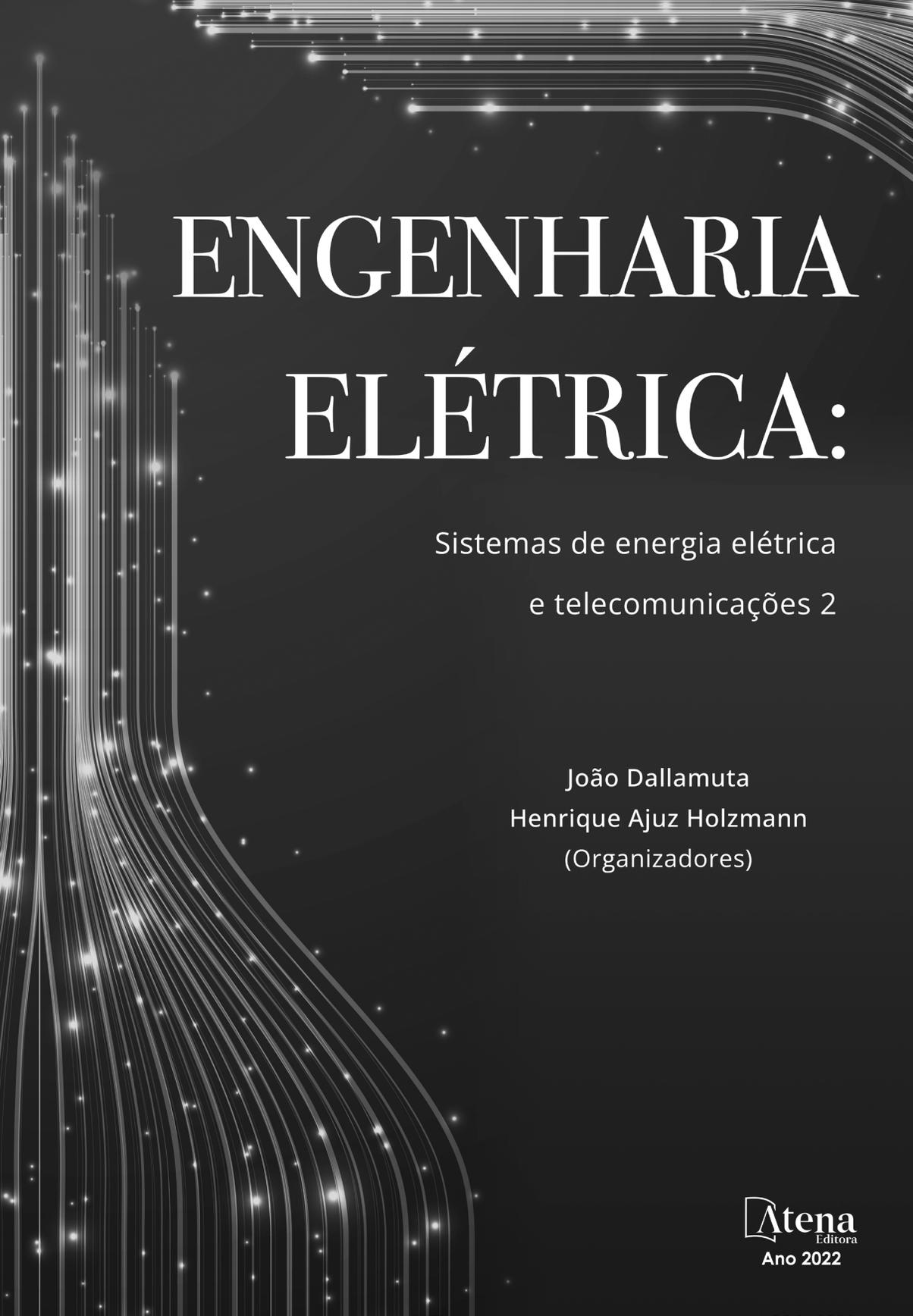


ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações 2

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)



ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações 2

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena

Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. 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.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof^o Dr^a Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará

Prof^o Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Prof^o Dr^a Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Prof^o Dr^a Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof^o Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof^o Dr^a Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Soellen de Britto
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizadores: João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
E57	<p>Engenharia elétrica: sistemas de energia elétrica e telecomunicações 2 / Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-258-0727-0 DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.270221111</p> <p>1. Engenharia elétrica. 2. Telecomunicações. I. Dallamuta, João (Organizador). II. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD 621.3</p>
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

A engenharia elétrica tornou-se uma profissão há cerca de 130 anos, com o início da distribuição de eletricidade em caráter comercial e com a difusão acelerada do telégrafo em escala global no final do século XIX.

