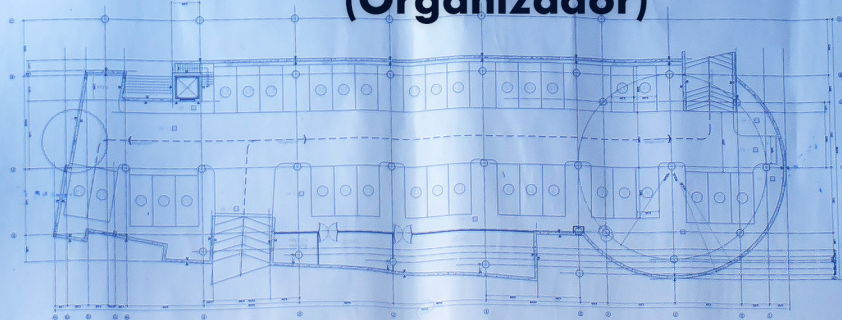


# Engenharias, Ciência e Tecnologia 2

**Luís Fernando Paulista Cotian  
(Organizador)**



**Atena**  
Editora  
Ano 2019

**Luís Fernando Paulista Cotian**  
(Organizador)

# **Engenharias, Ciência e Tecnologia**

## **2**

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Lorena Prestes

Revisão: Os autores

#### Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E57 Engenharias, ciência e tecnologia 2 [recurso eletrônico] / Organizador  
Luís Fernando Paulista Cotian. – Ponta Grossa (PR): Atena  
Editora, 2019. – (Engenharias, Ciência e Tecnologia; v. 2)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia.

ISBN 978-85-7247-085-8

DOI 10.22533/at.ed.858193101

1. Ciência. 2. Engenharia. 3. Inovações tecnológicas.  
4. Tecnologia. I. Cotian, Luís Fernando Paulista. II. Série.

CDD 658.5

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de  
responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos  
autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

A obra “Engenharia, Ciência e Tecnologia” aborda uma série de livros de publicação da Atena Editora. O volume II apresenta, em seus 15 capítulos, conhecimentos relacionados a Gestão de Resíduos relacionadas à engenharia de produção nas áreas de Gestão de Recursos Naturais, Produção mais Limpa e Ecoeficiência e Gestão de Resíduos Industriais e Prevenção de Poluição.

As áreas temáticas de Gestão de Resíduos relacionadas tratam de temas relevantes para a prevenção de poluição. As análises e aplicações de novos estudos proporciona que estudantes utilizem conhecimentos tanto teóricos quanto tácitos na área acadêmica ou no desempenho da função em alguma empresa.

Para atender os requisitos do mercado as organizações precisam levar em consideração a área de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável, sejam eles do mercado ou do próprio ambiente interno, tornando-a mais competitiva e seguindo a legislação vigente.

Aos autores dos capítulos, ficam registrados os agradecimentos do Organizador e da Atena Editora, pela dedicação e empenho sem limites que tornaram realidade esta obra, que retrata os recentes avanços científicos do tema.

Por fim, espero que esta obra venha a corroborar no desenvolvimento de novos conhecimentos de Gestão de Resíduos e auxilie os estudantes e pesquisadores na imersão em novas reflexões acerca dos tópicos relevantes na área de engenharia de produção.

Boa leitura!

Luís Fernando Paulista Cotian

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
AVALIAÇÃO DA ADSORÇÃO COM CARVÃO VEGETAL PARA A PURIFICAÇÃO DE BODIESEL OBTIDO A PARTIR DE ÓLEOS DE MILHO	
<i>Maria Carolina Sérgi Gomes</i>	
<i>Juliana Guerra Sgorlon</i>	
<i>Maraísa Lopes de Menezes</i>	
<i>Vassula Belinato Paiva</i>	
<i>Fernanda Nunes de Proença</i>	
<i>Mariane Borges Gheller</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8581931011</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>11</b>
AVALIAÇÃO DA GRANULOMETRIA DO BAGAÇO DE MALTE SOBRE A ADSORÇÃO DO CORANTE DE AZUL DE METILENO UTILIZANDO COLUNA DE LEITO FIXO	
<i>Jordana Benfíca Silva</i>	
<i>Heitor Otacílio Nogueira Altino</i>	
<i>Renata Nepomuceno da Cunha</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8581931012</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>18</b>
AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE PARTICULADO NA QUEDA DE PRESSÃO DE UM CICLONE LAPPLE	
<i>Rosilanny Soares Carvalho</i>	
<i>Daiane Ribeiro Dias</i>	
<i>João Carlos Gonçalves</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8581931013</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>30</b>
AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS: SEDIM 2.0	
<i>Roberta de Almeida Costa Campeão</i>	
<i>Mônica de Aquino Galeano Massera da Hora</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8581931014</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>38</b>
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE UM CICLONE ADAPTADO COM BOCAIS ATOMIZADORES DE ÁGUA PARA COLETAR MATERIAL PARTICULADO PROVENIENTE DA QUEIMA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR	
<i>Ana Elisa Achilles</i>	
<i>Vádila Giovana Guerra Béttega</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8581931015</b>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>55</b>
DESEMPENHO DE FILTRO TIPO BOLSA PARA SEPARAÇÃO DE RESÍDUOS DE HERBICIDAS	
<i>Daniela Teixeira Chaves</i>	
<i>José Roberto Delalibera Finzer</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8581931016</b>	

