais, tem-se que:

$$V_o = D \cdot V_s \quad (9)$$

2.7.2 Conversores *buck* operando de modo contínuo

A corrente mínima entre o modo contínuo e descontínuo é dada por:

$$I_{o\min} = \frac{D \cdot (1-D) \cdot V_i}{2 \cdot L \cdot f_s} \quad (10)$$

O valor do indutor que fornece $I_{o\min}$ deve ser sempre calculado utilizando a tensão máxima de entrada, através da equação (11):

$$L \geq \frac{D_{\min} \cdot (1-D_{\min}) \cdot V_{i\max}}{2 \cdot I_{o\min} \cdot f_s} \quad (11)$$

A ondulação máxima de corrente na saída no indutor ocorre conforme indicação na equação (12).

$$\Delta I L_{\max} = \frac{V_i}{4 \cdot f_s \cdot L} \quad (12)$$

2.8 SISTEMA DE CONTROLE

Como sistemas sem alimentação são sistemas nos quais a saída não tem efeito na ação do controle é necessário fechar a malha do sistema, também conhecido como sistemas de controles realimentados, conforme indicação na Figura 13.

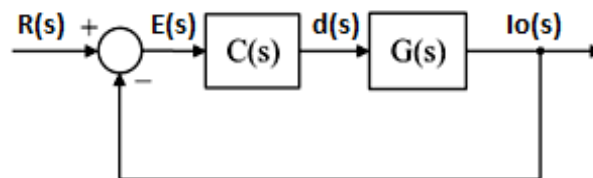


Figura 13 – Sistema de Malha Fechada

De acordo com a Figura 13, nota-se que existe um sinal de entrada ligado à referência do sistema, um bloco $C(s)$, representando o controlador a ser utilizado pelo sistema e um bloco $G(s)$ que indica a função transferência – $I_o(s)/d(s)$.

2.8.1 CONTROLADORES AUTOMÁTICOS

Os controladores servem para comparar o valor real de saída da planta com a entrada de referência, determinando o desvio e produzindo um sinal de controle que reduzirá este desvio a um valor muito pequeno (OGATA, 2010).

Ele é capaz de detectar erros infinitesimais entre o valor da variável de processo e o ponto de ajuste e responde, automaticamente conforme com os modos de controle e os seus ajustes.

2.8.1.1 Controlador Proporcional (P)

Controlador que apresenta uma resposta pro sistema proporcional à sua entrada.

Para um controlador proporcional a relação entra a saída do controlador $u(t)$ e o sinal de erro atuante $e(t)$ é:

$$u(t) = Kp \cdot e(t) \quad (13)$$

Transformando a equação (13) em Laplace, obtém-se a equação (14), onde Kp é o ganho proporcional.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kp \quad (14)$$

2.8.1.2 Controlador Proporcional e Integral (PI)

O controlador PI é uma combinação da ação proporcional com uma ação de integração, onde o integrador faz com que o erro seja zerado.

Para um controlador integrativo, a relação entra a saída do controlador $u(t)$ sofre uma alteração de acordo com a taxa de variação proporcional ao sinal de erro atuante $e(t)$.

$$u(t) = Ki \int_0^t e(t) dt \quad (15)$$

Transformando a equação (15) em Laplace, obtém-se a equação (16), onde K_i é uma constante ajustável.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (16)$$

2.8.1.3 Controlador Proporcional e Derivativo (PD)

O controlador PD é uma combinação da ação proporcional com uma ação de derivativa, que deixa o sistema mais rápido e reduz a máxima sobrelevação.

A ação de um controlador derivativo é definida por:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \left(\frac{K_i}{T_i}\right) \int_0^t e(t) dt \quad (17)$$

A função transferência é dada por (18) onde K_d é o tempo derivativo.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad (18)$$

2.8.1.4 Controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID)

Esse controlador é a ação combinada do controlador proporcional integrativo com o controlador proporcional derivativo, que tem as vantagens de cada uma das três ações de controle. A equação do controlador é representada em (19) e sua função transferência indicada em (20).

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \left(\frac{K_i}{T_i}\right) \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (19)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \quad (20)$$

3 DESENVOLVIMENTO E METODOLOGIA

Neste capítulo estão indicadas: (1) a metodologia utilizada ao longo da pesquisa e (2) aplicação do tema proposto. Inicialmente, o desenvolvimento da fonte de corrente está baseado no estudo teórico de alguns tópicos, tais como:

- Filtragem tipo passa baixo (RC).
- Estudo detalhado de conversores *buck*.
- Aplicação de conversores *buck*.
- Estudo sobre os controladores automáticos.

Para tal desenvolvimento desta fonte, foram realizadas as seguintes atividades:

- Estudo específico sobre a utilização do conversor *buck*.
- Adequação do conversor *buck* atuando na fonte de corrente.
- Simulação e desenvolvimento em *softwares PSim* do circuito com malha aberta.
- Adequação do controlador.
- Simulação e desenvolvimento em *softwares Matlab*, do circuito com malha fechada.
- Análise de viabilidade do projeto.

No projeto de fonte de corrente proposto, o objetivo foi manter uma corrente entre o intervalo de 5 mA a 1 A, utilizando um conversor *buck*.

3.1 PROJETO DO INDUTOR E DO CAPACITOR

3.1.1 Cálculo do Fio de Cobre

Para o cálculo do fio de cobre a ser utilizado no projeto do conversor é necessário a aplicação da equação (21), onde J é a densidade de corrente nos fios de cobre e sua medida é A/cm^2 .

$$J = K_j \cdot A_p^{-x} \quad (21)$$

Com isso, calcula-se o valor da área do cobre, utilizando a equação (22), onde I_p é a corrente de pico.

$$A_{cu} = \left(\frac{I_p}{\sqrt{2}} \right) / J \quad (22)$$

3.1.2 Cálculo do Indutor

Para especificar o núcleo é necessário utilizar a seguinte equação:

$$A_p = \left(\frac{2 \cdot E \cdot 10^4}{K_u \cdot K_j \cdot B_{max}} \right)^z \quad (23)$$

Onde K_u é o fator de utilização das janelas, K_j é o coeficiente de densidade de corrente nos fios, B_{max} é a densidade do fluxo, dada em Tesla, z é dado pela relação $1/(1-x)$ e E é a energia máxima do indutor, dada por:

$$E = \frac{1}{2} \cdot L_{min} \cdot I_{max}^2 \quad (24)$$

Considerando a corrente máxima como a soma da corrente I_o máxima com a I_o mínima, onde I_o é a faixa da corrente que espera-se atingir no projeto. e conhecendo A_p , o núcleo é escolhido através da tabela em anexo A deste trabalho.

3.1.3 Cálculo do Capacitor

O capacitor, no conversor buck, serve para diminuir a ondulação da corrente causada pelo indutor, assim, a carga do capacitor é dada por:

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{2} \cdot \frac{Img}{2} \quad (65)$$

Considerando que a tensão de um capacitor está relacionada à carga que ele adquire, de modo que $\Delta V_c = \Delta Q/C$ e fazendo as substituições necessárias, tem-se que:

$$\Delta V_c = \frac{D \cdot (1-D) \cdot Vi}{8 \cdot L \cdot C \cdot f^2} \quad (26)$$

Adotando $Vo = D \cdot Vi$ é possível calcular o capacitor pela seguinte equação:

$$C \geq \frac{D_{min} \cdot (1-D_{min}) \cdot V_{imax}}{8 \cdot L \cdot \Delta V_c \cdot f^2} \quad (27)$$

Deve-se considerar ainda o valor da frequência de ressonância do filtro LC de saída. Esse valor é dado pela expressão (71).

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (28)$$

Para evitar que a tensão de saída possa atingir valores excessivos, deve-se escolher um filtro cuja frequência de ressonância seja muito menor que a frequência de chaveamento do conversor, ou seja:

$$f > f_0 \quad (29)$$

Na construção de uma fonte de corrente, o conversor *buck* tem como função fazer o controle da tensão sobre carga. Esse controle é feito através do chaveamento do seu transistor, gerando, assim, uma tensão de saída sobre uma carga que vai proporcional a corrente, como indicado na lei de Ohm, indicada na equação (1).

3.1.4 Cálculo da Resistência série do Capacitor e do Indutor

Para determinar o valor da resistência série do capacitor R_{se} é necessário a utilização da tabela disposta na Tabela 1, concomitantemente ao uso do capacitor e da tensão do projeto.

CAP	10V	16V	25V	35V	50V	63V	100V	160V	250V	350V	450V
1 μ F			2,1	2,4	4,5	4,5	8,5	9,5	8,7	8,5	3,6
2,2 μ F			2,0	2,4	4,5	4,5	2,3	4,0	6,1	4,2	3,6
3,3 μ F			2,0	2,3	4,7	4,5	2,2	3,1	4,6	1,6	3,5
4,7 μ F			2,0	2,2	3,0	3,8	2,0	3,0	3,5	1,6	5,65
10 μ F		8,0	5,3	2,2	1,6	1,9	2,0	1,2	1,4	1,2	6,5
22 μ F	5,4	3,6	1,5	1,5	0,8	0,9	1,5	1,1	0,7	1,1	1,5
33 μ F	4,6	2,0	1,2	1,2	0,6	0,8	1,2	1,0	0,5	1,1	
47 μ F	2,2	1,0	0,9	0,7	0,5	0,6	0,7	0,5	0,4	1,1	
100 μ F	1,2	0,7	0,3	0,3	0,3	0,4	0,15	0,3	0,2		
220 μ F	0,6	0,3	0,25	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2		
330 μ F	0,24	0,2	0,25	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2		
470 μ F	0,24	0,18	0,12	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15		
1000 μ F	0,12	0,15	0,08	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1		
2200 μ F	0,12	0,14	0,14	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1		
3300 μ F	0,12	0,13	0,12	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1		
4700 μ F	0,12	0,12	0,12	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1		

Tabela 1 – Tabela de Especificação de Resistência Série

Fonte: Telredes Cursos

Quanto ao valor da resistência série do indutor é necessária a utilização da fórmula (64), onde ρ é a resistividade do material, neste caso, a resistividade do cobre, que equivale a $2,3 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ e L é o comprimento do condutor e A_p área de seção transversal do condutor, obtida com o auxílio da equação (22).

$$RL = \frac{\rho \cdot L}{A_p} \quad (30)$$

Para o cálculo do comprimento do condutor, também chamado de caminho médio das espiras, é necessário a visualização das dimensões do núcleo de ferrite EE genérico, indicado na Figura 14. Dessa forma, o MLT ("Mean Length Turn" em inglês) pode ser calculado conforme a equação (31), onde I e F são as dimensões indicadas na figura abaixo e seus respectivos valores encontram-se na Tabela disponível no apêndice B deste trabalho.

$$MLT = 2(I + F) \quad (31)$$

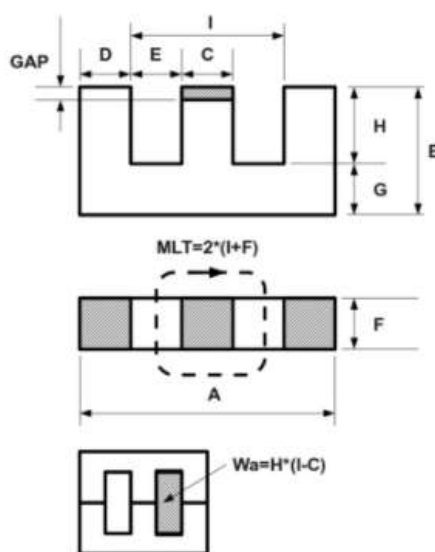


Figura 14 – Parâmetros de núcleo ferrite EE genérico

Fonte: Electron-CAD Controls

Com o valor de MLT definido é necessário saber o número de espiras a ser utilizado na construção deste indutor e o seu cálculo é feito através da equação (32), onde L é o valor da indutância, obtido com o auxílio da equação (11) e A_L é um valor dado pelo fabricante.

$$L = N^2 \cdot A_L \quad (32)$$

Por fim, multiplica-se o valor de MLT com o número de espiras para que seja possível conhecer o caminho percorrido por todas as espiras, tornando o cálculo mais próximo ao real.

3.2 TRANSISTORES

Na construção de uma fonte de corrente, em muitos casos, é necessária a utilização de transistores bipolares, pois, quando polarizados, são geradores naturais de corrente, podendo, então, manipulá-lo para que sua corrente no coletor apresente o valor necessário (BRITES, 1981).

Utilizando a Figura 6 contida na sessão 2 deste trabalho, é possível notar que como as correntes do coletor e do emissor são praticamente a mesma, a corrente de saída torna-se a própria corrente do coletor e possui um valor praticamente constante.

Para confeccionar uma fonte de corrente, também, pode-se utilizar os transistores de efeito de campo, pois embora eles sejam comandados por tensão, também podem ser considerados como gerador de corrente natural. (BRITES, 1981).

Na Figura 8, também contida na sessão 2 deste, é possível observar a configuração de uma fonte de corrente para uma carga RL utilizando transistores de efeito de campo. Nesta figura, nota-se que a tensão de VGS no transistor de efeito de campo tem que ter um valor superior a tensão de corte VP, desse modo, o transistor permite com que uma corrente flua do terminal D para o S. Com isso, percebe-se que a tensão sobre a carga pode ter grandes alterações que não alterará a corrente sobre a carga (BRITES, 1981).

Dentro da fonte de corrente, o transistor é o sistema de controle de corrente da malha, sua funcionalidade é obstruir ou abrir o canal. Ele age como atuador sobre a malha principal para fazer o controle da corrente.

3.3 MODELAGEM DO CONVERSOR EM CONDUÇÃO CONTÍNUA

Considerando o circuito básico do conversor *buck* indicado na Figura 11 e considerando suas duas etapas de funcionamento, tem-se que para a primeira etapa de funcionamento são válidas as seguintes equações:

$$V_L(t) = V_s(t) - V_o(t) \quad (33)$$

$$i_c(t) = i_L(t) - i_r(t) = i_L(t) - \frac{v_o(t)}{R} \quad (34)$$

$$i_s(t) = i_L(t) \quad (35)$$

Para a segunda etapa de funcionamento, são válidas as seguintes equações:

$$V_L(t) = -V_o(t) \quad (36)$$

$$i_c(t) = i_L(t) - i_r(t) = i_L(t) - \frac{v_o(t)}{R} \quad (37)$$

$$i_s(t) = 0 \quad (38)$$

3.3.1.1 Função transferência do conversor $V_o(s)/d(s)$

Na teoria, função transferência é a relação entre a entrada e a saída de um componente ou de um sistema, podendo ser escrita por equações diferenciais lineares que não tem variação no decorrer do tempo. (OGATA, 2010).