Na primeira metade do século XX a difusão da telefonia e da radiodifusão além do crescimento vigoroso dos sistemas elétricos de produção, transmissão e distribuição de eletricidade, deu os contornos definitivos para a carreira de engenheiro eletricista que na segunda metade do século, com a difusão dos semicondutores e da computação gerou variações de ênfase de formação como engenheiros eletrônicos, de telecomunicações, de controle e automação ou de computação.

Não há padrões de desempenho em engenharia elétrica e da computação que sejam duradouros. Desde que Gordon E. Moore fez a sua clássica profecia tecnológica, em meados dos anos 60, a qual o número de transistores em um chip dobraria a cada 18 meses - padrão este válido até hoje – muita coisa mudou. Permanece porém a certeza de que não há tecnologia na neste campo do conhecimento que não possa ser substituída a qualquer momento por uma nova, oriunda de pesquisa científica nesta área.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é, portanto, atuar em fronteiras de padrões e técnicas de engenharia. Também se trata de uma área de conhecimento com uma grande amplitude de sub áreas e especializações, algo desafiador para pesquisadores e engenheiros.

Neste livro temos uma diversidade de temas nas áreas níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

CAPÍTULO 1	1
ESTRATÉGIA TÉCNICA À IMPLANTAÇÃO FUNCIONAL DE COMPENSAÇÃO REATIVA SÉRIE MODULAR	
Cíntia Veiga Claudio	
Fernanda Trindade	
Guilherme Ferretti Rissi	
Mateus Teixeira Duarte	
Massayuki Suzuki	
Nelson C. Jesus	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211111	
CAPÍTULO 2	14
PROJETO, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE CONTROLE POR MODO DESLIZANTE APLICADO AO CONVERSOR CC-CC BUCK: ESTUDO DE CASO	
Rafael Angelini Donda	
Flávio Luiz Rossini	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211112	
CAPÍTULO 3	25
USO DE MICRORREDES FOTOVOLTAICAS. CASO DE ESTUDIO EXTENSIÓN LODANA, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ	
María Rodríguez Gámez	
Antonio Vázquez Pérez	
Guillermo Antonio Loor Castillo	
Wilber Manuel Saltos Arauz	
Italo Humberto Navarrete García	
Marcos Lenin Davila Cedeño	
Lucio Alfredo Valarezo Molina	
Julio Cesar Mera Macias	
Julio Cesar Guamán Segarra	
Lenin Agustín Cuenca Álava	
Washington Colon Castillo Jurado	
José Ricardo Núñez Álvarez	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211113	
CAPÍTULO 4	47
ANÁLISE DE ALGORITMOS DE ESTIMAÇÃO PARAMÉTRICA APLICADOS AO PROJETO DE CONTROLADOR ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA	
Henrique Coldebella	
Leandro Castilho Brolin	
Flávio Luiz Rossini	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211114	
CAPÍTULO 5	59
A INFLUÊNCIA DA TENSÃO ELÉTRICA NA QUALIDADE DA SOLDA A ARCO	

SUBMERSO EM CHAPAS FINAS

Júlio Cezar Pedrosa da Silva
 Gustavo de Castro Lopes
 Matheus Abrão Abdala
 Aldemi Coelho de Lima
 Ildeu Lúcio Siqueira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211115>

CAPÍTULO 672**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NO IFG - CAMPUS GOIÂNIA, A PARTIR DE *RETROFIT* DE ILUMINAÇÃO**

Berthiê de Castro Furtado
 Aylton José Alves
 André Mendes Martins
 José Luis Domingos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211116>

CAPÍTULO 787**DESCUBRIENDO LAS CÓNICAS A PARTIR DE SU ECUACIÓN GENERAL**

Esperanza Georgina Valdés y Medina
 Miguel Ángel Chávez García
 Leilani Medina Valdés

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211117>

CAPÍTULO 8 91**APLICAÇÃO DO MÉTODO DO GRADIENTE E DO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS RECURSIVO PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DO CONTROLE ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA**

Diego Carrião Canhan
 Leandro Castilho Brolin
 Flávio Luiz Rossini

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211118>

CAPÍTULO 9101**ANÁLISE DA GESTÃO DE RESÍDUOS EM EMPRESAS DE CONSTRUÇÃO CIVIL NO MUNICÍPIO DE SÃO LUÍS-MA**

Camila Pinho Tavares Coimbra
 Jessica Moraes Dos Santos
 Janyeid Karla Castro Sousa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211119>