**CAPÍTULO 7 ..... 71**

DISTRIBUIÇÃO DE CHUMBO TOTAL EM AMOSTRAS DE SEDIMENTOS E SUBSTÂNCIAS HÚMICAS EXTRAÍDAS DE SEDIMENTOS COLETADOS EM MANANCIAS COM DIFERENTES TIPOS DE ÁGUA DA BACIA AMAZÔNICA

*Tania Machado da Silva*  
*Bruno Cesar Prior Rocha*  
*Wilyane Silva Figueiredo*  
*Luiz Fabrício Zara*  
*Gustavo Rocha de Castro*  
*André Henrique Rosa*

**DOI 10.22533/at.ed.8581931017**

**CAPÍTULO 8 ..... 87**

ESTUDO DAS CONDIÇÕES PARA A SÍNTESE DE BIODIESEL A PARTIR DO ÓLEO DE ABACATE E PEROVSKITA RESIDUAL ( $Ca_2Fe_2O_5$ )

*Rondinele Aberto dos Reis Ferreira*  
*Juarez Hilleshein Júnior*  
*Priscila Pereira Silva*

**DOI 10.22533/at.ed.8581931018**

**CAPÍTULO 9 ..... 102**

ESTUDO DE CASO EM OBRA NA CIDADE DE MACEIÓ: PROPOSTA PARA MELHORIA NO DESTINO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

*Kelliany Medeiros Costa*  
*José Leandro da Silva Duarte*  
*Carmem Lúcia de Paiva e Silva Zanta*

**DOI 10.22533/at.ed.8581931019**

**CAPÍTULO 10 ..... 112**

COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO APLICADOS EM EMULSÕES A/O MONODIPERSAS

*Lucas Henrique Pagoto Deoclecio*  
*Ana Paula Meneguelo*  
*Daniel Cunha Ribeiro*

**DOI 10.22533/at.ed.85819310110**

**CAPÍTULO 11 ..... 128**

POTÊNCIA NECESSÁRIA AO RALEAMENTO DA VEGETAÇÃO NO SEMIÁRIDO

*Márcio Waltzer Timm*  
*Antônio Lilles Tavares Machado*  
*Roberto Lilles Tavares Machado*  
*Rafael Gonçalves Tonucci*

**DOI 10.22533/at.ed.85819310111**

**CAPÍTULO 12 ..... 137**

SANEAMENTO: EVOLUÇÃO DAS OBRAS DE INFRAESTRUTURA E MELHORIA DA QUALIDADE DE VIDA DO BAIRRO PARAVIANA EM BOA VISTA/RR

*Francilene Cardoso Alves Fortes*  
*Emerson Lopes de Amorim*  
*Iury Costa Aragão*  
*Thiago Barreto Tavares*  
*Cleiton Leandro Santana*  
*Maikon Barros de Lima*

**DOI 10.22533/at.ed.85819310112**

<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>152</b>
SANEAMENTO: IMPLICAÇÕES E EXECUÇÕES NAS OBRAS DE SANEAMENTO BÁSICO NO BAIRRO CINTURÃO VERDE NO MUNICÍPIO DE BOA VISTA/RR	
<i>Francilene Cardoso Alves Fortes</i>	
<i>Emerson Lopes de Amorim</i>	
<i>Simone Vieira Vaz</i>	
<i>Geislani da Luz Araujo</i>	
<i>Numeriano Dantas de Medeiros</i>	
<i>Fabio Rodrigues de Jesus</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.85819310113</b>	
<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>166</b>
SINTONIA ÓTIMA DO CONTROLADOR PID APLICADO AO CONVERSOR CC-CC BUCK	
<i>Rhonei Patric dos Santos</i>	
<i>Lucas Sampaio Garcia</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.85819310114</b>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>178</b>
APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DO CAROÇO DE AZEITONA PARA A PRODUÇÃO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO	
<i>Luíza Silveira Cabral</i>	
<i>Manoela Silva Lima Mariotini Carotta</i>	
<i>Érica Vieira Barbosa</i>	
<i>Juliana Fusco Pachani dos Santos</i>	
<i>Ana Carla Pinheiro Lima</i>	
<i>Cristiane de Souza Siqueira Pereira</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.85819310115</b>	
<b>SOBRE O ORGANIZADOR</b> .....	<b>189</b>