Considerando que a tensão média no diodo para condução contínua é $V_s D$, onde V_s é a tensão de entrada e D a razão cíclica, é possível então considerar o modelo de Figura 15 para análise e obtenção da função transferência.

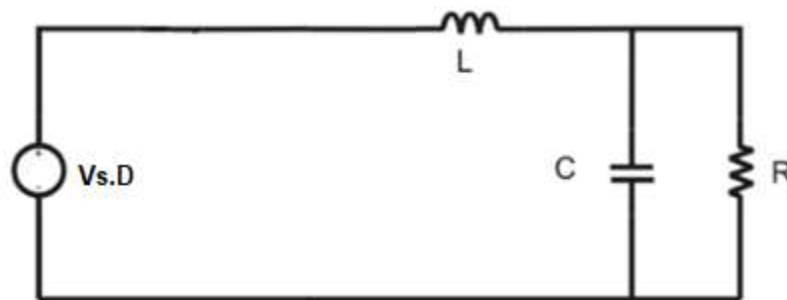


Figura 15 – Modelo simplificado do conversor buck

Fonte: Adaptado de Batschauer (2012).

Dessa forma, consideram-se as seguintes expressões como verdadeiras. Assume-se ainda, i_L e i_C como as correntes no indutor e no capacitor, respectivamente e a tensão de saída é a própria tensão no capacitor, indicado por V_o .

$$-V_s.D + \left[\frac{L di_l(t)}{dt} \right] + V_o(t) = 0 \quad (39)$$

$$i_l(t) = i_c(t) + \frac{v_o(t)}{R} \quad (40)$$

$$i_c(t) = \frac{C dv_o(t)}{dt} \quad (41)$$

Substituindo as equações (39) e (40) na equação (41) chega-se na equação (42):

$$LC \cdot \frac{d^2 v_o(t)}{dt^2} + \frac{L}{R} \cdot \frac{dv_o(t)}{dt} + V_o(t) = V_s.D \quad (42)$$

Ainda é necessário a introdução do conceito de valor médio instantâneo, que é definido como o valor médio de uma grandeza em um período de comutação T_s , conforme indicação na expressão (43):

$$|i_l(t)|_{t_s} = \frac{1}{T_s} = \int_t^{1+T_s} \tau d\tau \quad (43)$$

Em regime permanente: a tensão média do indutor e a corrente média do capacitor são nulas, as correntes e tensões médias são funções não lineares da razão cíclica (BATSCHAUER, 2012).

Ainda sobre Batschauer, a representação média do circuito para um conversor chaveado é de grande valia para análise e simulação do conversor, pois o modelo médio resultante prediz o comportamento em baixa frequência do conversor, enquanto despreza as harmônicas em alta frequência produzidas pelas comutações.

É necessária também a definição de perturbações. Assim, de acordo com o Batschauer, são plantas não lineares, dificultando a utilização de técnicas de controle conhecidas, tais como a linearização em torno do ponto de operação. Dessa forma, provoca-se uma pequena variação na variável de entrada e esta, por sua vez, provoca uma perturbação na variável de saída, considerada nesse método, linearizada.

Essa análise despreza a variação de alta frequência. A interferência do chaveamento é subtraída da análise pelo cálculo do valor médio das variáveis em um período de chaveamento. Considera-se o efeito de uma pequena variação no sinal de entrada.

Em síntese, aplicando uma perturbação no sistema (escrevendo o sinal como seu valor médio mais uma pequena variação), representadas pelas equações (44) até (46), chega-se na equação (47):

$$d(t) = D + \hat{d}(t) \quad (44)$$

$$Vs(t) = Vs + \widehat{Vs}(t) \quad (45)$$

$$Vo(t) = Vo + \widehat{vo}(t) \quad (46)$$

Onde: $|D| \gg |\hat{d}(t)|$, $|I| \gg |\hat{I}(t)|$ e $|Vs| \gg |\widehat{Vs}(t)|$

$$L.C. \frac{d^2 [Vo + \widehat{vo}(t)]}{dt^2} + \frac{L}{R} \cdot d. \frac{[Vo + \widehat{vo}(t)]}{dt} + Vo + \widehat{vo}(t) = Vs.D + \widehat{Vs}(t) \quad (47)$$

Separando apenas os termos CC da equação 47, chega-se na equação que define o modelo do conversor *Buck* (modelo CC), conforme equação (48):

$$L.C. \frac{d^2 Vo}{dt^2} + \frac{L}{R} \cdot d. \frac{Vo}{dt} + Vo = Vs.D \quad (48)$$

Agora separando apenas os termos CA da equação (47), chega-se a equação (51) e é possível, por fim, encontrar a função a tensão $Vo(s)$ em função da razão cíclica do conversor *Buck*.

$$L.C. \frac{d^2 \widehat{vo}(t)}{dt^2} + \frac{L}{R} \cdot \frac{d\widehat{vo}(t)}{dt} + Vo = \widehat{Vs}(t)$$

$$L.C.S^2.Vo(s) + \frac{L}{R}.s.Vo(s) + Vo(s) = Vs.d(s) \quad (49)$$

$$Vo(s) \cdot \left[L.C.s^2 + \frac{L.s}{R} + 1 \right] = Vs.D \quad (50)$$

$$\frac{Vo(s)}{d(s)} = \frac{Vs}{L.C.s^2 + \frac{L.s}{R} + 1} \quad (51)$$

3.3.1.2 Função transferência do conversor $Io(s)/d(s)$

Segundo Batschauer, muitos conversores adotam o controle da corrente no indutor pois essa medição pode ser realizada de forma direta. Desse modo, é

necessário definir a planta de corrente do conversor, com o objetivo de conhecer seu comportamento em malha aberta e posteriormente escolher o controle que mais se adequar para a planta. Sendo assim, reescrevendo a equação (33), tem-se:

$$V_o(t) = V_s \cdot D - \left[\frac{L di_l(t)}{dt} \right] \quad (52)$$

Substituindo a equação 52 em 34:

$$i_l(t) = i_c(t) + \left(\frac{1}{R} \right) \cdot \left[V_s \cdot D - L \cdot \frac{di_l(t)}{dt} \right] \quad (53)$$

$$i_l(t) = C \cdot \left(\frac{dV_o(t)}{dt} \right) + \left(\frac{1}{R} \right) \cdot \left[V_s \cdot D - L \cdot \frac{di_l(t)}{dt} \right] \quad (54)$$

Derivando a equação 52 e substituindo na equação 54, tem-se que:

$$i_l(t) = C \cdot \frac{dV_s(t) \cdot D}{dt} - C \cdot L \cdot \frac{d^2 i_l(t)}{dt^2} + \frac{1}{R} \cdot \left[V_s \cdot D - L \cdot \frac{di_l(t)}{dt} \right] \quad (55)$$

$$C \cdot L \cdot \frac{d^2 i_l(t)}{dt^2} + \frac{L}{R} \cdot \frac{di_l(t)}{dt} + i_l(t) = C \cdot \frac{dV_s(t) \cdot D}{dt} + \frac{V_s D}{R} \quad (56)$$

Para que seja possível modelar a planta de corrente em função da razão cíclica é necessário que seja aplicada uma perturbação na equação 56, depois separado apenas a parte CA do sistema (57) e, em seguida, aplicado Lapalce (58):

$$C \cdot L \cdot \frac{d^2 \hat{i}_l(t)}{dt^2} + \frac{L}{R} \cdot \frac{d\hat{i}_l(t)}{dt} + \hat{i}_l(t) = C \cdot \frac{dV_s(t) \cdot \hat{d}(t)}{dt} + \frac{V_s \cdot \hat{d}(t)}{R} \quad (57)$$

$$C \cdot L \cdot s^2 i_l(s) + \frac{L}{R} \cdot s \cdot i_l(s) + i_l(s) = C \cdot s \cdot V_s \cdot d(s) + \frac{V_s}{R} \cdot d(s) \quad (58)$$

$$i_o(s) \cdot \left[C \cdot L \cdot s^2 + \frac{L}{R} \cdot s + 1 \right] = d(s) \cdot \left[C \cdot L \cdot V_s + \frac{V_s}{R} \right] \quad (59)$$

$$i_o(s) \cdot \left[C \cdot L \cdot s^2 + \frac{L}{R} \cdot s + 1 \right] = d(s) \cdot \frac{V_s}{R} [R \cdot Cs] \quad (60)$$

$$\frac{I_o(s)}{d(s)} = \frac{V_s}{R} \cdot \left[\frac{R.Cs+1}{CL.s^2 + \frac{L}{R}.s+1} \right] \quad (61)$$

3.3.2 Característica dinâmica do conversor *Buck*

3.3.2.1 Função transferência do conversor $V_o(s)/d(s)$ considerando a característica dinâmica

Segundo Pomilio (2010), para se obter a função transferência do conversor buck operando no modo de condução contínua, deve-se considerar as duas variantes de topologia indicadas na Figura 16 .

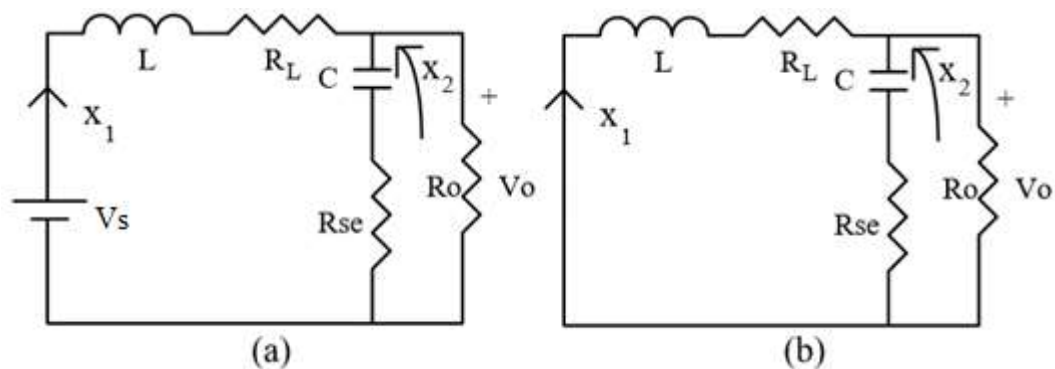


Figura 16 – Alternativas topológicas (modo contínuo) de conversor abaixador de tensão: condução do transistor (a) e condução do diodo (b).

Fonte: Adaptado de Pomilio (2010).

Considerando a resistência série do capacitor como R_{se} , enquanto a resistência do indutor como R_L . Ainda, x_1 é a corrente pelo indutor e x_2 é a tensão sobre o capacitor. De acordo com a malha externa no circuito mostrado na figura 15.a tem-se:

$$-V_s + L.\dot{x}_1 + R_L.x_1 + R_o(x_1 - C.\dot{x}_2) = 0 \quad (62)$$

Reescrevendo a equação de tensões para malha de saída:

$$-x_2 - C.Rse.\dot{x}_2 + Ro(x_1 - C.\dot{x}_2) = 0 \quad (63)$$

Em uma forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(-Ro.(Rse+RL) + Rse.RL)}{L(Rse+Ro)} & -\frac{Ro}{L(Rse+Ro)} \\ \frac{Ro}{C(Rse+Ro)} & -\frac{1}{C(Rse+Ro)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (64)$$

Quando o transistor está fechado, as equações de estado para os circuitos podem ser obtidas observando que a tensão de entrada V_s é igual a zero. Assim A_2 é igual a A_1 e B_2 igual a 0. Dessa forma, a tensão de saída em ambos os casos é dada por:

$$V_o = Ro(x_1 - C\dot{x}_2) = \frac{Ro.Rse.x_1 + Ro.x_2}{Rse+Ro} \quad (65)$$

Então:

$$C_1 = C_2 = \begin{bmatrix} \frac{Ro.Rse}{Ro+Rse} & \frac{Ro}{Ro+Rse} \end{bmatrix} \quad (66)$$

Dessa forma, a matriz e os vetores medianos são indicados por A ser igual a A_1 , B igual ao produto de B_1 por D e C igual a C_1 .

Considerando que $Ro \gg Rse$, e tanto RL quanto Rse são pequenos, é possível simplificar as matrizes e os vetores.

$$A = A_1 = A_2 = \begin{bmatrix} -\frac{Rse+RL}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{C.Ro} \end{bmatrix} \quad (67)$$

$$C = C_1 = C_2 \approx [Rse \quad 1] \quad (68)$$

$$B = B_1.D = \begin{bmatrix} 1 \\ L \\ 0 \end{bmatrix} . D \quad (69)$$

A inversa da matriz A é:

$$A^{-1} = \frac{L.C.Ro}{Ro+Rse+RL} \cdot \begin{bmatrix} -\frac{1}{C.Ro} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{Rse+RL}{L} \end{bmatrix} \quad (70)$$

A relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada é dada por:

$$\frac{Vo}{Vi} = -C.A^{-1}.B \quad (71)$$

Aplicando as equações (48), (49) e (50) na equação (51) obtém-se:

$$\frac{Vo}{Vi} = D \cdot \frac{Ro+Rse}{Ro+Rse+RL} \approx D \quad (72)$$

Para o conversor abaixador de tensão, os elementos do vetor X são dados por:

$$IL = Io = \frac{Vo}{Ro} = \frac{(D.Vi)}{Ro} \text{ e } Vc = Vo = Vi.D \quad (73)$$

A função transferência $Vo(s)/d(s)$ é dada por:

$$Tp(s) = \frac{Vo(s)}{d(s)} = C \cdot [s.I.A^{-1}] \cdot [(A1 - A2).X + (B1 - B2).Vs] + (C1 - C2).X \quad (74)$$

Dessa forma, aplicando a equação (54), obtém-se a função transferência do conversor, dada por:

$$Tp(s) = \frac{Vo(s)}{d(s)} \cong Vs \cdot \frac{1+s.Rse.C}{L.C \left[s^2 + s \cdot \left(\frac{1}{Ro.C} + \frac{Rse+RL}{L} \right) + \frac{1}{LC} \right]} \quad (75)$$

3.3.2.2 Função transferência do conversor $Io(s)/d(s)$ considerando a característica dinâmica

Adotando os procedimentos realizados no item 3.3.2.1 deste trabalho e com o auxílio das relações estabelecidas em 3.3.1.2 também incluso neste trabalho, foi obtida a função transferência do $i_o(s)/d(s)$, conforme indicação na equação (76).

$$\frac{i_o(s)}{d(s)} \cong \frac{Vs}{R_o + R_{se} + R_l} \cdot \frac{1 + s.C(R_{se} + R)}{L.C \left[s^2 + s \left(\frac{1}{R_o.C} + \frac{R_{se} + R_l}{L} \right) + \frac{1}{LC} \right]} \quad (76)$$

4 OBTENÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

4.1 PROJETO DO CONVERSOR

Para o desenvolvimento do projeto, de início foi necessário o dimensionamento do conversor *buck* e para isso foram adotados alguns valores por meio experimental.