SOBRE OS ORGANIZADORES 111**ÍNDICE REMISSIVO112**

PROJETO, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE CONTROLE POR MODO DESLIZANTE APLICADO AO CONVERSOR CC-CC BUCK: ESTUDO DE CASO

Data de aceite: 01/11/2022

Rafael Angelini Donda

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil
ID Lattes: 0259707940545632

Flávio Luiz Rossini

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil
ID Lattes: 8616413126997528

RESUMO: Este artigo propõe o projeto, simulação e análise de um sistema de controle por modo deslizante aplicado ao conversor CC-CC Buck. Os conversores CC-CC chaveados são amplamente utilizados em sistemas eletrônicos, devido a sua alta eficiência na conversão de tensão de entrada para um nível de tensão de saída desejado. Em particular, o conversor CC-CC Buck rebaixa a tensão para algum nível específico. A partir da escolha do conversor Buck: (i) realizou-se a modelagem dinâmica e estática de seu circuito e simulação computacional no software MATLAB®; (ii) aplicou-se um controlador não linear por modo deslizante para regular a tensão de saída do conversor, a qual seguirá a tensão de referência definida, mesmo com

a variação da tensão de entrada e carga; (ii) simulou-se o sistema a fim de comparar sua resposta em malha aberta e em malha fechada, o que demonstrou a eficácia do controlador; (iv) plotou-se os Planos de Fase dos sistemas a fim de comparar a estabilidade e o ponto de equilíbrio de cada um. Por fim, validou-se através da exposição dos resultados, a efetividade do controlador para o conversor CC-CC Buck.

PALAVRAS-CHAVE: Controle por Modo Deslizante. Conversor CC-CC buck. Sistema não linear.

DESIGN, SIMULATION AND ANALYSIS OF A SLIDING MODE CONTROL SYSTEM APPLIED TO DC-DC BUCK CONVERTER: CASE STUDY

ABSTRACT: This article proposes the design, simulation and analysis of a sliding mode control system applied to the DC-DC Buck converter. DC-DC switching-mode converters are widely used in electronic systems due to their high efficiency in converting input voltage to a desired output voltage level. In particular, the DC-DC Buck converter steps down the voltage to some

specific level. From the choice of the Buck converter: (i) the dynamic and static modeling of its circuit and computational simulation in the MATLAB® software were carried out; (ii) a nonlinear controller by sliding mode was applied to regulate the output voltage of the converter, which will follow the defined reference voltage, even with the variation of the input voltage and load; (iii) the system was simulated in order to compare its response in open loop and closed loop, which demonstrated the controller's effectiveness; (iv) the Phase Planes of the systems were plotted in order to compare the stability and the equilibrium point of each one. Finally, it was validated by exposing the results, the effectiveness of the controller to the DC-DC Buck converter.

KEYWORDS: Sliding Mode control. DC-DC Buck Converter. Nonlinear system.

INTRODUÇÃO

Os conversores de tensão são fundamentais na eletrônica de potência. Esses, podem converter tensões de corrente alternada (CA) em uma tensão de corrente contínua (CC) (CA-CC), de CC para CA (CC-CA), de CA para CA (CA-CA) ou de CC para CC (CC-CC). Realizar mudanças na amplitude, frequência e fase das tensões que alimentam determinados circuitos em sistemas eletrônicos é essencial para garantir o seu funcionamento e aplicabilidade (HART, 2012).

Dentre os diferentes tipos, será abordada pelo presente artigo a conversão CC-CC. Em que se pode aumentar, diminuir ou regular uma tensão CC através de um conversor linear ou um conversor não linear. Conversores lineares apresentam circuitos simples, que realizam a conversão de tensão com eficiência entre 50% e 70% (MALVINO; BATES, 2016). Já os não lineares ou conversores chaveados, compõem não linearidades em seu circuito, e a eficiência pode chegar a 90% (KAZIMIERCZUK, 2008).

Ao considerar as eficiências, tornou-se relevante o tópico conversores de tensão chaveados na área da eletrônica de potência. Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos para encontrar a melhor forma de operar os conversores de tensão, como o de Karasawa, Fukuoka e Miyaji (2018), em que alcançou-se eficiência de 92,8% no projeto de um conversor Buck.