## SINTONIA ÓTIMA DO CONTROLADOR PID APLICADO AO CONVERSOR CC-CC BUCK

### Rhonei Patric dos Santos

rhoneipatric.eletrica@gmail.com

Universidade Estadual de Santa Cruz

Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas

Rodovia Jorge Amado, Km 16, Bairro Salobrinho

45662-900 – Ilhéus – Bahia

### Lucas Sampaio Garcia

lucasufu@gmail.com

Universidade Estadual de Santa Cruz

Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas

Rodovia Jorge Amado, Km 16, Bairro Salobrinho

45662-900 – Ilhéus – Bahia

**RESUMO:** Com o objetivo de se conhecer o comportamento de conversores CC-CC, que fornecem tensão contínua regulada a partir de uma fonte CC não regulada, o estudo desenvolvido neste trabalho refere-se ao desenvolvimento de um conversor do tipo buck. Este, que fornece tensão reduzida em relação à tensão de entrada, foi objeto de estudo em que obteve-se a partir de modelagem matemática a estratégia de controle para regulação de tensão. Utilizou-se uma estratégia de controle ótima baseada nos índices de desempenho de erro, visando minimizar o efeito de perturbações na regulação da tensão fornecida à carga. Resultados de simulações são apresentados como estágio inicial do estudo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Conversor buck, Conversor cc-cc, Controlador PID, Controle ótimo, Espaço de estados.

**ABSTRACT:** In order to know the behavior of DC-DC converters, which provide regulated DC voltage from an unregulated DC source, the study developed in this paper refers to the development of a buck type converter. That provides reduced voltage in relation to input voltage, then it was the object of study in order to obtain a control strategy for voltage regulation from mathematical modeling. It used an optimal control strategy based on error performance indexes to minimize the effect of disturbances in the voltage regulation provided to the load. Simulation results are presented as the first stage of this study.

**KEYWORDS:** Buck converter, DC-DC converter, PID controller, Optimal control, State space

### 1 | INTRODUÇÃO

O conversor CC-CC ou *chopper*, como costuma ser denominado é usado para obter uma tensão CC variável a partir de uma fonte de tensão CC constante. O valor médio da tensão de saída varia de acordo com o tempo no qual a saída fica ligada à entrada. Essa conversão pode ser obtida pela combinação de



um indutor e/ou capacitor e de um dispositivo de estado sólido que opere no modo de chaveamento de alta frequência.

Os conversores CC-CC são usados em várias aplicações industriais nas quais há uma fonte constante. As aplicações típicas incluem controle de motores CC para tração elétrica, chaveamento de alimentadores de potência, UPS (*uninterruptible power supplies* - fontes de alimentação de funcionamento contínuo) e equipamentos operados por bateria (AHMED, 200).

Distúrbios no ponto de operação, na entrada ou na carga, implicam na necessidade de implementação de controladores para que a tensão de saída seja mantida constante.

Ao longo dos anos diversos autores se preocuparam em estudar métodos de sintonia para controladores, especialmente o controlador PID, devido à necessidade de se obter facilmente a resposta desejada do processo de acordo com o modelo ou resposta dinâmica do sistema. Mais recentemente, foram apresentadas técnicas baseadas em otimização para a obtenção da sintonia ótima segundo critérios de desempenho clássicos. Sendo assim, utilizou-se um método de sintonia ótimo via otimização *online* utilizando os índices de desempenho baseados na integral do erro.

O objeto de estudo deste trabalho é o conversor *buck*, apresentando estudos sobre seu princípio de funcionamento, modelagem matemática, através do espaço de estados médio e estratégia de controle, aplicando a sintonia ótima do controlador PID através dos índices de desempenho baseados na integral do erro. Tal metodologia possibilita um ajuste automático do controlador PID com o auxílio de um sistema embarcado ao conversor, definindo-se apenas qual índice melhor se adequa à necessidade, o PID pode ser auto-ajustado, mesmo sem um conhecimento do modelo da planta. Os resultados puderam ser validados através de simulações computacionais.

## 2 | CONVERSOR BUCK

O conversor *buck* é um conversor abaixador que transforma uma tensão CC constante em uma tensão CC ajustável e menor que a tensão de entrada. O circuito do conversor *buck* está representado na Figura 1 (ERICKSON & MAKSIMOVIC, 2001).