Considerou-se a carga como sendo um resistor de valor de 100 Ω , concomitantemente convencionou-se o valor da tensão de entrada como 150 V, devido ao fato de ser a mesma medida das fontes utilizadas nas bancadas do laboratório da Universidade.

Ainda, a faixa de corrente da fonte considerada foi de 5 mA a 1 A e a variação da tensão do capacitor (ΔV_C) foi 0,05, representando cerca de 10% da tensão mínima. A corrente inicial mínima $I_{o\min}$ utilizada foi de 3mA, que é uma corrente com um valor inferior ao da corrente mínima. Com o auxílio da equação (12), determinou-se o valor da variação máxima da corrente do indutor, o $\Delta I_{L\max}$, 0,34.

Supôs-se, para posterior análise, que a tensão do diodo é de 0,5 V e a tensão de saturação no transistor como sendo 1 V. A frequência utilizada foi de 20 kHz.

Aplicando esses dados na equação (8), o resultado obtido é $D_{\max} = 0,6722$ e $D_{\min} = 0,0067$.

Também foi escolhido o modelo utilizado para o núcleo de ferrite tipo EE, sendo assim os valores de $K_u = 0,3$, $B_{\max} = 0,3T$, $K_j = 397$ e $x = 0,12$. Dessa forma, com o auxílio das equações (11), (21), (22) e (23) foi possível obter os dados descritos na Tabela 2.

Indutor	5,5 mH
Energia Máxima	2,78 mJ
Capacitor	756 nF
Área do Núcleo	1,66 cm ⁴

Tabela 2 – Projeto do conversor Buck

De acordo com os dados obtidos e consultando o anexo A, a designação do núcleo de ferrite a ser utilizada é 42/21/15.

Neste estudo foi escolhido o A_L do fabricante *Thornton* afim de que se torne mais real o cálculo do indutor. O valor utilizado é de 4000 nH (conforme mostrado nos Apêndices A e B), sendo assim, o número de espiras do indutor é de aproximadamente 38 espiras, segundo a equação (23).

Já o cálculo do fio de cobre, utilizando as equações (21) e (22), resulta se em uma área de 0,00189 cm² e com base no Apêndice D, o fio utilizado é #24 AWG, porém de acordo com a disponibilidade no Almoarifado do Departamento Acadêmico da Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Cornélio Procópio e considerando o valor da frequência utilizado no projeto, optou-se por utilizar 2 fios de #27 AWG.

Dando sequência, de acordo com a consulta à Tabela 1 o valor da resistência série do capacitor (R_{se}) é de 0,1Ω e a resistência série do indutor, calculada com o auxílio da equação (23), deve-se considerar que foram utilizados os 2 fios de #27 totalizando um A_p de 0,00204 cm², o que resulta em uma resistência $R_L = 4,35$ mΩ.

4.2 SIMULAÇÃO DO CONVERSOR EM MALHA ABERTA

Com os dados do projeto do conversor buck em mãos e utilizando o software *Psim* – simulador de circuitos elétricos, desenhou-se o circuito no mesmo, conforme indicação da Figura 17. Vale ressaltar que a chave escolhida no projeto foi o Mosfet.

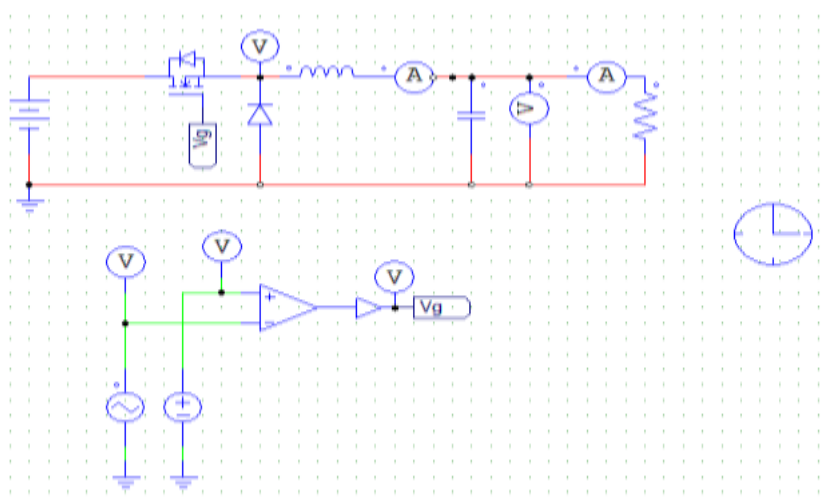


Figura 17 – Conversor *buck* simulado no Psim

É possível, por esta representação, fazer o controle da razão cíclica alterando o na fonte, possibilitando através da análise de gráficos, o estudo do comportamento das formas de onda.

Para a validação do projeto, aplicou-se os valores distintos para a razão cíclica e as formas de ondas obtidas para V_o (tensão de saída), i_L (corrente no indutor) e i_o (corrente de saída) estão, respectivamente, indicadas nas figuras 18 e 19. Todos os gráficos estão dispostos em função do tempo (segundos).

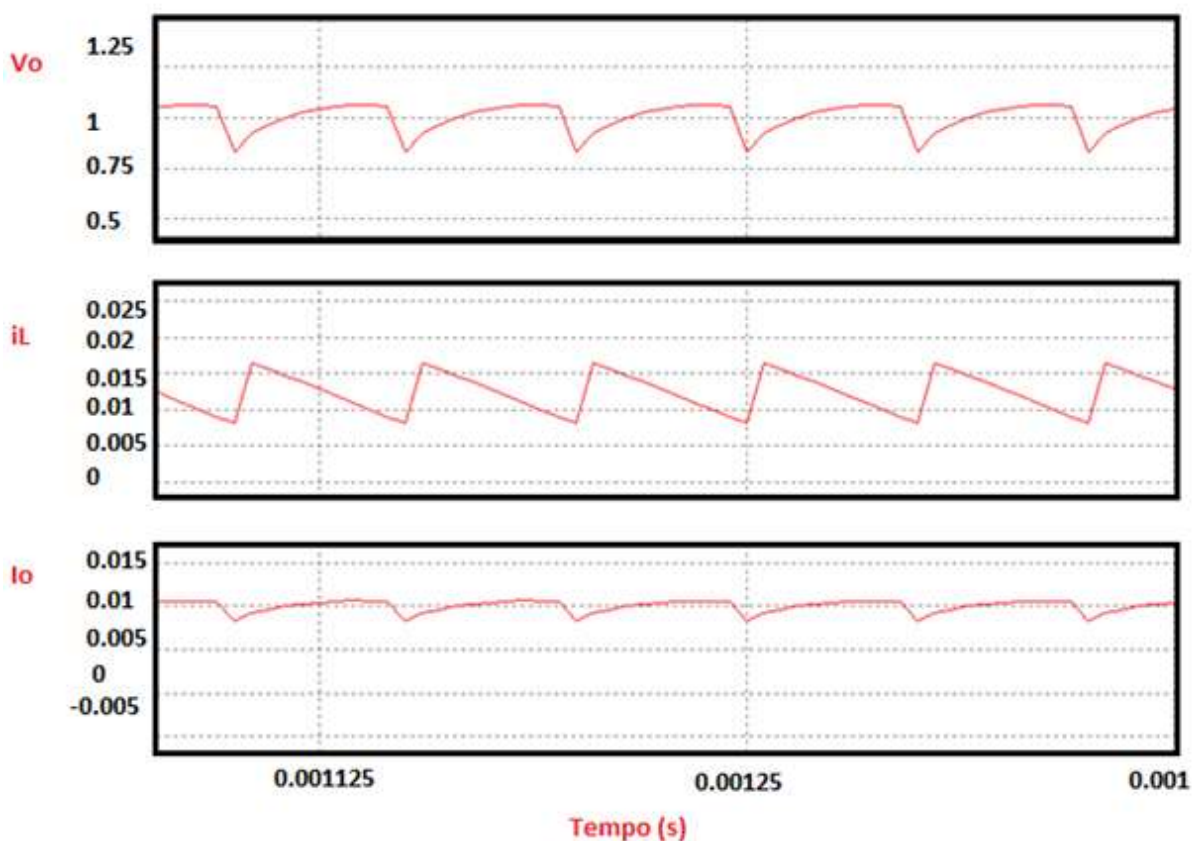


Figura 18 – formas de ondas obtidas para V_o , i_L e i_o utilizando D_{min}

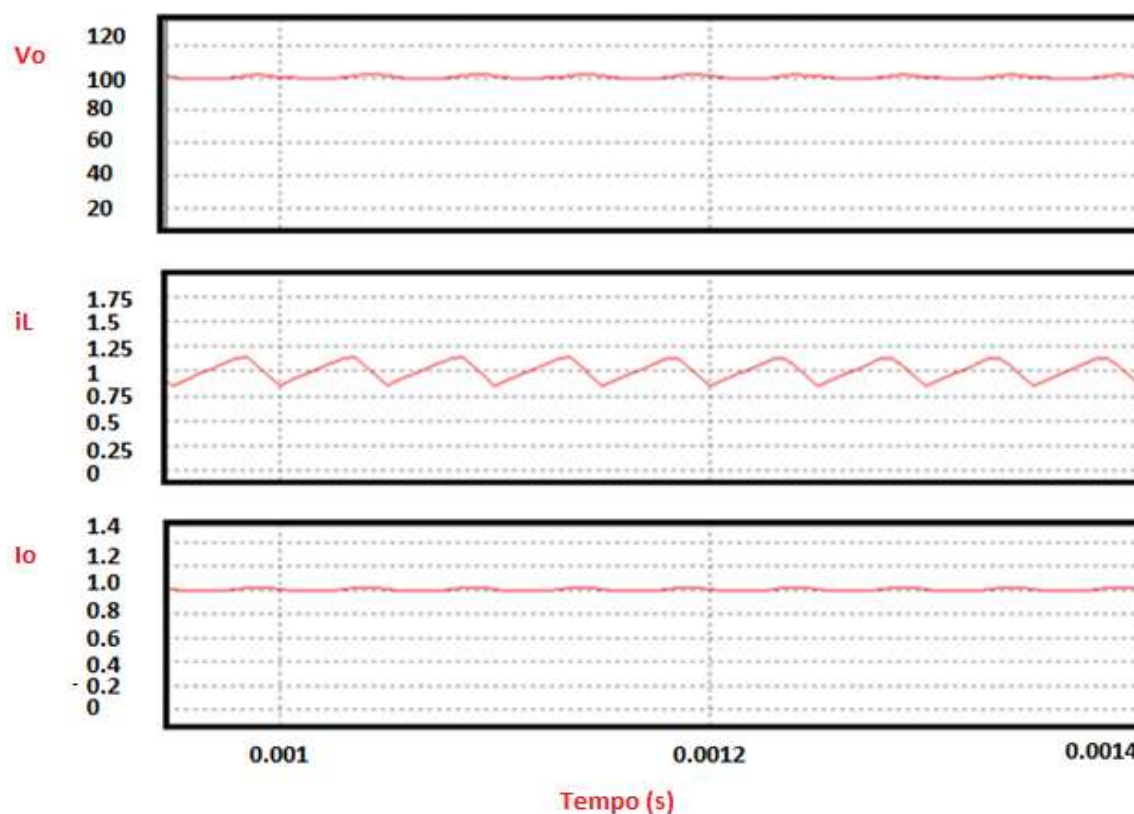


Figura 19 – Formas de ondas obtidas para V_o , i_L e i_o utilizando D_{max}

Com o auxílio das ferramentas do software foi determinado os valores máximos e mínimos das formas de onda para que se pudesse validar o projeto calculando o ΔV_c e o ΔI_L . Os valores obtidos seguem nas Tabelas 3 e 4.

Medidas		Medidas	
Tempo	1,1350000e-003	Tempo	1,4000000e-003
V_o	1,0633567e+000	V_o	8,3171325e-001
i_L	1,0918184e-002	i_L	8,2066164e-003
i_o	1,0633567e-002	i_o	8,3171322e-003

Tabela 3 – Valores de máximo e mínimo utilizando D_{min}

Medidas		Medidas	
Tempo	1,0900000e-003	Tempo	9,6500000e-004
V_o	1,0202201e+002	V_o	9,9404405e+001
i_L	1,0425034e+000	i_L	9,9255899e-001
i_o	1,0202201e+000	i_o	9,9404403e-001

Tabela 4 – Valores de máximo e mínimo utilizando D_{max}

Dessa forma, segue na Tabela 5 os dados obtidos.

Dmín	ΔV_c	0.231
	ΔI_L	0.003
Dmáx	ΔV_c	0.048
	ΔI_L	0.050

Tabela 5 – Dados para validação do projeto

De acordo com os dados dispostos na Tabela 5, consegue-se observar que o ΔV_c quando Dmín não atende as condições iniciais propostas pelo projeto.

Ainda analisando a viabilidade do projeto e utilizando a equação (71), tem-se como frequência 78,05 Hz, que está muito abaixo da frequência de 20kHz do projeto, viabilizando assim, o mesmo.

4.3 SIMULAÇÃO DO CONVERSOR EM MALHA FECHADA

Para o desenvolvimento dessa fase do projeto, utilizou-se o software Matlab/Simulink, que é um programa utilizado para modelagem, simulação e análise de comportamentos de sistemas dinâmicos e desenhou-se o circuito proposto.

De acordo com o estudo da função transferência, foi possível determinar que o controlador utilizado proporcional e integral (PI) seria suficiente para atender às necessidades do objeto. Ademais, este controlador é muito utilizado no cotidiano, fácil de ser encontrado e simples de ser implementado em softwares.

4.3.1 Simulação da Fonte de Corrente

Com o controlador definido, plotou-se o projeto no software, conforme imagem a seguir. Neste projeto, o valor da corrente na carga foi medido pelo bloco x3, representado na figura 20 e armazenado na variável iR para visualizações das saídas do sistema.

O bloco de saturação utilizado teve como parâmetros o Dmáx e Dmín, já obtido nos itens anteriores deste trabalho.

Em relação ao controlador foi utilizado um bloco genérico PID afim de se tornar possível estabelecer os dados do mesmo.