Dentre os tipos de conversores CC-CC existentes, será abordado o conversor Buck. Trata-se de um abaixador de tensão, ou seja, a tensão em sua saída será sempre menor que a tensão de entrada (IEEE, 2022).

Segundo Ogata (2010) o controle é essencial para qualquer área da engenharia, e está intrínseco desde sistemas industriais de controle de viscosidade e vazão até em veículos espaciais. Realizar o controle do conversor Buck é fundamental para se obter uma tensão de saída estável e em um nível desejado. O controle em malha fechada consiste em mensurar o sinal da saída do conversor e comparar com um sinal de referência, a fim de utilizar a diferença entre os dois sinais para alimentar um controlador. Dessa forma, o sistema regulado busca ajustar a tensão de saída à tensão desejada.

Na sessão fundamentação teórica, discute-se sobre os conceitos necessários para a execução deste trabalho. São abordados o comportamento dinâmico do conversor Buck,

o método numérico utilizado para a solução das equações e a técnica de controle por modo deslizante.

Na sessão resultados e discussões, são demonstrados os parâmetros da simulação e os resultados obtidos para o sistema em malha aberta e em malha fechada.

Na sessão conclusão, expõem-se as conclusões deste trabalho.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os conversores CC-CC abaixadores, também chamados de Buck ou *choppers*, são compostos por uma chave comutadora (S), geralmente um MOSFET devido à sua alta frequência de chaveamento, um diodo (D), um indutor (L) e um capacitor (C), que alimentam uma carga (R_L) com a tensão de saída V_o , obtida a partir da redução da tensão de entrada V_i . Na Figura 1, representa-se o circuito de um conversor Buck típico (KAZIMIERCZUK, 2008).

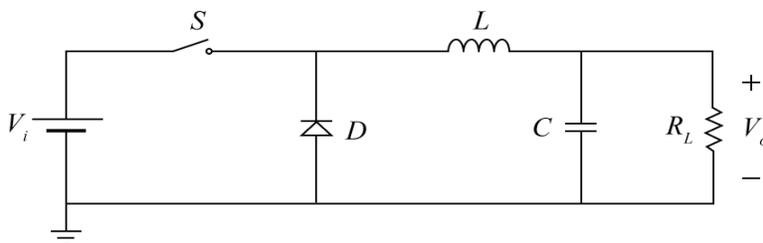


Figura 1 – Conversor CC-CC Buck

Fonte: Adaptado de Kazimierczuk (2008).

Por meio de um sinal modulado por largura de pulso ou PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation* - PWM), a chave S alterna seu estado entre fechado, no tempo t_1 , e aberto, no tempo t_2 . Para o conversor operar em modo de condução contínua, a comutação da chave cria uma variação no circuito, no intervalo de tempo t_1 o diodo D é polarizado reversamente, sendo possível considerá-lo um circuito aberto, simplificado o circuito do Buck como na Figura 2.

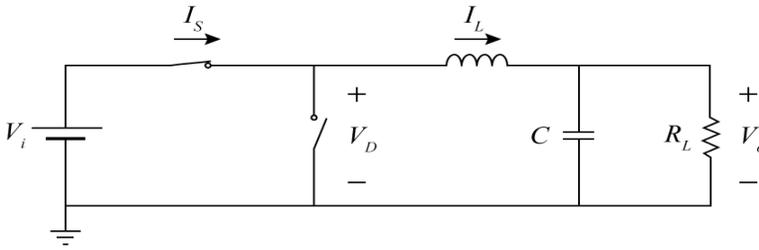


Figura 2 – Conversor CC-CC Buck em t_1

Fonte: Adaptado de Kazimierczuk (2008).

No intervalo de tempo t_2 , não há tensão da fonte V_i no circuito, e o indutor está carregado com corrente armazenada durante t_1 , o que polariza o diodo diretamente, sendo possível considerá-lo um circuito fechado. Na Figura 3, demonstra-se o circuito do Buck em t_2 .

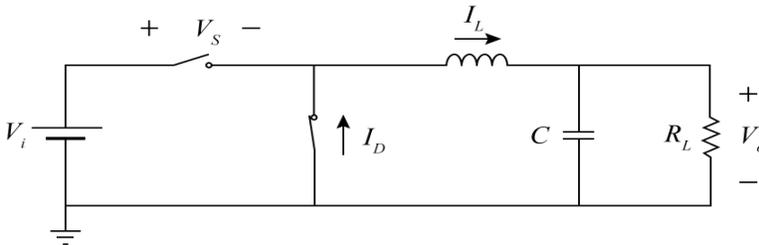


Figura 3 – Conversor CC-CC Buck em t_2

Fonte: Adaptado de Kazimierczuk (2008).