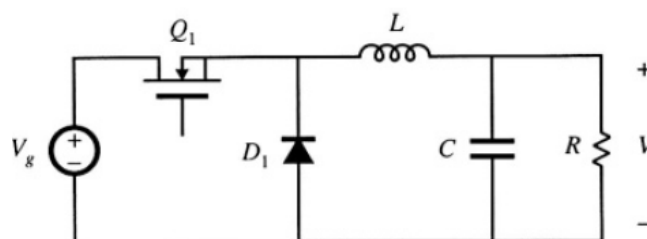


Figura 1 - Conversor buck

O conversor funciona da seguinte forma: Quando o interruptor é acionado, o dispositivo de estado sólido faz com que o diodo polarize-se inversamente, e a fonte, junto ao indutor, transfere energia à carga elevando o potencial do capacitor. Quando o interruptor é desligado pelo controle, a carga drena energia armazenada no filtro  $LC$ , reduzindo o potencial do capacitor por sua vez, através da polarização direta de .

A Figura 2 ilustra as etapas de operação do conversor. A Figura 3 mostra a forma de onda da corrente no indutor (ERICKSON & MAKSIMOVIC, 2001).

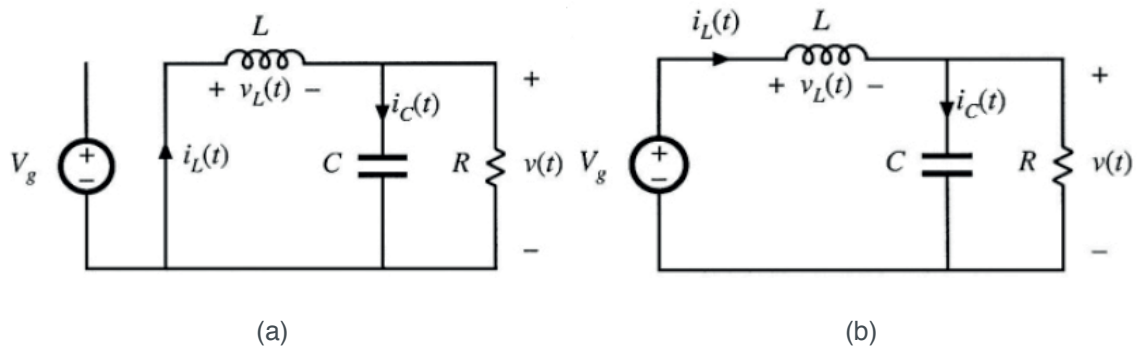


Figura 2 – Etapas de Operação do Conversor *buck*: (a) Chave fechada; (b) Chave aberta

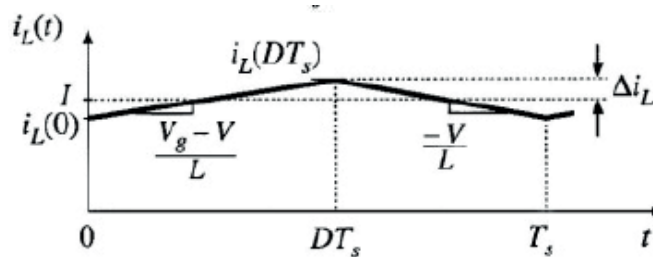


Figura 3 - Forma de onda da corrente no indutor

## 2.1 Equação da Indutância

A equação da indutância é baseada na Lei de Faraday e na tensão sobre o indutor durante o primeiro intervalo de chaveamento. Uma ondulação de corrente ocorre durante este processo e deve ser considerado nos cálculos, onde o indutor atua como um filtro para esta ondulação, que não deve ultrapassar 20% do valor da componente CC da corrente à plena carga (ERICKSON & MAKSIMOVIC, 2001).

A equação da indutância é mostrada na equação (1).

$$L = \frac{V_g - v(t)}{2\Delta i_L} DT_s \quad (1)$$

Onde  $D$  é a razão cíclica do conversor, dada por:  $D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$  e  $T_s$  é o período de chaveamento, igual a  $T_{on} + T_{off}$

## 2.2 Equação da Capacitância

O cálculo da capacitância de saída é feito estimando-se a forma de onda de corrente do capacitor, representando a ondulação de corrente no indutor. A capacitância  $C$  é escolhida grande o suficiente para que sua impedância com a frequência de comutação seja muito menor que a impedância da carga  $R$ . Assim, quase toda a ondulação de corrente do indutor flui através do capacitor e muito pouco através da carga (ERICKSON & MAKSIMOVIC, 2001).

O cálculo da capacitância é dado pela Equação (2).

$$C_o = \frac{v(t)(V_g - v(t))}{8L\Delta V_c f^2 V_g} \quad (2)$$

Onde  $L$  é a indutância calculada anteriormente e  $f$  é a frequência de chaveamento.

## 3 | MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática do conversor *buck* será representada em espaço de estados a partir da forma geral para sistemas lineares e invariantes no tempo representada pelas Equações (3) e (4).