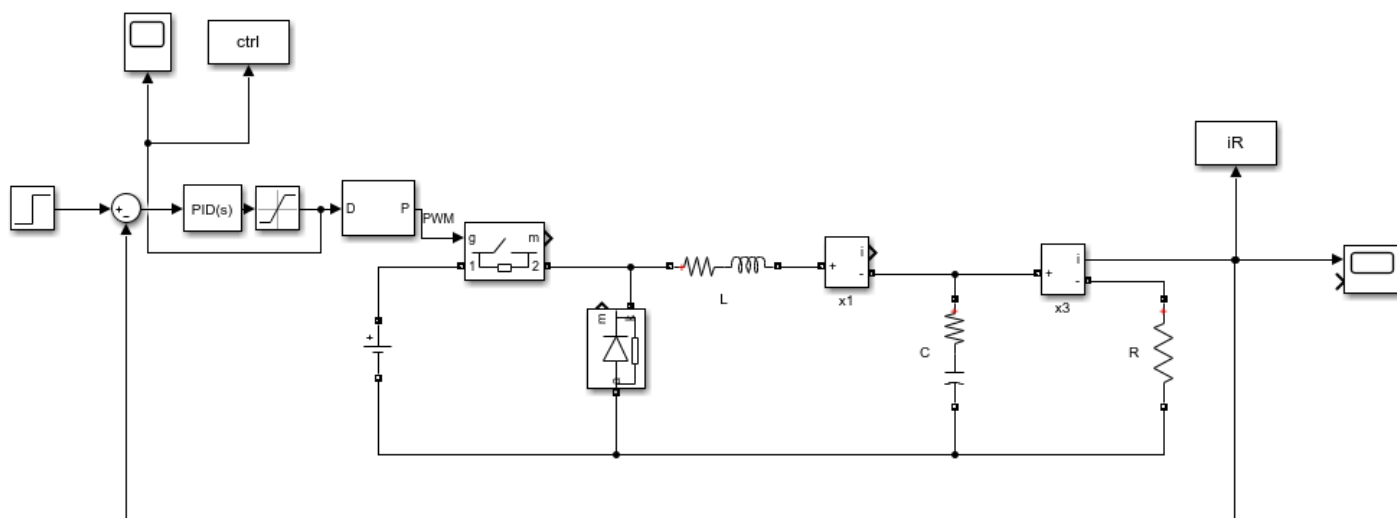


Figura 20 – Esquemático do projeto no *Matlab/Simulink*

O apêndice C deste trabalho apresenta uma figura ampliada do esquemático do projeto.

Para o projeto desta fonte foi utilizada a função transferência (61) onde há uma relação entre a corrente de saída e a razão cíclica do conversor. No Matlab, com o auxílio da função transferência $H(s)$, substituiu-se os valores da carga, do indutor e do capacitor obtidos no projeto para se tornar possível a verificação do controle da mesma.

Sequencialmente analisou-se o comportamento do sistema utilizando a resposta ao degrau conforme figura 21 a seguir, para verificar a estabilidade do sistema utilizando o comando $\text{step}(H)$, utilizado para verificar a estabilidade do sistema com o controle aplicado em malha fechada.

O comando step utilizado calcula a resposta de um sistema no domínio do tempo a uma entrada em degrau unitário.

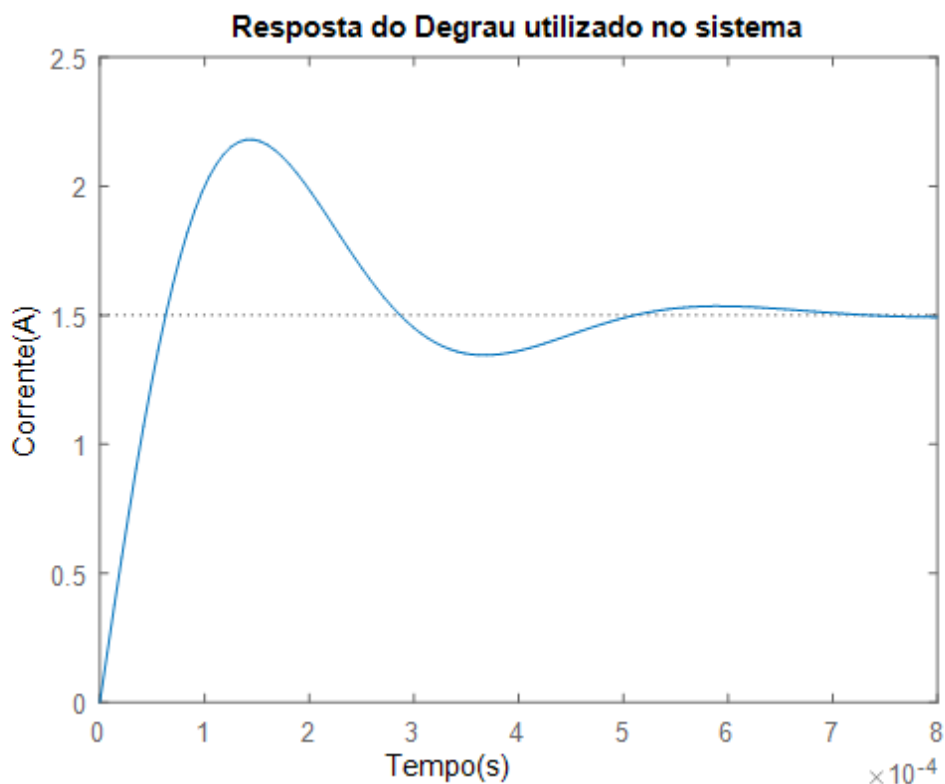


Figura 21 – Resposta ao degrau utilizado no sistema.

Com a função estável, ajustou-se o controlador no projeto. Para isso foi utilizado o aplicativo do programa denominado *PID TUNER*, onde após algumas verificações experimentais, os parâmetros: tempo de resposta e comportamento do regime transitório foram regulados. Na sequência adequou-se, também de maneira experimental, o projeto de acordo com o tempo e a robustez que torna-se a implementação do projeto possível. A figura 22 representa o gráfico do ajuste do ganho do controlador.

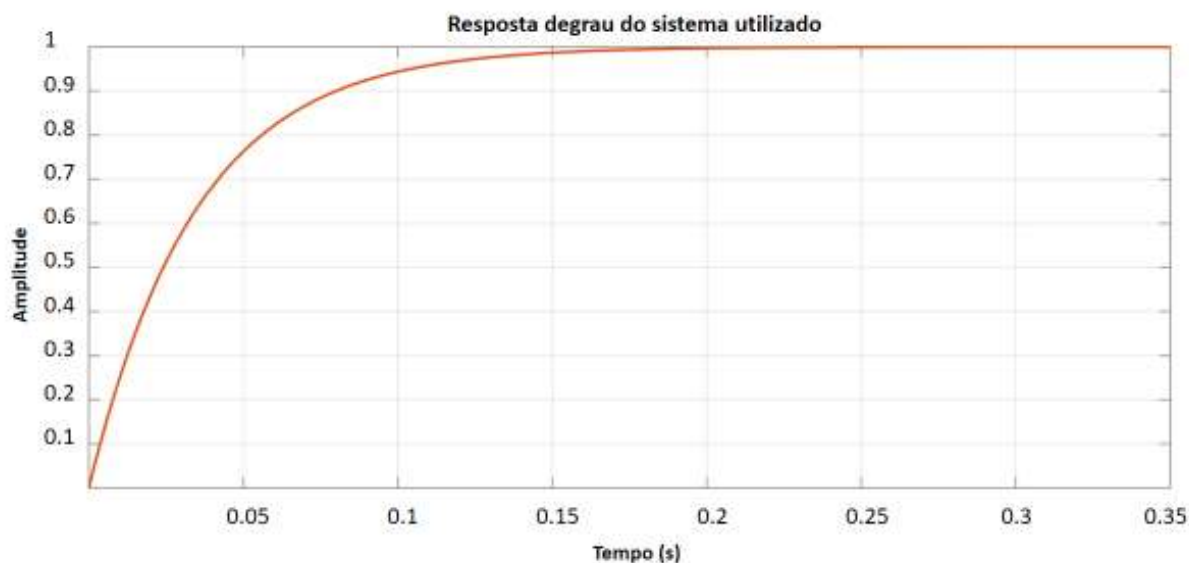


Figura 22 – Ajuste do ganho do controlador

Com o auxílio desta ferramenta, foi possível obter os valores dos ganhos K_p e K_i , obtendo 0 e 19,2 como respostas da simulação. Vale ressaltar que não foi criado um código para isso pois a ferramenta utilizada é um aplicativo do próprio programa utilizado, como já citado anteriormente.

Configurado o controlador, analisou-se o comportamento do mesmo e a saída do sistema em todo domínio estipulado no projeto. Para isso foram executados os comandos:

```
>> plot (ctrl)
```

```
>> %Referente a ação de controle, que é a saída do controlador, neste caso, a razão cíclica D, onde indica-se se o sistema é implementável no controle.
```

```
>>plot (iR)
```

```
>> % Referente a resposta do sistema malha fechada com referência, a corrente de saída da carga.
```

Para testar a eficácia do projeto foram utilizados valores distintos na referência, alterando o valor da referência do Step. Foram gerados gráficos que representam os esforços de controle da tensão para os valores de 0,006; 0,05; 0,2 ; 0,5; 0,78; 0,9. Conveniu-se estes valores para abranger o intervalo proposto no projeto de 5 mA a 1 A.

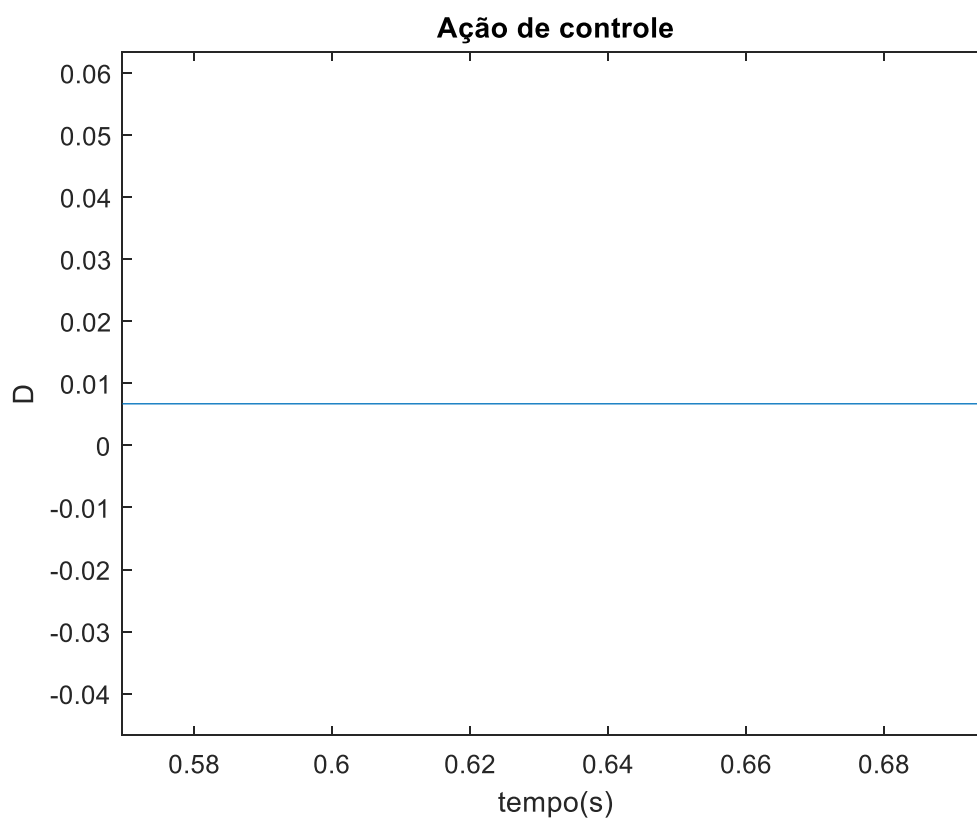


Figura 23 – Gráfico referente a ação de controle utilizando referência 0,006

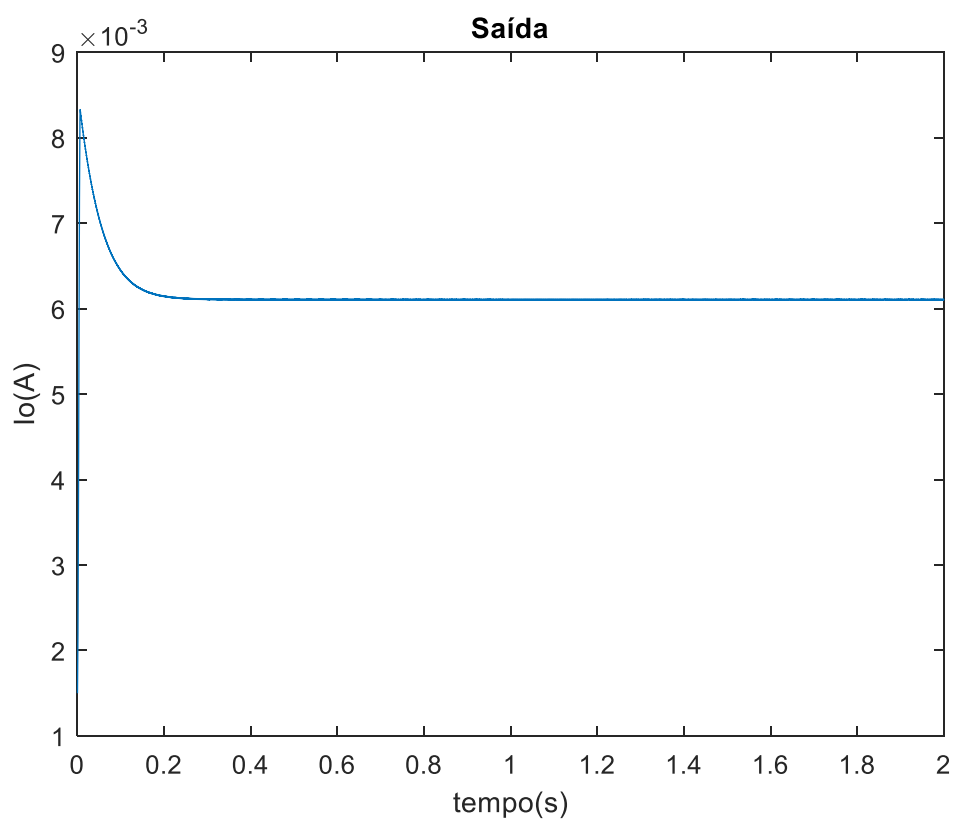


Figura 24 – Gráfico referente a corrente na saída utilizando referência 0,006

Para uma referência próxima ao limite inferior percebe-se a razão cíclica constante, com um valor próximo a zero, pois como a mesma é muito pequena, a chave do conversor permanece a maior parte do tempo fechada e o tempo em que está pequena é rápido. Em relação à corrente na saída, é possível notar que existe um pico até o tempo de 0.2 segundo seguido de uma estabilidade.