O comportamento dinâmico do circuito pode ser modelado através das leis de Kirchhoff das tensões e correntes, sendo este descrito pela seguinte equação de espaço de estado

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_L C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{q}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_i \quad (1)$$

em que as variáveis de estados são I_L , a corrente no indutor, e V_C , a tensão sobre o capacitor e q representa a função chaveamento, a qual é determinada pela frequência de comutação f da chave S e o ciclo de trabalho D do conversor. Para um conversor Buck, pode-se definir D como

$$D = \frac{V_o}{V_i} \quad (2)$$

Define-se o tempo em que a chave permanece fechada como

$$t_{on} = \frac{D}{f} \quad (3)$$

A função chaveamento pode ser definida por

$$q = \begin{cases} 1, & t \leq t_{on} \\ 0, & t > t_{on} \end{cases} \quad (4)$$

As Equações de (1)-(4) definem o modelo dinâmico do conversor e pode-se obter um modelo estático do conversor por meio da abstração da comutação da chave, a partir da troca da função dinâmica q pelo ciclo de trabalho D na Equação (1).

Para a solução das equações algébrico-diferenciais foi implementado no MATLAB® o método de Runge Kutta de 4ª ordem, o qual, segundo Charpa e Canale (2008), pode ser descrito como

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)h \quad (5)$$

Sendo y_{i+1} a aproximação encontrada, y_i o valor atual, h o passo de incremento, e k_1 , k_2 , k_3 e k_4 as aproximações definidas por

$$k_1 = f(x_i, y_i) \quad (6)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_1h\right) \quad (7)$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_2h\right) \quad (8)$$

$$k_4 = f(x_i + h, y_i + k_3h) \quad (9)$$

O controle não linear por modo deslizante (do inglês, *Sliding Mode Control* - SMC) permite que os modelos desenvolvidos para sistemas específicos sejam imprecisos, como a modelagem realizada na Equação (1), onde se abstrai as resistências, capacitâncias e indutâncias parasitas, o tempo empregado para abrir e fechar as chaves e a queda de tensão entre elas.

Segundo Slotine e Li (1991), é possível determinar uma superfície deslizante

$$s(x; t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} \tilde{x} \quad (10)$$

sendo λ o coeficiente de convergência, n a ordem do sistema a controlar e \tilde{x} o erro, definido por

$$\tilde{x} = x - x_d \quad (11)$$

sendo x o estado a ser controlado e x_d o valor desejado.

Dessa forma, trajetórias fora de x_d são levadas para a superfície definida por $s(x;t)$, e então convergirão exponencialmente para o ponto desejado. O coeficiente de convergência λ define a velocidade com que a trajetória na superfície converge para x_d .

Foram desenvolvidos por Mahdavi, Emadi e Toliyat (1997) controladores por modo

deslizante para conversores CC-CC. Para o Buck, o controlador que ajusta o ciclo de trabalho foi definido por

$$D(t) = \frac{K - a(x_2 - K)}{V_{in}} \quad (12)$$

Sendo K o valor desejado para a tensão de saída, x_2 a leitura da tensão sobre o capacitor, V_{in} a leitura da tensão de entrada e a definido como

$$a = LC\lambda^2 - \frac{L}{R}\lambda + 1 \quad (13)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para simular os modelos desenvolvidos, Equação (1), foram atribuídos os valores apresentados na Tabela 1 para os elementos do circuito Buck.

Elemento	Valor
Indutor (L)	288 μH
Capacitor (C)	8,68 μF
Tensão de entrada (V_i)	24 V
Tensão de saída (V_o)	12 V
Ciclo de trabalho (D)	50%
Frequência de chaveamento (f)	50 kHz
Carga (R_L)	2,88 Ω

Tabela 1 – Parâmetros do Buck

Fonte: Autoria própria (2022).

Exemplifica-se na Figura 4 o procedimento realizado para simular o sistema dinâmico em malha fechada.