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (4)$$

Em conversores CC-CC as variáveis do vetor de estado  $\forall R^n$  são a corrente no indutor e a tensão no capacitor, escolhidas devido a estes serem os elementos armazenadores de energia. A saída  $y(t) \forall R$  é a tensão no capacitor em paralelo com a carga. Como os conversores CC-CC típicos possuem dois estágios de operação selecionados pelo estado da chave, as matrizes  $A$  e  $B$  variam de acordo com o estágio.  $C$  e  $D$  são constantes.

Quando o conversor está operando com a chave fechada, ele é representado pelas equações (5) e (6).

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} v_g \quad (5)$$

$$y(t) = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + 0v_g \quad (6)$$

Quando está operando com a chave aberta, ele é representado pelas Equações (7) e (8).

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_g \quad (7)$$

$$y(t) = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + 0v_g \quad (8)$$

### 3.1 Modelo CA do Conversor

O modelo CA do conversor é baseado no espaço de estados médio, que fornece um conjunto de equações obtidas pela média das matrizes de estado dos dois estágios, linearizando o sistema através da inserção de perturbações de pequenos sinais.

Inserindo-se perturbações na tensão de entrada  $\hat{V}_g$  e na razão cíclica  $\hat{d}(t)$ , a equação de estado do conversor *buck* em espaço de estados médio é representado pela Equação (9) (ERICKSON & MAKSIMOVIC, 2001).

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_L}{dt} \\ \frac{d\hat{v}_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L(t) \\ \hat{v}_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix} [\hat{v}_g \quad 0] + \begin{bmatrix} \frac{v_g}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \hat{d}(t) \quad (9)$$

A partir da equação (9), é possível estudar as pequenas perturbações acerca do ponto de operação, determinando a resposta dinâmica do sistema. Com o modelo linearizado, é possível representar o sistema por meio da sua função de transferência no domínio de Laplace.

As equações no domínio do tempo são convertidas para o domínio da frequência através do conjunto de equações (10) – (11).

$$\hat{x}(s) = [(sI - As)^{-1}Bs \quad (sI - As)^{-1}B_d] \begin{bmatrix} \hat{u}(s) \\ \hat{d}(s) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\hat{y}(s) = [Cs(sI - As)^{-1}Bs \quad Cs(sI - As)^{-1}B_d] \begin{bmatrix} \hat{u}(s) \\ \hat{d}(s) \end{bmatrix} \quad (11)$$

A Equação (12) apresenta a solução do sistema.

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_L(s) \\ \hat{v}_C(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{DCRs+D}{CLRs^2+Ls+R} & \frac{v_gCRs+v_g}{CLRs^2+Ls+R} \\ \frac{DR}{CLRs^2+Ls+R} & \frac{Rv_g}{CLRs^2+Ls+R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}(s) \\ \hat{d}(s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Para o projeto do controlador PID será utilizada a função de transferência que relaciona a variação de tensão na carga pela variação da razão cíclica  $\frac{\hat{v}_C(s)}{\hat{d}(s)}$  (ERICKSON & MAKSIMOVIC, 2001).

Serão estudados também o comportamento do conversor mediante perturbações na tensão de entrada  $\frac{\hat{v}_C(s)}{\hat{v}_g(s)}$  e na carga, representada pela equação (13), proposta

em (ERICKSON & MAKSIMOVIC, 2001).

$$Z_{out}(s) = \frac{RLs}{CLRs^2 + Ls + R} \quad (13)$$

#### 4 | SINTONIA ÓTIMA DO CONTROLADOR PID

O problema da sintonia ótima do controlador PID pode ser descrito da seguinte forma: Definido um índice de desempenho para o sistema a ser controlado, determinar os ganhos do controlador PID de maneira que, dentro do intervalo de tempo especificado, a resposta do sistema de controle composto pelo processo e o controlador minimize o índice  $J(K_p, K_i, K_d)$  (SILVA, 2005).

Visando uma melhor resposta do conversor mediante às perturbações que possam ocorrer, uma estratégia ótima de controle foi elaborada, utilizando os índices de desempenho baseados na integral do erro.

Quatro índices são usualmente aplicados para avaliar o desempenho do controlador. São eles:

ITSE: *Integrated Time Squared Error* (Integral do erro quadrático ponderado pelo tempo)

Este índice de desempenho reduz a contribuição de grandes erros iniciais bem como enfatiza erros que acontecem mais tarde na resposta (DORF & BISHOP, 2001).

Matematicamente define-se o critério ITSE da seguinte forma:

$$J = \int_0^{t_f} t e^2(t) dt \quad (14)$$

ITAE: *Integrated Time Absolute Error* (Integral do erro absoluto ponderado pelo tempo)

Assim como o índice de desempenho ITSE, este critério reduz a contribuição de grandes erros iniciais bem como enfatiza erros que acontecem mais tarde na resposta. Apresenta baixo *overshoot* e as oscilações são bem amortecidas (DORF & BISHOP, 2001).