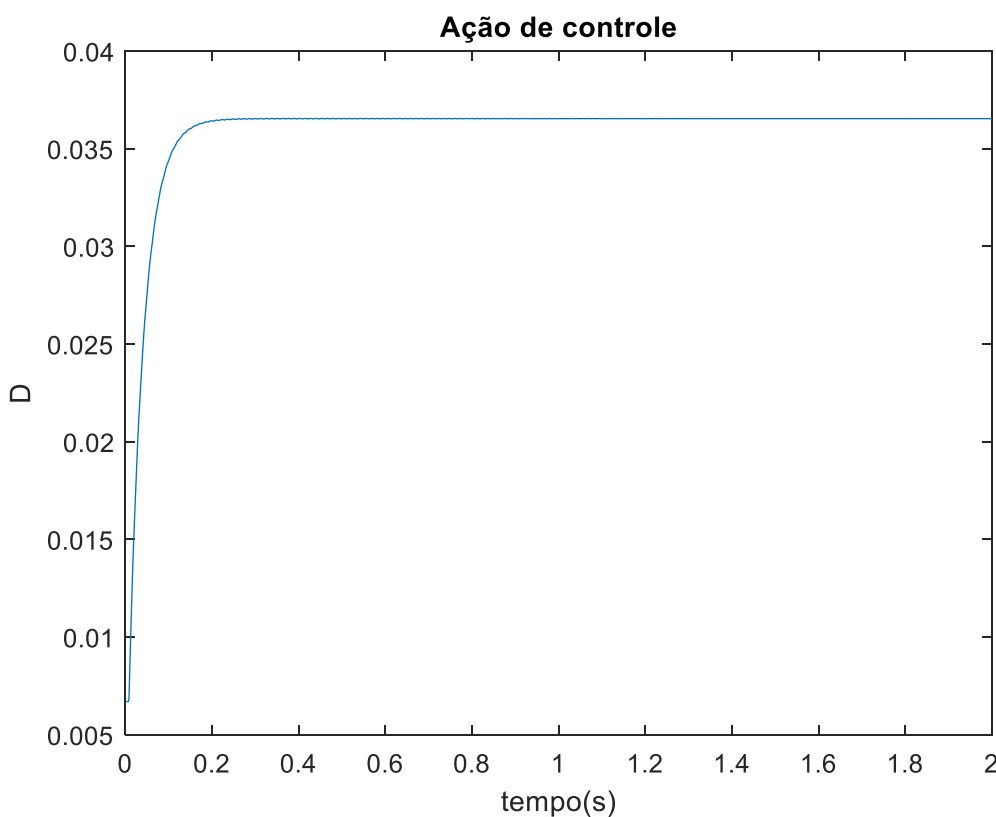


Figura 25 – Gráfico referente a ação de controle utilizando referência 0,05

Utilizando referência de 0,05 é possível observar que a ação do controle é constante e há uma variação na saída da corrente, porém a mesma é extremamente baixa, conforme indicados nas figuras 25 e 26.