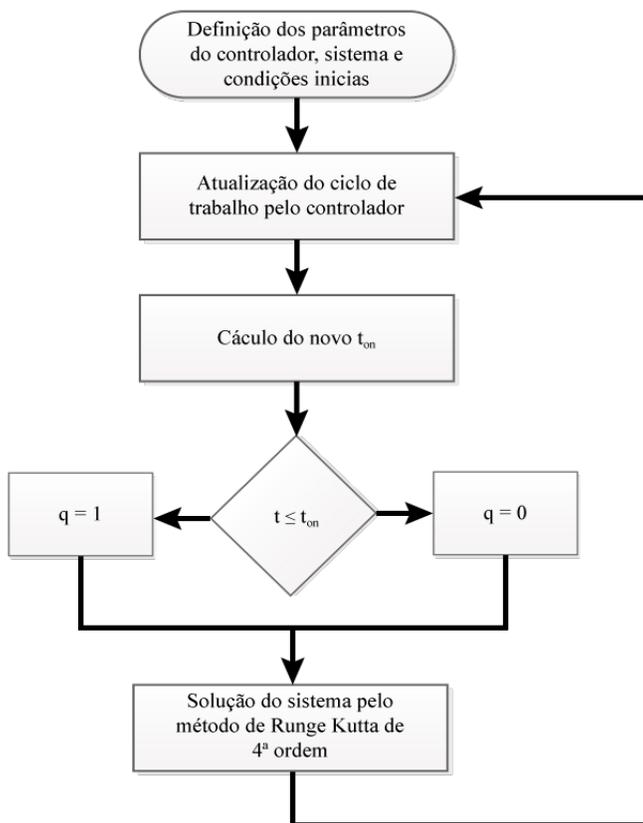


Figura 4 – Fluxograma da simulação

Fonte: Autoria própria (2022).

Considerou-se inicialmente a corrente no indutor e a tensão sobre o capacitor nulas. Simulou-se perturbações na tensão de entrada, sendo que em $t=0,5ms$ esta aumentou para $50V$ e em $t=0,8ms$ diminuiu para $15V$. O comportamento em malha aberta do conversor no domínio do tempo é representado pela Figura 5(a), para a corrente no indutor, e pela Figura 5(b), para a tensão sobre o capacitor.

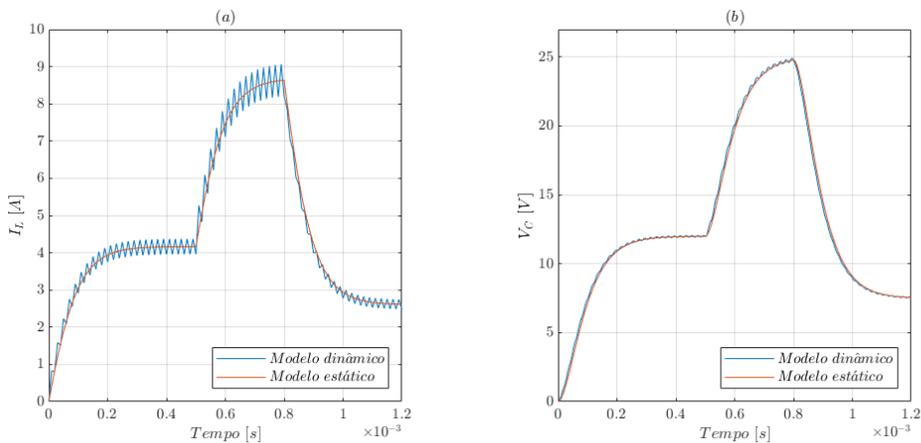


Figura 5 – Sistema em malha aberta: (a) corrente no indutor; (b) tensão sobre o capacitor
 Fonte: Autoria própria (2022).

Como mostrado na Figura 5(b), a tensão de saída não mantém a amplitude desejada (12V) sobre a presença de perturbações na tensão de entrada. Para regular a tensão de saída e tornar o sistema imune às variações na entrada é preciso ajustar o ciclo de trabalho conforme a Equação (2). Assim, aplicou-se a estratégia desenvolvida por Mahdavi, Emadi e Toliyat (1997), Equações (12)-(13).

Na Figura 6(a), ilustra-se a simulação do sistema controlado com $\lambda=5 \cdot 10^3$. Na Figura 6(b), é possível visualizar a ação do controlador no ciclo de trabalho do conversor.