Matematicamente define-se o critério ITAE da seguinte forma:

$$J = \int_0^{t_f} t |e(t)| dt \quad (15)$$

ISE: *Integrated Squared Error* (Integral do erro quadrático)

O critério ISE proporciona grandes ponderações para erros grandes e pequenas ponderações para erros pequenos. Um sistema projetado utilizando este critério tende a apresentar uma resposta rápida e oscilatória (FERMINO, 2014).

Matematicamente define-se o critério ISE da seguinte forma:

$$J = \int_0^{t_f} e^2(t) dt \quad (16)$$

IAE: *Integrated Absolute Error* (Integral do erro absoluto)

O critério IAE considera o módulo do erro. Um sistema ótimo projetado com este critério é um sistema que possui amortecimento razoável, isto é, uma resposta com sobressinal mas não demasiadamente oscilatória (FERMINO, 2014).

Matematicamente define-se o critério IAE da seguinte forma:

$$J = \int_0^{t_f} |e(t)| dt \quad (17)$$

## 5 | RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os parâmetros do conversor.

$V_o$ (V)	20
$R$ ( $\Omega$ )	10
$L$ ( $\mu H$ )	625
$C$ ( $\mu F$ )	25
$F$ (kHz)	20
$D$	0,5
$V_o$ (V)	10
$P$ (W)	10
$I$ (A)	1

Tabela 1 - Parâmetros do Conversor

O controle da tensão de saída do conversor *buck* pode ser executado com ação direta sobre a razão cíclica do conversor, através da equação  $\frac{\hat{v}_c(s)}{\hat{d}(s)}$ .

O projeto do controlador PID para realizar o controle de tensão do conversor foi feito utilizando-se a plataforma *sisotool* do *software MATLAB*, apresentando como especificações de desempenho frequência de cruzamento por zero menor ou igual a um quarto da frequência de chaveamento e margem de fase entre 45° e 90°, propostas em (BARBI, 2006).

A Figura 4 ilustra a estrutura de controle utilizada para o projeto do controlador PID.

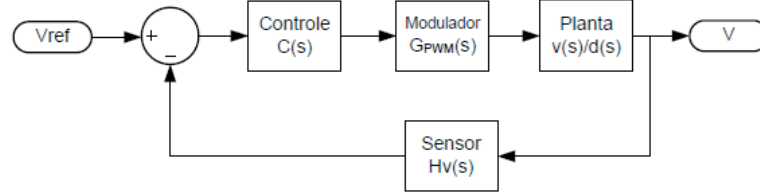


Figura 4 – Malha de controle de tensão do conversor

A função de transferência do modulador PWM é dada pela equação (18), proposta em (ERICKSON & MAKSIMOVIC, 2001).

$$G_{PWM}(s) = \frac{1}{V_M} \quad (18)$$

Onde  $V_M = 10V$ . Aplicando-se os valores de R, L e C, a função de transferência de malha aberta do sistema é mostrada na equação (19).

$$\frac{\hat{v}_C(s)}{\hat{d}(s)}(s) \cdot G_{PWM}(s) = \frac{1,28 \cdot 10^8}{s^2 + 4000s + 6,4 \cdot 10^7} \quad (19)$$

A Tabela 2 mostra a relação entre margem de fase e frequência de cruzamento dos sistemas compensado e não-compensado:

	Não - Compensado	Compensado
Frequência (kHz)	2,14	5,0
Margem de Fase (°)	24,8	59,0

Tabela 2: Frequência de cruzamento e Margem de fase

A tabela 3 apresenta os ganhos do controlador PID.

$K_p$	$K_i$	$K_d$
2,764	4607	$2,3 \cdot 10^{-4}$

Tabela 3: Ganhos do controlador PID

A Figura 5 mostra as respostas em malha fechada, onde ambos os sistemas foram simulados em ambiente *Simulink/MATLAB*. No instante 5ms uma perturbação na tensão de entrada foi aplicada e em 7ms foi aplicada uma perturbação na carga.

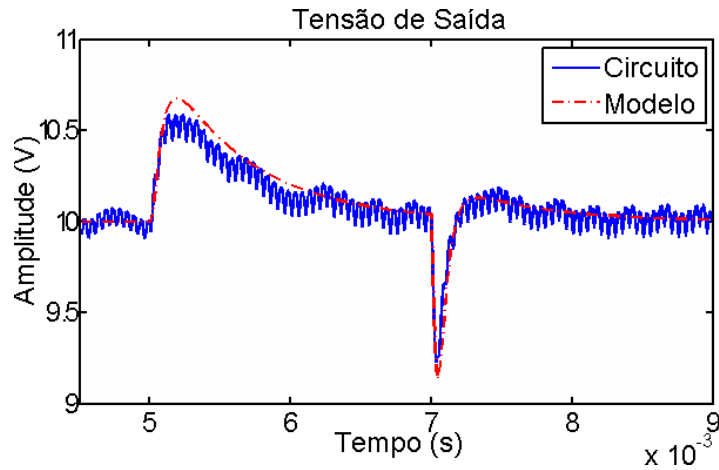


Figura 5 – Resposta circuito x Resposta modelo

Analisando a Figura 5, pode-se verificar que as respostas em malha fechada das simulações do circuito e do modelo são muito próximas, sendo assim, um controlador projetado através do modelo matemático e aplicado no circuito apresentará respostas satisfatórias e compatíveis com o projeto.