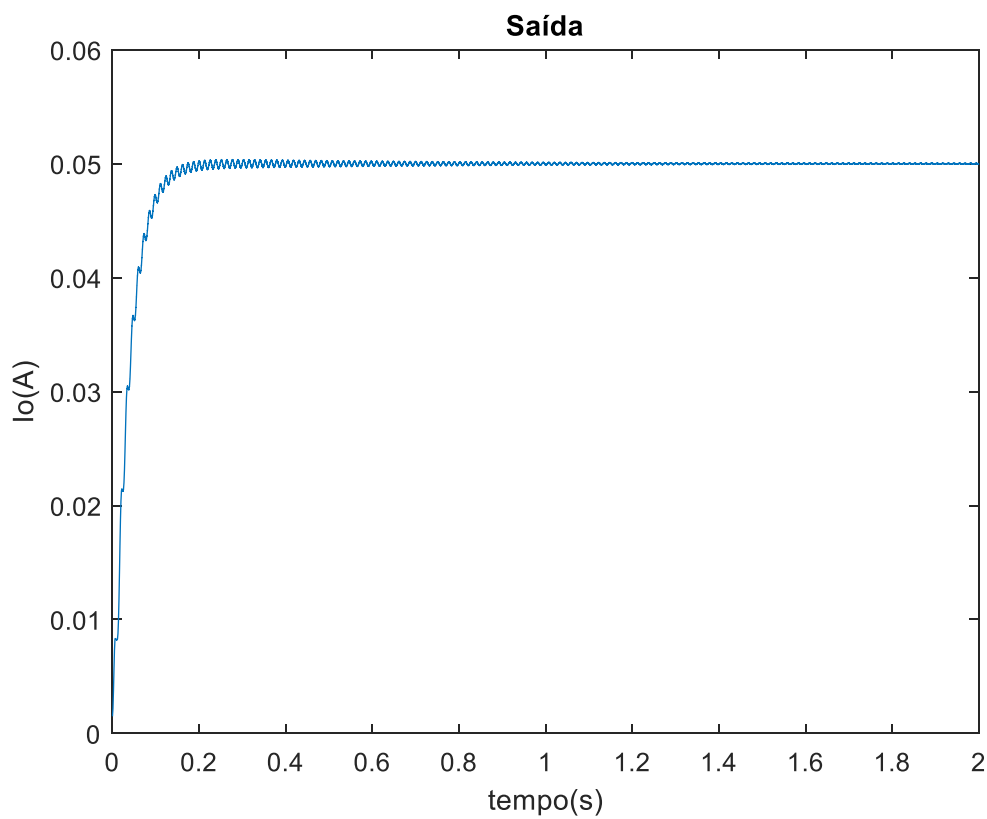


Figura 26 – Gráfico referente a corrente na saída utilizando referência 0,05

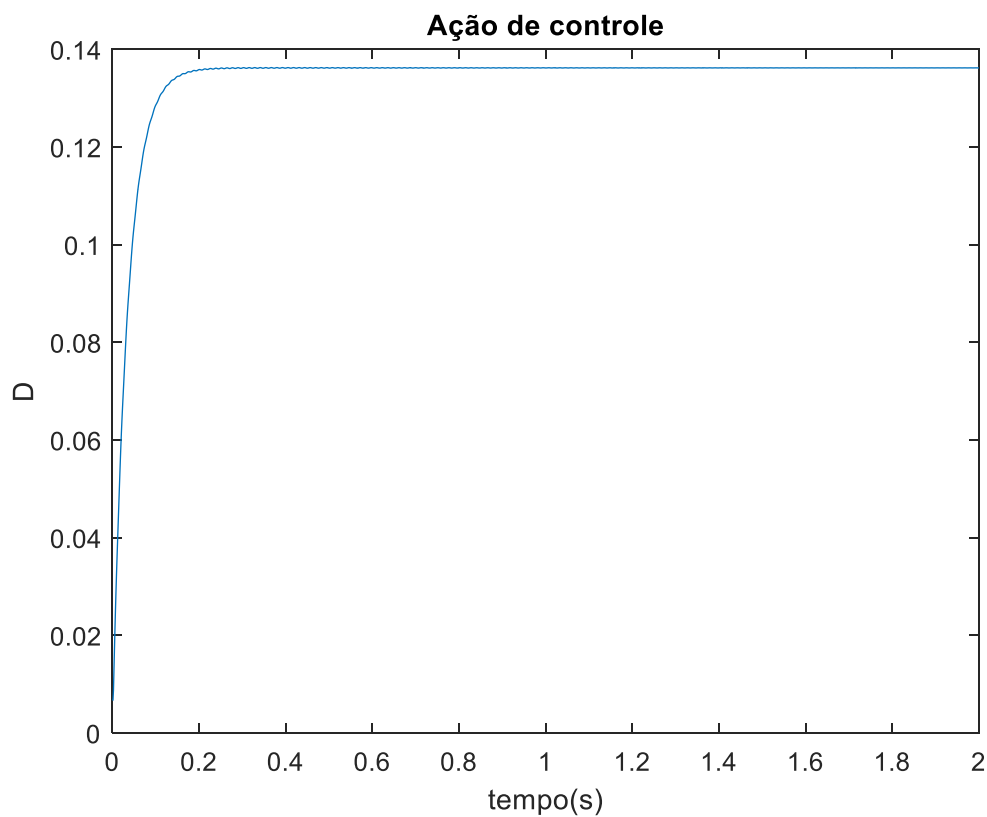


Figura 27 – Gráfico referente a ação de controle utilizando referência 0,2

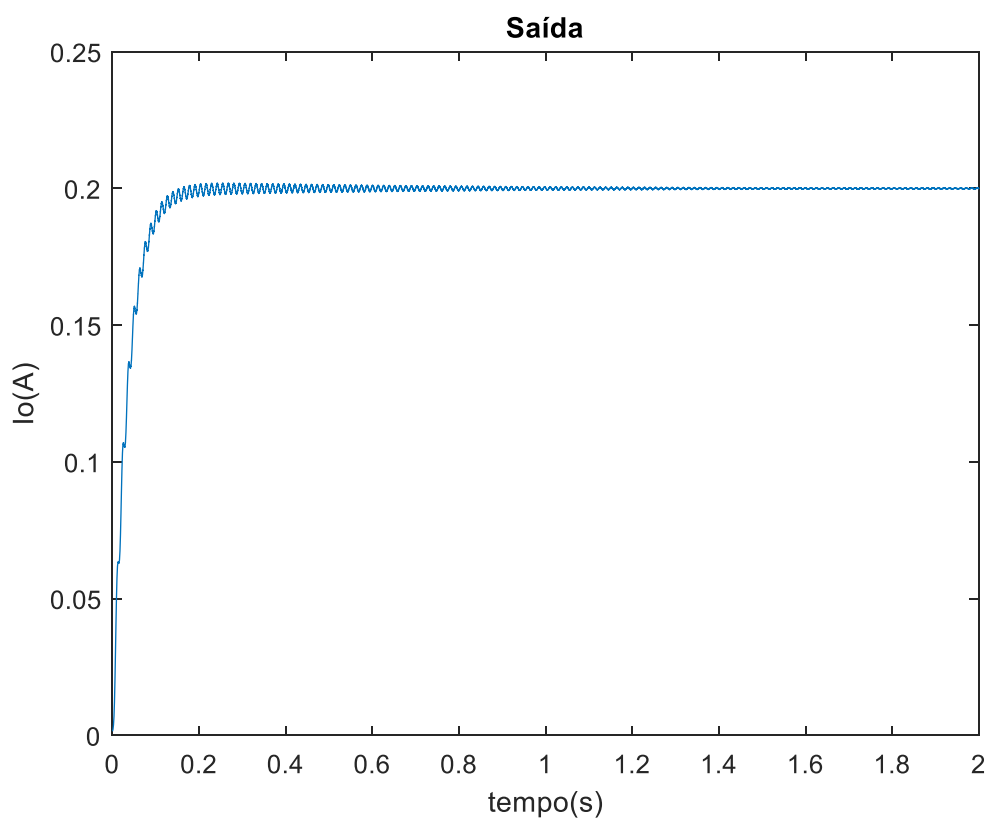


Figura 28 – Gráfico referente a corrente na saída utilizando referência 0,2

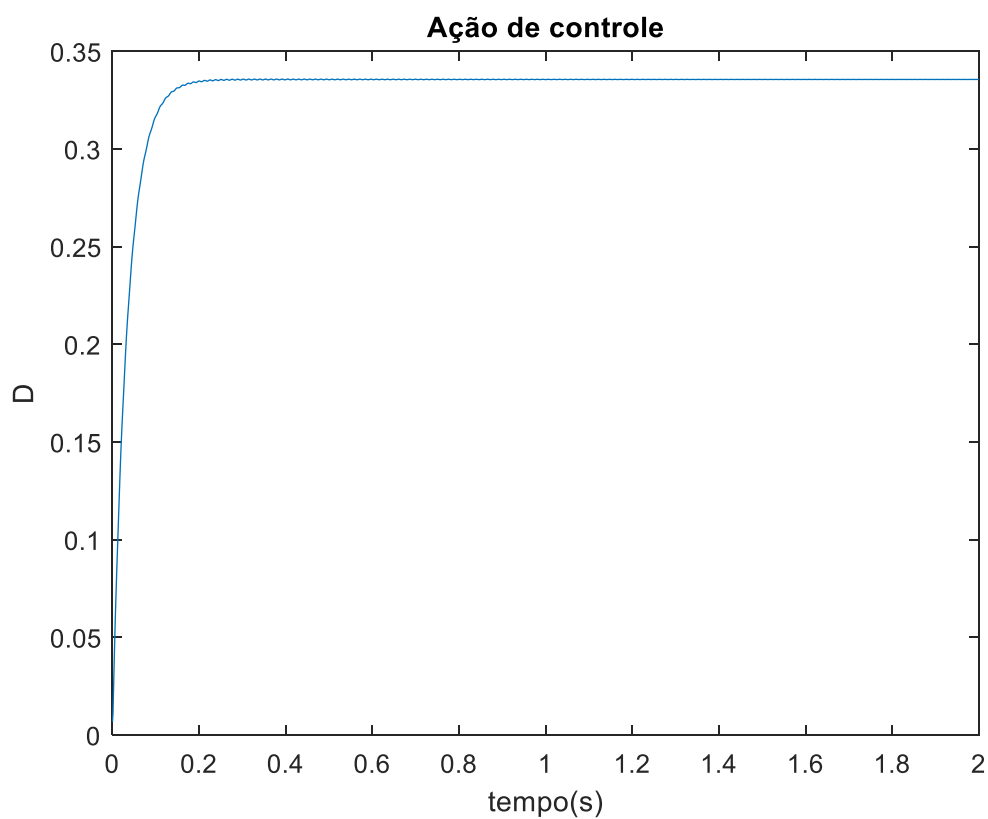


Figura 29 – Gráfico referente a ação de controle utilizando referência 0,5

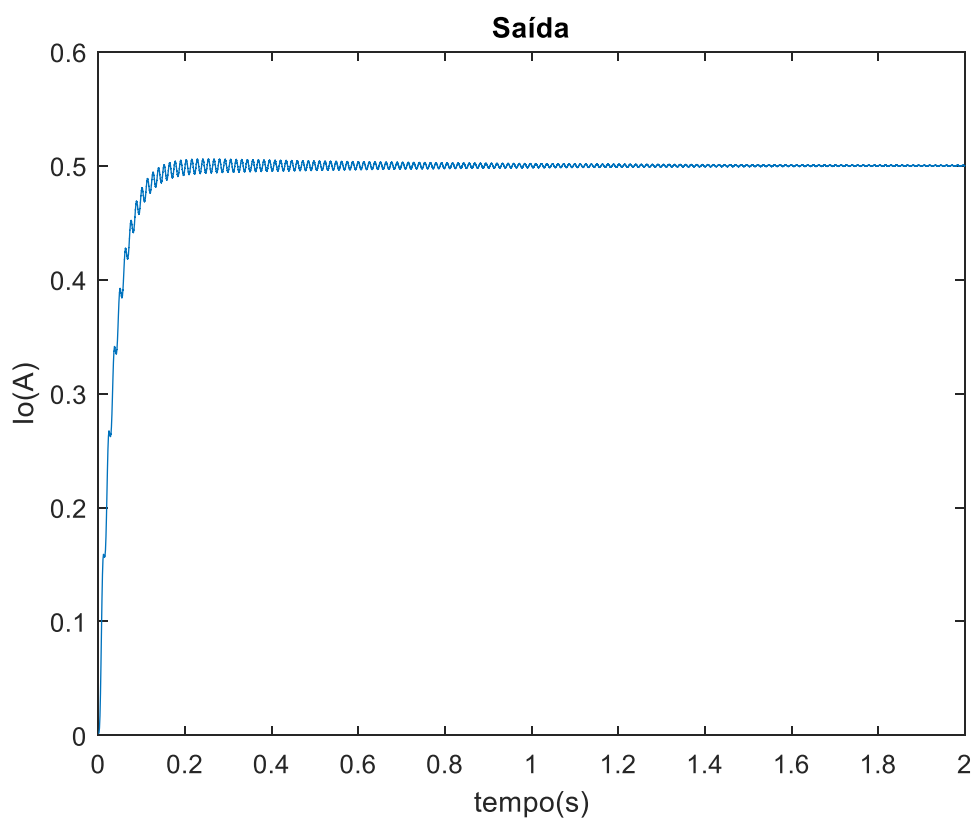


Figura 30 – Gráfico referente a corrente na saída utilizando referência 0,5

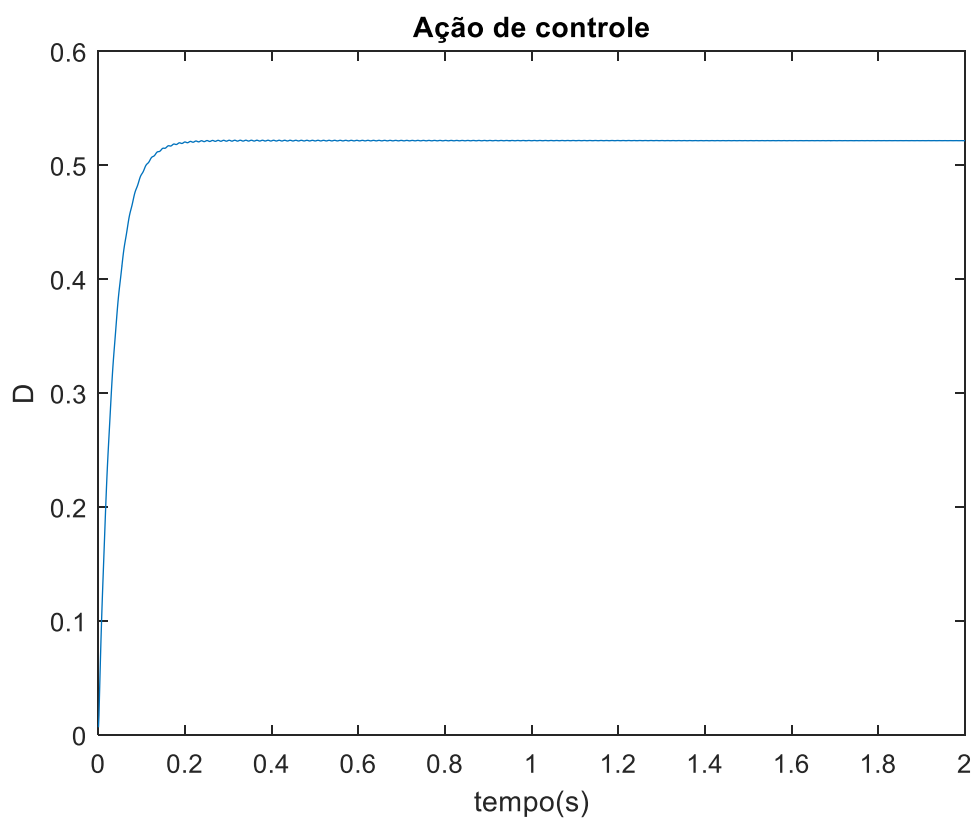


Figura 31 – Gráfico referente a ação de controle utilizando referência 0,78

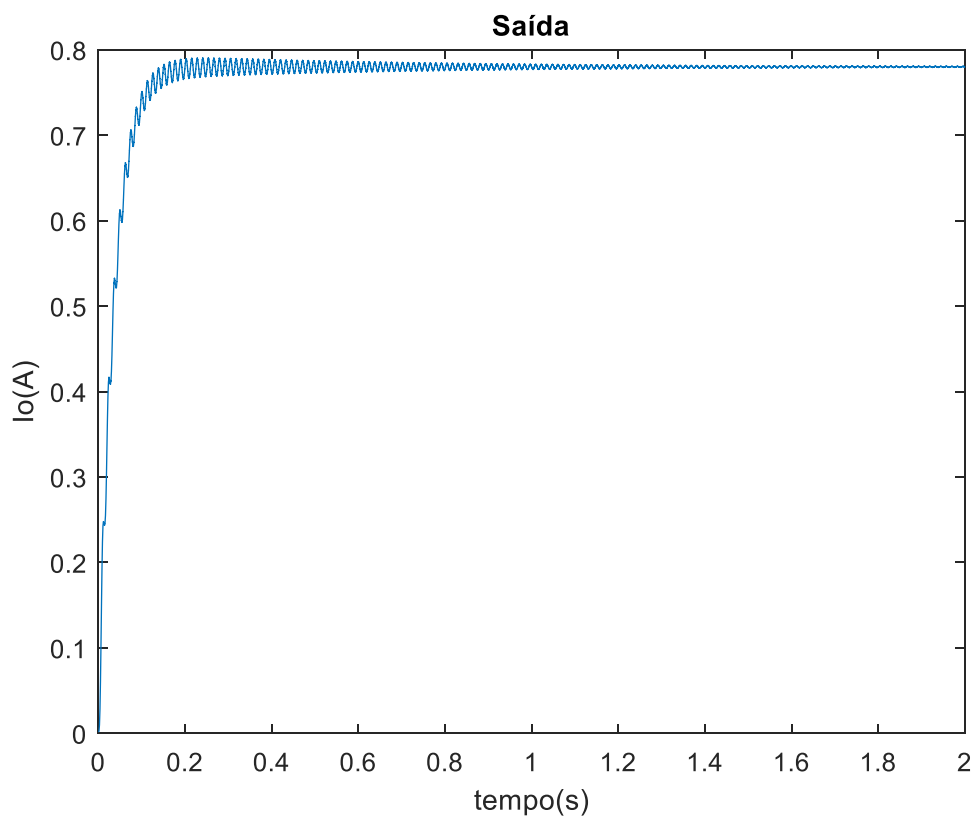


Figura 32 – Gráfico referente a corrente na saída utilizando referência 0,78

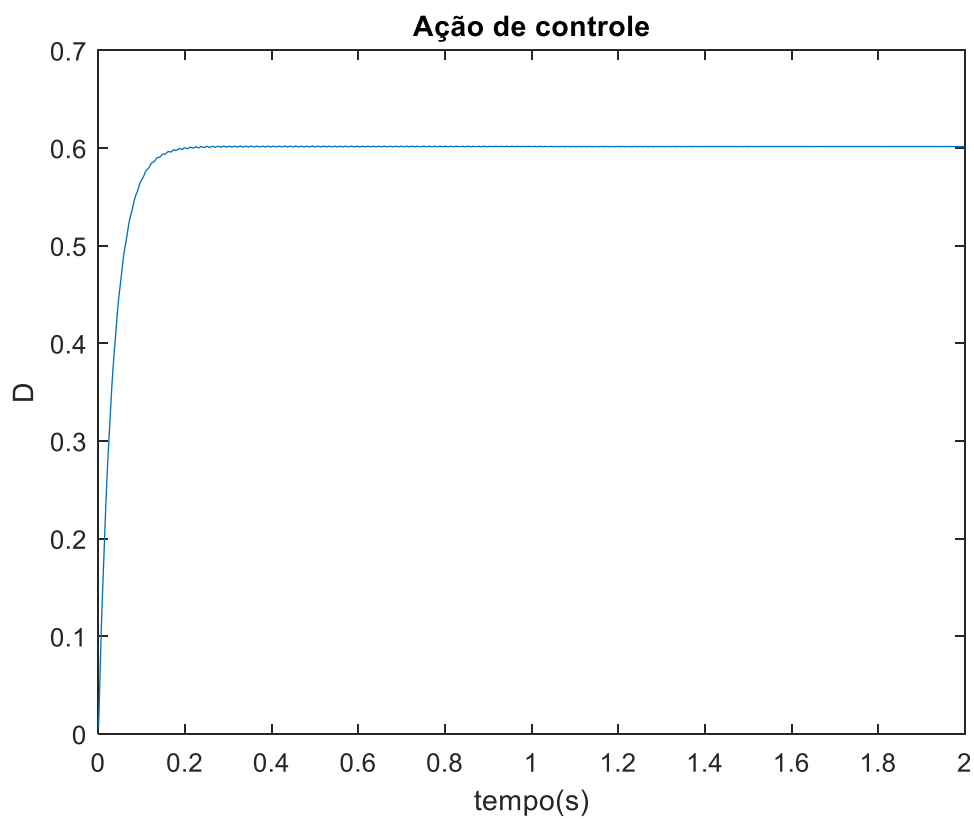


Figura 33 – Gráfico referente a ação de controle utilizando referência 0,9

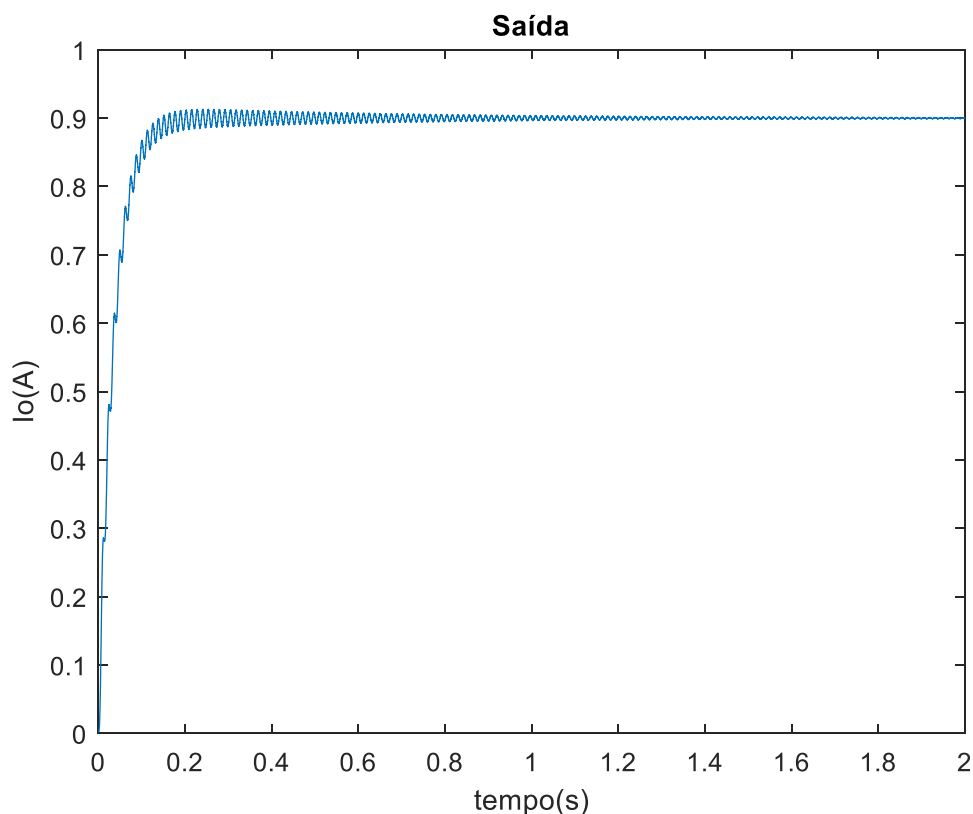


Figura 34 – Gráfico referente a corrente na saída utilizando referência 0,9

Os gráficos apresentados representam a razão cíclica (*duty cycle*) que está sendo utilizado pelo sinal PWM. Em relação a ação de controle, todos os gráficos gerados a partir das referências acima apresentam estabilidade, o que indica que este sistema pode ser implementado. Concomitantemente, os gráficos da corrente de saída apresentam ruídos, que aumentam de intensidade conforme a aproximação de 1 A. Entretanto, destaca-se que todos os ruídos acontecem em amplitudes baixas.

Para uma nova análise afim de uma posterior comparação dos gráficos, foi feita uma alteração no valor do ganho K_p , mudando-o para 0,2 no PID do simulink. Plotou-se os gráficos referentes a lei do controle e a resposta do sistema de malha fechado, indicados nas Figuras 34 e 35.

Adotou-se os valores de referência aplicados nas figuras 24 a 35 e para melhor proveito das análises, destacou-se a referência como sendo 0,05, conforme indicação nas figuras 35 e 36.