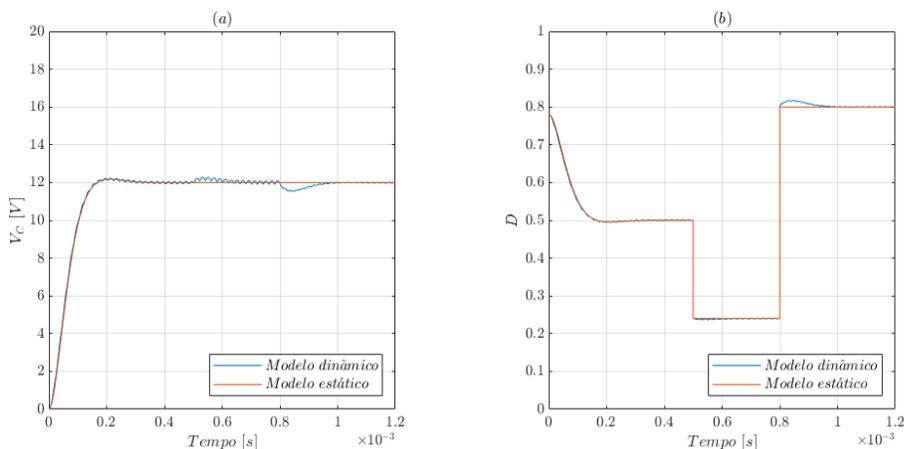


Figura 6 – Sistema em malha fechada: (a) tensão sobre o capacitor; (b) ciclo de trabalho
 Fonte: Autoria própria (2022).

Pode-se observar na Figura 6(b) que o controlador ajustou o ciclo de trabalho conforme a variação de V_p , o qual demandou cerca de $0,2ms$ para estabilizar a tensão de saída.

Simulou-se uma elevação da resistência de carga para 5Ω , em $t=0,5ms$. Apresenta-se na Figura 7 a resposta do sistema em malha aberta e na Figura 8 do sistema em malha fechada.

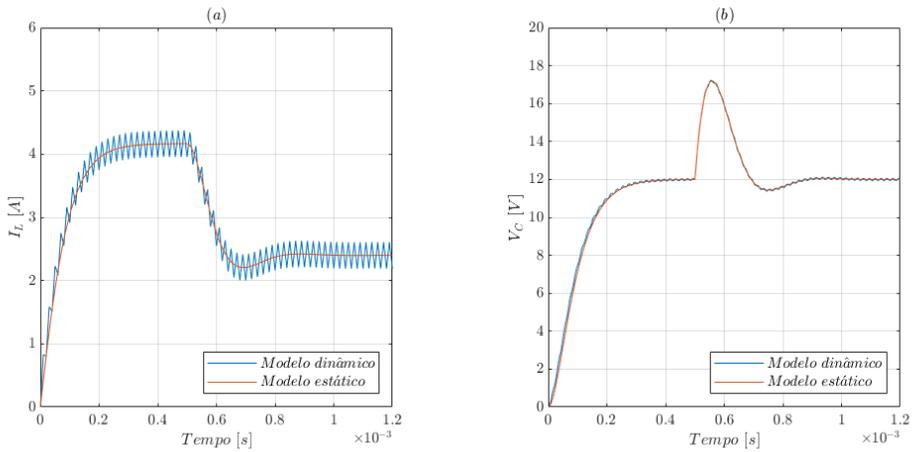


Figura 7 – Sistema em malha aberta: (a) corrente no indutor; (b) tensão sobre o capacitor

Fonte: Autoria própria (2022).

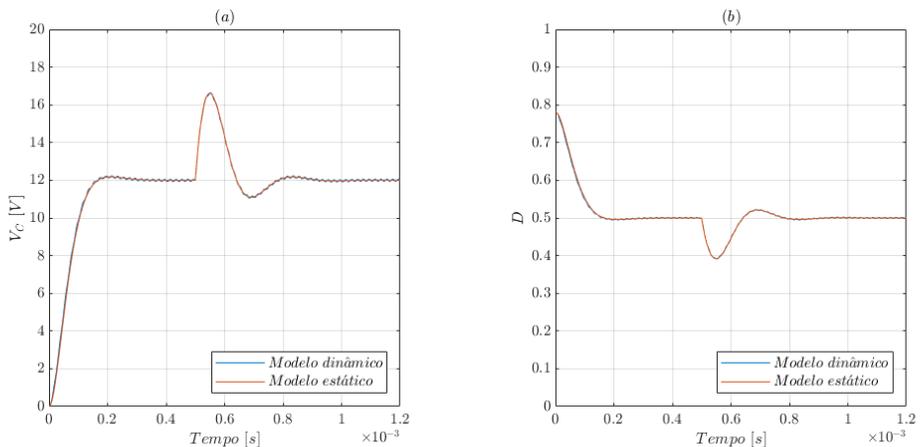


Figura 8 – Sistema em malha fechada: (a) tensão sobre o capacitor; (b) ciclo de trabalho

Fonte: Autoria própria (2022).