Os índices de desempenho de erro representados pelo conjunto de equações (14) – (17) foram calculados através de um algoritmo implementado por meio da função *fminsearch*, que é parte do *Optimization Toolbox* do *MATLAB*. Esta função explora um método de otimização que encontra o mínimo de uma função escalar de várias variáveis a partir de uma estimativa inicial através de um método de procura simplex.

Na sintonia ótima do controlador PID, o algoritmo faz uma busca em torno dos valores iniciais de ganhos do controlador PID, que são pré-definidos e simula o circuito, obtendo os valores da variável erro e aplicando nas equações características de cada índice de desempenho. Este realiza a integração do erro e retorna os valores de  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ , que minimizem o erro.

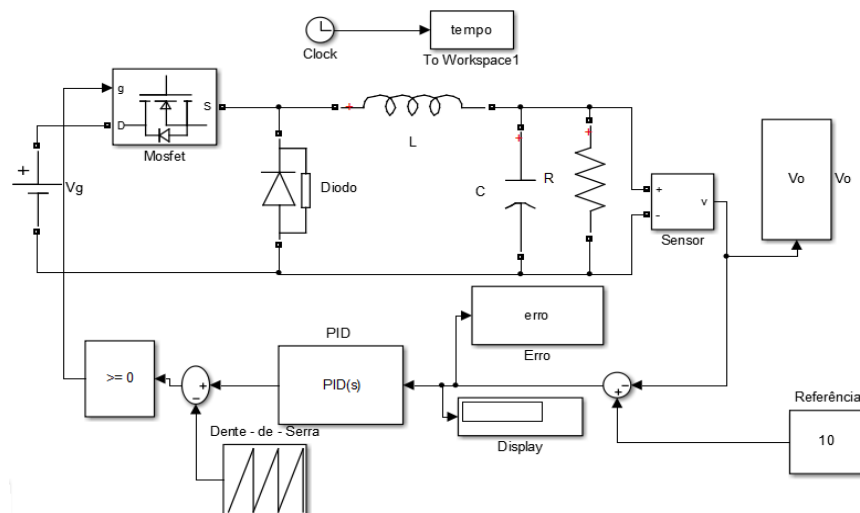


Figura 6 – Circuito simulado para sintonia ótima do controlador PID



A tabela 4 mostra os ganhos obtidos para o controlador PID em cada índice de desempenho:

Índice			
ITSE	2,6976	5840	1,4
ITAE	2,9759	4866,7	2,1
IAE	2,7774	5756,8	1,4
ISE	3,1046	6118,1	9,6

Tabela 4 – Ganhos do controlador PID através da sintonia ótima

Índice	Frequência (kHz)	Margem de Fase (°)
ITSE	3,8	46,5
ITAE	4,75	55,7
IAE	3,82	45,5
ISE	3,59	30,3

Tabela 5 – Frequência de cruzamento e Margem de fase

Com os dados da Tabela 5, verifica-se que apenas o índice ISE não atende às especificações de desempenho propostas, apresentando margem de fase menor que 45°.

A principal aplicação do controlador é como regulador, com a finalidade de rejeitar distúrbios externos, em especial na tensão de entrada e na impedância de carga. Aplicou-se perturbações no circuito da Figura 6 e observou-se as respostas do sistema sintonizado através dos índices de desempenho e do PID clássico para as perturbações.

A resposta do sistema a perturbação de 50% na carga é mostrada na Figura 7.