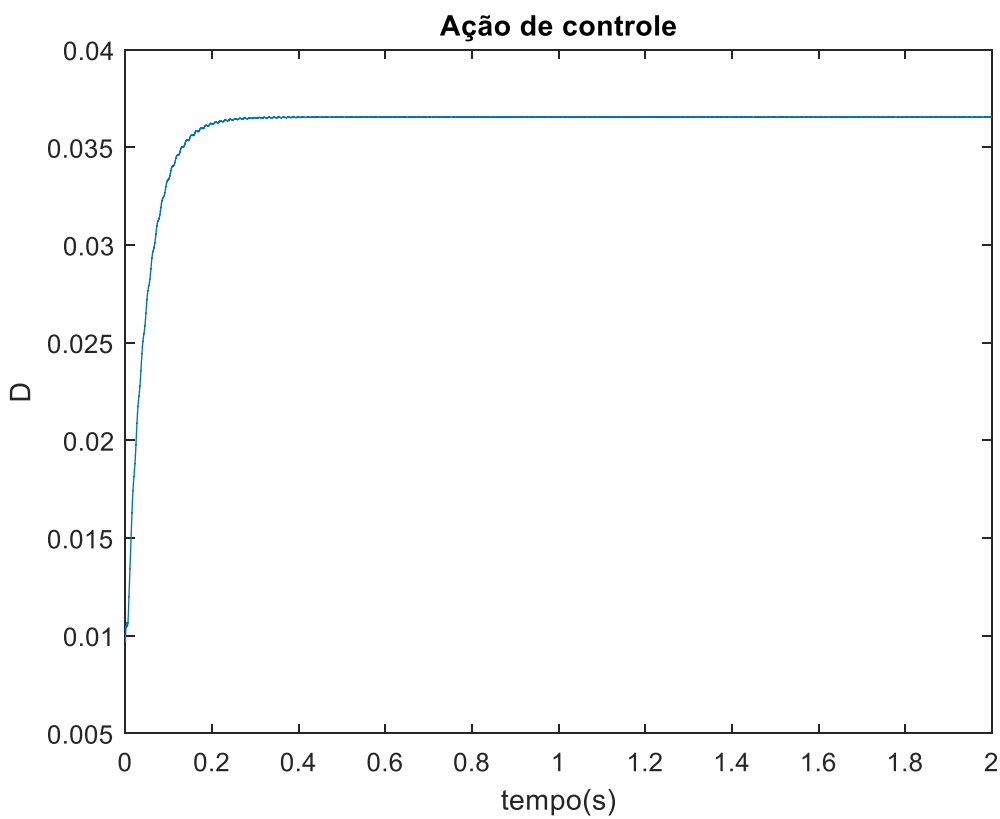


Figura 35 – Gráfico referente a ação de controle utilizando $K_p = 0,2$ e referência 0,05

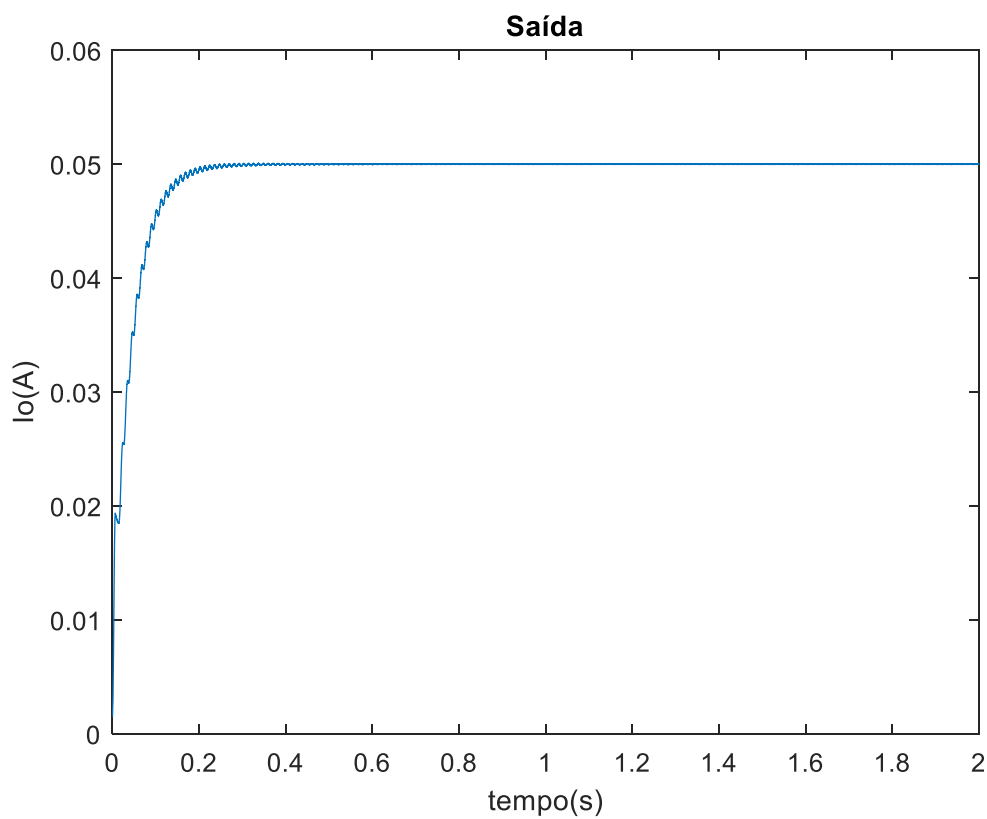


Figura 36 – Gráfico referente a corrente na saída utilizando $K_p=0,2$ e referência 0,05

O mesmo procedimento foi realizado para o valor do ganho K_p como sendo 0,4, a referência foi mantida como 0,05. As curvas obtidas seguem representadas nas imagens 37 e 38.

Para a realização dos gráficos foram alterados os valores da constante K_p e referência de forma aleatória, afim de se torna-se mais amplo o estudo do comportamento do sistema em malha fechada. Tornando possível a comprovação da eficácia do mesmo para os mais diversos valores.

Percebe-se através das figuras 35 a 38 que conforme um há um aumento no valor de K_p , existe também, uma crescente no valor do sobressinal do sistema, o que paulatinamente torna o sistema implementável com este controlador definido.

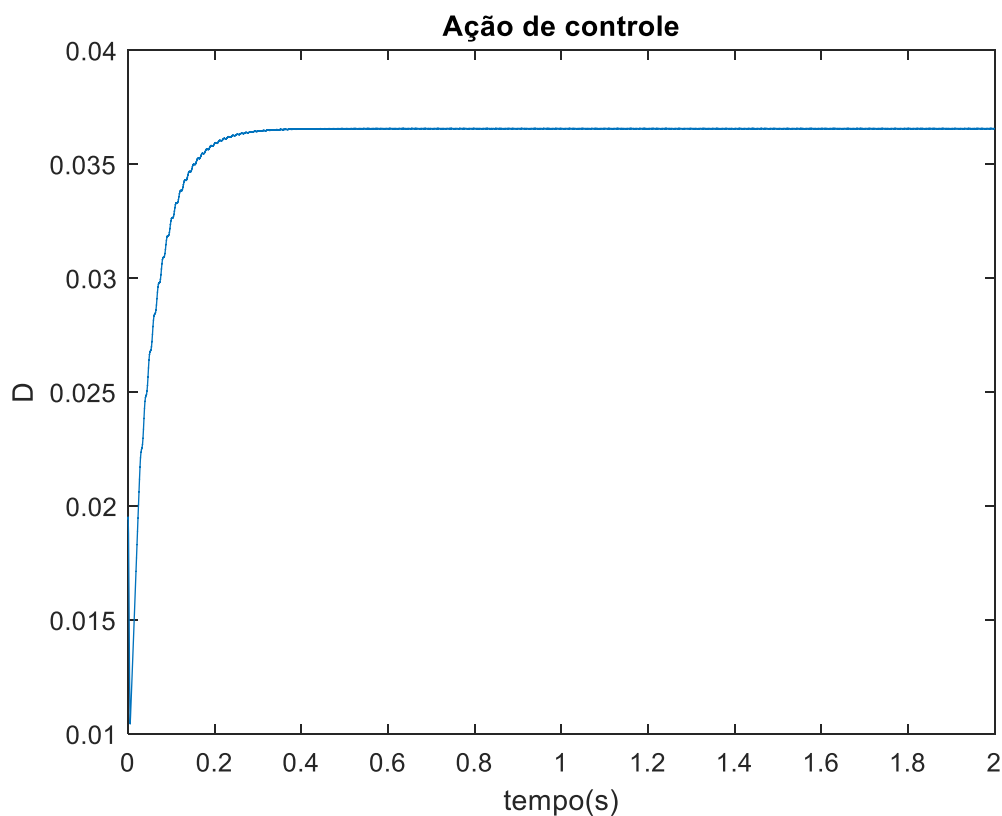


Figura 37 – Gráfico referente a ação de controle utilizando $K_p = 0,4$ e referência 0,05

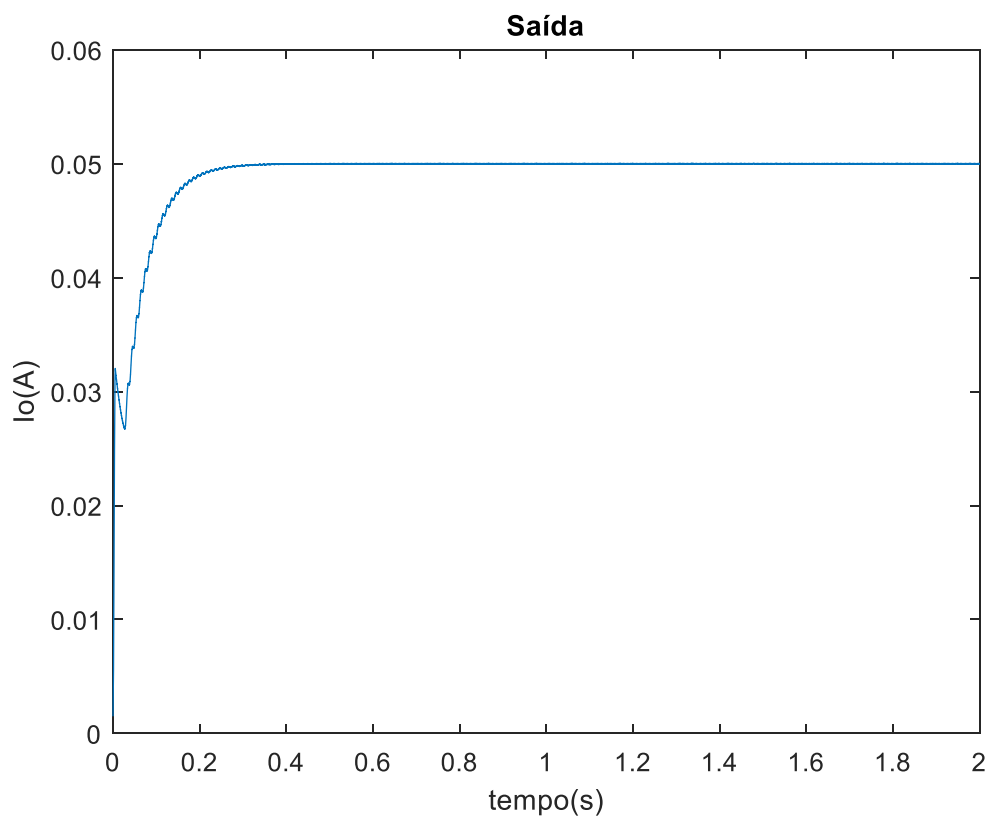


Figura 38 – Gráfico referente a corrente na saída utilizando $K_p = 0,4$ e referência $0,05$]

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após as simulações e os estudos feitos ao longo deste estudo, conclui-se que a construção de uma fonte de corrente utilizando um conversor *buck* para operar na faixa de 5 mA a 1 A é possível de ser feita e seu resultado é satisfatório. Entretanto, destaca-se que para a implementação do protótipo serão necessários ajustes posteriores, contudo, este trabalho indica boas diretrizes visto que apresenta componentes semelhantes aos disponíveis no mercado.

Considera-se que para a simulação não foi necessário a criação de um código específico pois o próprio software utilizado dispõe do aplicativo utilizado.

Com os resultados obtidos nos gráficos é possível observar que para um valor muito próximo à faixa inferior da corrente estabelecida, a razão cíclica do conversor é próximo a zero, pois neste caso a chave do transistor, pertencente ao conversor permanece a maior parte do tempo fechada.

Nota-se também que para valores próximos ao limite superior da corrente, a presença de sobressinais percentual relativamente altos, que podem comprometer a eficácia da fonte. Entretanto para os valores dentro dos limites pré-estabelecidos no início do trabalho, a utilização da fonte com o conversor buck e o controlador PI mostra-se eficaz.

Para o objetivo proposto neste trabalho, a utilização desta conversor se mostra eficiente, porém se a finalidade deste mesmo fosse o manuseio de correntes extremamente pequenos, uma solução para otimizar a eficácia do projeto seria a alteração do conversor.

Vale destacar que o dimensionamento do trabalho feito apresenta valores reais, com componentes existentes no mercado. Entretanto, a simulação deste circuito utilizou a função transferência real, desconsiderando a característica dinâmica, bem como as correntes parasitas do sistema.

REFERÊNCIAS

ALBURQUERQUE, Rômulo. **Circuitos de Corrente Contínua**. Disponível em: <<http://www.etelg.com.br/downloads/eletronica/cursos/index.html#aula011>>. Acesso em: 03 out. 2016.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência**. 5.ed. Florianópolis: Ed. Do Autor, 2005.

BATSCHAUER, Alessandro. **Apostila da Disciplina de Controle de Conversores Estáticos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Joinville, 2012.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.

BRAGA, Newton. **Instituto Newton Braga de Pesquisa**. Disponível em: <<http://www.newtonbraga.com.br/>>. Acesso em: 03 out. 2016.

BRITES, Paulo. **Fontes ou geradores de corrente constante**. Ed. Antenna: São Paulo, 1981.

IRWIN, J. David; NELMS, R. Mark. **Análise básica de circuitos para engenharia**. 10. ed. São Paulo: LTC, 2014.

I. V. Banu and M. Istrate, **Modeling of maximum power point tracking algorithm for photovoltaicsystems**. 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, Iasi, 2012, pp. 953-957. doi: 10.1109/ICEPE.2012.6463577

MAXWELL, Sistema. **Circuitos RLC de Segunda Ordem em Diferentes Topologias**. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/27280/modulo.html>>. Acesso em: 07 set. 2018.

MELLO, Luiz Fernando Pereira. **Projetos de Fontes Chaveadas**. 1. Ed. Érica: São Paulo, 2012.

MUSSOI, Fernando Luiz Rosa. **Notas de Aula: Resposta em frequência, filtros passivos**. CEFET-SC, Florianópolis, 2004.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo. Ed. Pearson, 2010.

ORSINI, Ana Cristina Cavalcanti. **Circuitos elétricos**. São Paulo: Prentice Hall.

PETRY, Clóvis Antônio. **Conversores CC-CC Não Isolados: Modelagem do Conversor**. Disponível em: <http://professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_CEFET/Conversores_Estáticos/2008_1/Aula_27.pdf>. Acesso em: 03 out. 2016.

POMILIO, José Antenor. **Fontes Chaveadas**. FEEC 13/95, 2010.

RODRIGUES, Leandro. **Estudo e Desenvolvimento de um conversor DC-DC de topologia buck para aplicação espacial**. Trabalho de Conclusão de Curso, São Carlos, 2007.

SILVA, R.A.S. Características do Diogo. Disponível em: <<http://www.creadigital.com.br/portal?txt=347731313839>>. Acesso em 15 de ago. 2018.

SILVA, S.A.O. **Notas de Aula: Eletrônica de Potência**. UTFPR, Campus Cornélio Procopio. 2º Semestre 2014

TEL REDES, Cursos. **Tabela de Valores para ESR de capacitores de uso em geral**. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/>>. Acesso em: 25 out. 2017.

TOOLEY, Mike. **Circuitos Eletrônicos: Fundamentos e Aplicações**. Ed. Elsevier: Rio de Janeiro, 2008.

TREVISI, C.H.G. **Apostila Eletrônica de Potência**. Londrina.

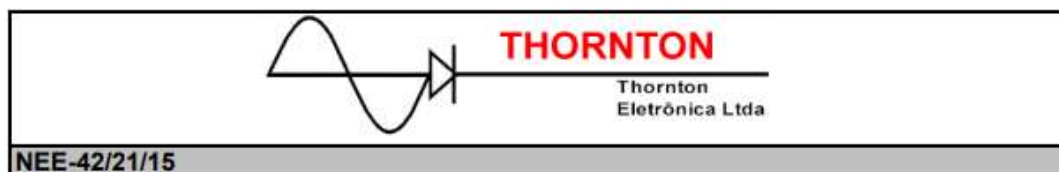
WENDLING, Marcelo. **Notas de Aula: Transistores**. UNESP, Guaratinguetá, 2009.

APÊNDICE A – TABELA DO NÚCLEO DE FERRITE DO INDUTOR

Modelo	mm										mm ²		mm ⁵
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	MLT	Ac	Wa	Kg
NEE-13/6/6	13,00	6,00	2,75	1,45	3,68	6,10	1,40	4,60	10,10	32,40	16,78	33,81	293,65
NEE-16/7,0/4	16,00	7,00	4,10	2,00	3,95	4,00	2,00	5,00	12,00	32,00	16,40	39,50	332,00
NEE-16/7,2/5	16,00	7,10	4,10	2,00	3,95	5,00	2,00	5,10	12,00	34,00	20,50	40,29	498,00
NEE-16/7,3/5	16,00	7,35	4,10	2,00	3,95	5,00	2,15	5,20	12,00	34,00	20,50	41,08	507,76
NEE-19/8/5	19,15	8,15	4,65	2,20	5,05	4,80	2,40	5,75	14,75	39,10	22,32	58,08	739,95
NEE-19/8/5,3	19,15	8,15	4,65	2,20	5,05	5,30	2,40	5,75	14,75	40,10	24,65	58,08	879,63
NEE-19/8/6	19,15	8,15	4,65	2,20	5,05	6,00	2,40	5,75	14,75	41,50	27,90	58,08	1089,31
NEE-20/10/5	20,00	10,20	5,20	3,60	3,80	5,30	3,90	6,30	12,80	36,20	27,56	47,88	1004,63
NEE-25/10/6	25,40	9,80	6,25	3,10	6,48	6,25	3,20	6,60	19,20	50,90	39,06	85,47	2562,22
NEE-28/10/11	28,00	10,60	7,20	4,70	5,70	10,70	4,30	6,30	18,60	58,60	77,04	71,82	7274,12
NEE-30/15/7	30,00	15,00	7,20	5,25	6,15	7,30	4,80	10,20	19,50	53,60	52,56	125,46	6466,23
NEE-30/15/7	30,00	15,00	7,20	5,25	6,15	7,30	4,80	10,20	19,50	53,60	52,56	125,46	6466,23
NEE-30/15/11	30,00	15,00	7,20	5,25	6,15	11,00	5,30	9,70	19,50	61,00	79,20	119,31	12268,67
NEE-30/15/11	30,00	15,00	7,20	5,25	6,15	11,00	5,30	9,70	19,50	61,00	79,20	119,31	12268,67
NEE-30/15/14	30,00	15,00	7,20	5,25	6,15	14,60	5,30	9,70	19,50	68,20	105,12	119,31	19331,39
NEE-40/17/12	40,50	17,00	12,05	6,50	7,73	12,05	7,00	10,00	27,50	79,10	145,20	154,50	41181,31
NEE-42/21/15	42,00	21,20	12,20	6,25	8,65	15,50	6,40	14,80	29,50	90,00	189,10	256,04	101729,84
NEE-42/21/20	42,00	21,20	12,20	6,25	8,65	20,00	6,40	14,80	29,50	99,00	244,00	256,04	153975,73
NEE-55/28/21	55,00	27,80	17,20	8,75	10,15	21,00	9,30	18,50	37,50	117,00	361,20	375,55	418771,76
NEE-65/33/13	66,50	32,20	19,30	11,15	12,45	13,70	10,20	22,00	44,20	115,80	264,41	547,80	330726,67
NEE-65/33/26	66,50	32,20	19,30	11,15	12,45	27,00	10,20	22,00	44,20	142,40	521,10	547,80	1044610,01
NEE-65/33/39	66,50	32,20	19,30	11,15	12,45	39,90	10,20	22,00	44,20	168,20	770,07	547,80	1931329,82
NEE-65/33/52	66,50	32,20	19,30	11,15	12,45	52,40	10,20	22,00	44,20	193,20	1011,32	547,80	2899960,60
NEE-76/50/25	76,20	50,80	25,40	12,70	12,70	25,40	12,70	38,10	50,80	152,40	645,16	967,74	2643069,55
NEE-76/50/50	76,20	50,80	25,40	12,70	12,70	50,80	12,70	38,10	50,80	203,20	1290,32	967,74	7929208,66
NEE-76/50/76	76,20	50,80	25,40	12,70	12,70	76,20	12,70	38,10	50,80	254,00	1935,48	967,74	14272575,58
NEE-80/38/20	80	38,5	20,2	10,55	19,35	20,2	10,6	27,9	58,9	158,20	408,04	1079,73	1136355,37

Disponível em: <<http://www.electroncad.com.br/index.php/pr-br/eletricidade/indutores-transformadores/75-parametros-nucleos-ferrite-ee>>. Acesso em 20 de ago. 2017.

APÊNDICE B – PARÂMETROS INDUTOR

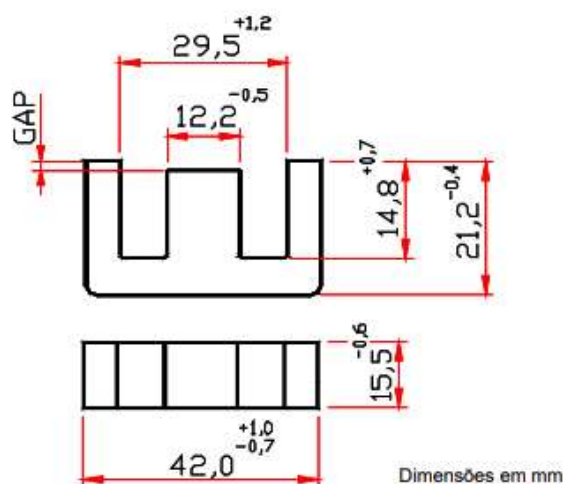


NEE-42/21/15

Parâmetros Efetivos do Núcleo:

$\Sigma I/A$	0,54	mm ⁻¹
L_e	97,0	mm
A_e	181,0	mm ²
A_{min}	---	mm ²
V_e	17600,0	mm ³

Peso Aprox. (pç) 44,0 g



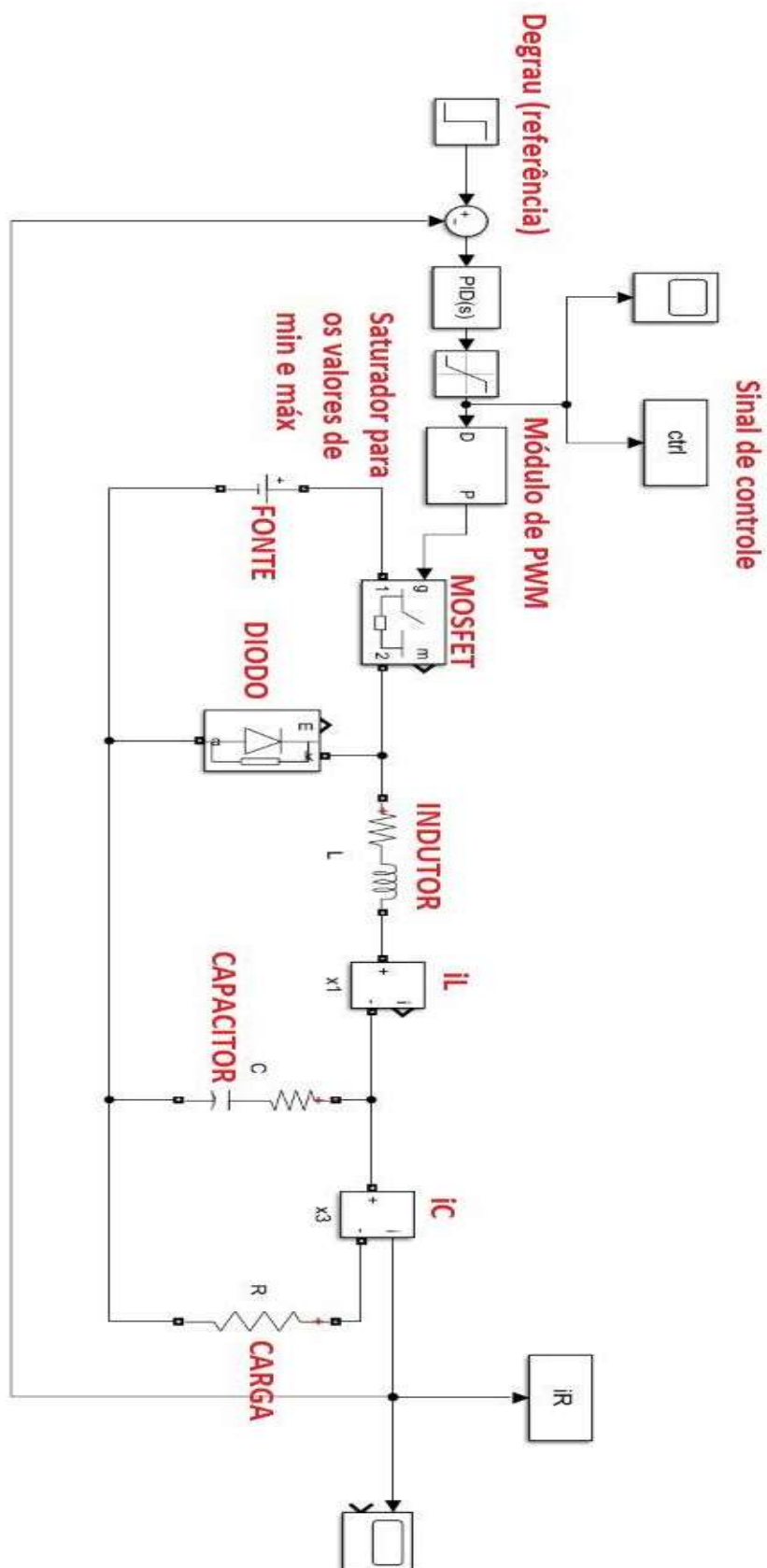
SEM GAP

DESCRIÇÃO DE ENCOMENDA	MATERIAL	AI [nH]	Tol. %	~g [mm]	~ μ e
NEE-42/21/15-4000-IP12R	IP12R	4000	± 25	---	1719
NEE-42/21/15-4000-IP6	IP6	4000	± 25	---	1719
NEE-42/21/15-4100-IP12E	IP12E	4100	± 25	---	1762

Outros AI's mediante consulta

APÊNDICE C – PROJETO NO SIMULINK

Continuous



APÊNDICE D – CATÁLOGO DE FIOS DE COBRE

AWG	Diâmetro Cobre (cm)	Área Cobre (cm ²)	Diâmetro c/ isol. (cm)	Área c/ isol. (cm ²)	Ohms/cm 20° C	Ohms/Cm 100°C
10	0,259	0,052620	0,273	0,058572	0,000033	0,000044
11	0,231	0,041729	0,244	0,046738	0,000041	0,000055
12	0,205	0,033092	0,218	0,037309	0,000052	0,000070
13	0,183	0,026243	0,195	0,029793	0,000066	0,000088
14	0,163	0,020811	0,174	0,023800	0,000083	0,000111
15	0,145	0,016504	0,156	0,019021	0,000104	0,000140
16	0,129	0,013088	0,139	0,015207	0,000132	0,000176
17	0,115	0,010379	0,124	0,012164	0,000166	0,000222
18	0,102	0,008231	0,111	0,009735	0,000209	0,000280
19	0,091	0,006527	0,100	0,007794	0,000264	0,000353
20	0,081	0,005176	0,089	0,006244	0,000333	0,000445
21	0,072	0,004105	0,080	0,005004	0,000420	0,000561
22	0,064	0,003255	0,071	0,004013	0,000530	0,000708
23	0,057	0,002582	0,064	0,003221	0,000668	0,000892
24	0,051	0,002047	0,057	0,002586	0,000842	0,001125
25	0,045	0,001624	0,051	0,002078	0,001062	0,001419
26	0,040	0,001287	0,046	0,001671	0,001339	0,001789
27	0,036	0,001021	0,041	0,001344	0,001689	0,002256
28	0,032	0,000810	0,037	0,001083	0,002129	0,002845
29	0,029	0,000642	0,033	0,000872	0,002685	0,003587
30	0,025	0,000509	0,030	0,000704	0,003386	0,004523
31	0,023	0,000404	0,027	0,000568	0,004269	0,005704
32	0,020	0,000320	0,024	0,000459	0,005384	0,007192
33	0,018	0,000254	0,022	0,000371	0,006789	0,009070
34	0,016	0,000201	0,020	0,000300	0,008560	0,011437
35	0,014	0,000160	0,018	0,000243	0,010795	0,014422
36	0,013	0,000127	0,016	0,000197	0,013612	0,018186
37	0,011	0,000100	0,014	0,000160	0,017165	0,022932
38	0,010	0,000080	0,013	0,000130	0,021644	0,028917
39	0,009	0,000063	0,012	0,000106	0,027293	0,036464
40	0,008	0,000050	0,010	0,000086	0,034417	0,045981

Disponível em: <<https://neweletroengenharia.blogspot.com/2017/08/tabela-awg-american-wire-gauge.html>>. Acesso em 25 de set. 2017.