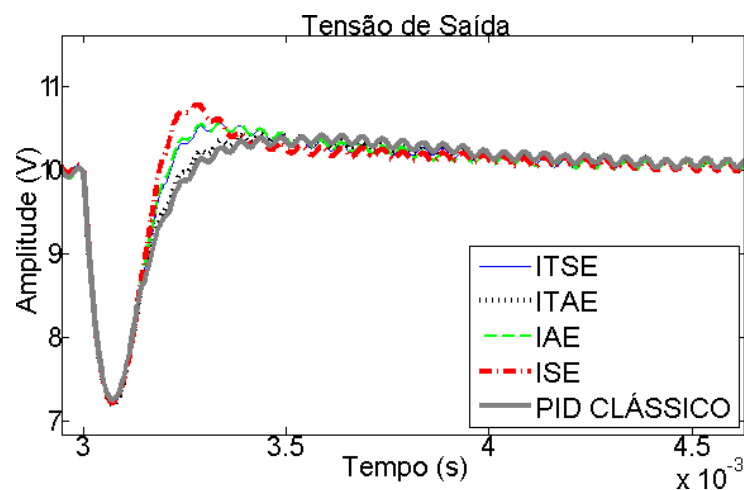


Figura 7 – Resposta à perturbação na carga

A Figura 7 mostra que o controlador sintonizado através dos índices de desempenho rejeita a perturbação na carga mais rapidamente que o PID clássico, porque os índices visam minimizar o erro o mais rápido possível dentro das suas características. Neste caso, o sistema sintonizado pelo índice ISE apresentou uma

rejeição ao distúrbio mais rápida e o sistema sintonizado pelo índice ITAE apresentou a resposta mais lenta.

Aplicou-se também uma perturbação na tensão de entrada reduzindo-a em 40%. A Figura 8 mostra a resposta do sistema:

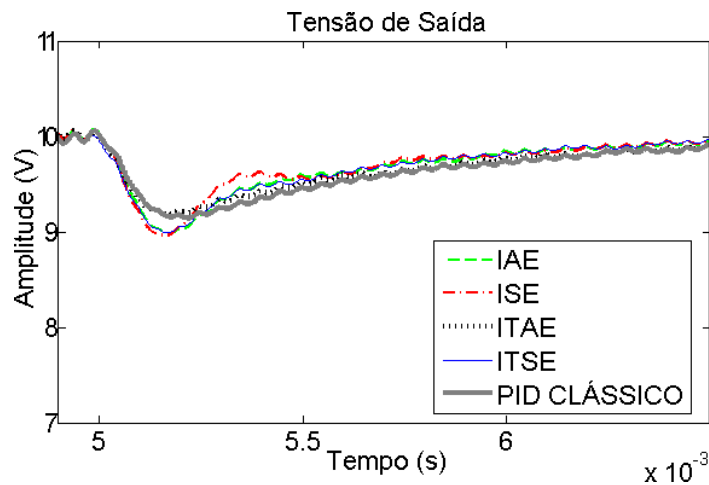


Figura 8 – Resposta à uma perturbação na entrada

Novamente, o controlador sintonizado através dos índices de desempenho de erro rejeita o distúrbio mais rapidamente que o PID clássico, o índice ISE apresentou a resposta mais rápida e o índice ITAE apresentou resposta mais lenta, os demais índices também apresentaram respostas satisfatórias.

Asintonia do controlador PID através dos índices de desempenho de erro mostrou-se uma técnica eficaz e com melhores resultados que o PID clássico na rejeição dos distúrbios aplicados ao conversor. Outra vantagem da utilização dos índices é a possibilidade de aplicação direto na planta física, sem necessitar do modelo do sistema para a obtenção dos ganhos ótimos do controlador. Com apenas uma sintonia manual do controlador que forneça uma resposta próxima da desejada, o algoritmo se baseia nestes parâmetros e retorna os ganhos ótimos do controlador através da resposta real da planta.

## 6 | CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposta a sintonia ótima do controlador PID através dos índices de desempenho de erro aplicado ao conversor CC-CC *buck*. As vantagens de se utilizar este método se dá pela possibilidade de aplicação diretamente na planta do circuito, conhecendo-se apenas a resposta do sistema, sem necessidade de conhecimento do modelo matemático. Esta característica se faz uma vantagem interessante pois pode ser aplicada a qualquer sistema em que possa ser feita uma comunicação com um sistema embarcado para realização das simulações diretamente na planta. As outras vantagens se dão pela rápida rejeição aos distúrbios aplicados, mostrando-se mais

eficiente que o controlador PID clássico e apesar de ser uma estratégia ótima, é de simples implementação, tornando viável sua aplicação.

## REFERÊNCIAS

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. 1. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2000.

BARBI, Ivo. **Projeto de Fontes Chaveadas**. 2. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

DORF, Richard. C.; BISHOP, Robert. H. **Sistemas de Controle Modernos**. 8ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2001.

ERICKSON, Robert. W.; MAKSIMOVIC, Dragan. **Fundamentals of Power Electronics**. 2. ed. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001.

FERMINO, Fernando; UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, Escola de Engenharia de São Carlos. **Estudo Comparativo de Métodos de Sintonia de Controladores PID**, 2014. 82p, il. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em sistemas de controle e automação).

SILVA, Flavio. T; UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO, Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação. **Simulated Annealing aplicado ao Problema de Sintonia de Parâmetros de Controladores PID**, 2005. 61p, il. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação).

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-085-8