Conforme exibido nas Figuras 7(b) e 8(a), inicialmente o sistema em malha fechada alcançou o regime com sobressinal de aproximadamente 1% e $0,1ms$ mais rápido que o sistema em malha aberta. Quando houve a perturbação na carga, o sobressinal do sistema

em malha fechada foi menor que o em malha aberta.

Para demonstrar a estabilidade, apresentou-se na Figura 9 o Plano de Fase do sistema em malha fechada (Figura 9(a)) e em malha aberta (Figura 9(b)). Nota-se seu comportamento a partir de várias condições iniciais de V_C , I_L e V_i . Para o sistema em malha fechada, Figura 9(a), o ponto de equilíbrio se encontra no valor projetado, em $V_C = V_O = 12$ V. Para o sistema em malha aberta, Figura 9(b), o ponto de equilíbrio é determinado pela Equação (2).

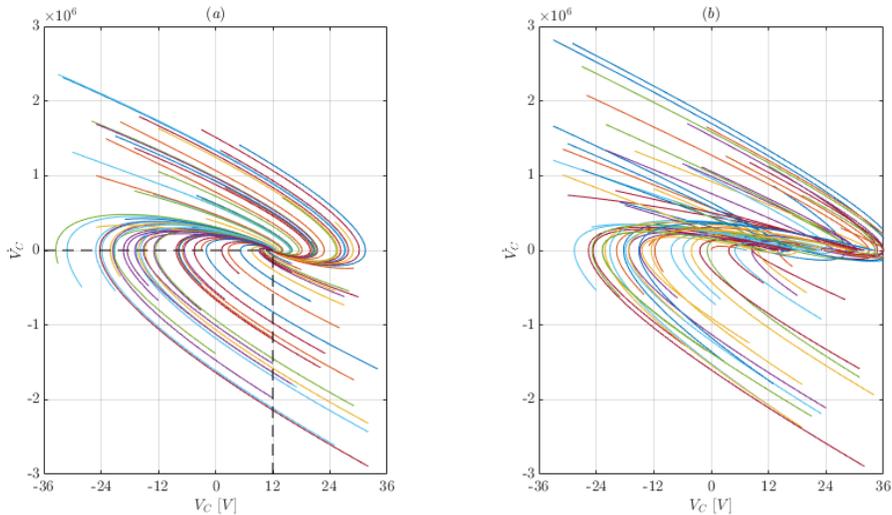


Figura 9 – Plano de Fase (a) sistema em malha fechada; (b) sistema em malha aberta

Fonte: Autoria própria (2022).

CONCLUSÕES

No presente trabalho, desenvolveu-se dois modelos para o circuito conversor CC-CC Buck, o primeiro variante no tempo (dinâmico) e o segundo invariante no tempo (estático). Simulou-se seus comportamentos em malha aberta e em malha fechada (controle por modo deslizante) na presença de perturbações na tensão de entrada e carga.

Com a implementação das simulações, observou-se a eficiência do controlador por modo deslizante proposto por Mahdavi, Emadi e Toliyat (1997) na regulação da tensão de saída quando há presença de perturbações na tensão de entrada e carga, quando comparado ao sistema em malha aberta.

Futuramente, será desenvolvida uma técnica de controle linear e a comparação com a técnica do presente artigo. As duas serão embarcadas em um protótipo real para realizar a validação prática dos sistemas.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Flávio Luiz Rossini pela orientação e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio e incentivo.

CONFLITO DE INTERESSE

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos Numéricos para Engenharia**. AMGH: Porto Alegre, 2008.

HART, Daniel. **Eletrônica de Potência**. AMGH Editora Ltda: Porto Alegre, 2012.

IEEE. **IEEE Standard for DC Power Transmission and Communication to DC Loads**. [S.l.], 2022. 1-86 p.

KARASAWA, Y.; FUKUOKA, T.; MIYAJI, K. A 92.8% efficiency adaptive-on/off-time control 3-level buck converter for wide conversion ratio with shared charge pump intermediate voltage regulator. **2018 IEEE Symposium on VLSI Circuits**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 227–228.

KAZIMIERCZUK, Marian. **Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters**. John Wiley & Sons: Massachusetts, 2008.

MAHDAVI, J.; EMADI, A.; TOLIYAT, H. A. Application of state space averaging method to sliding mode control of PWM DC/DC converters. **IAS '97. Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting**, 1997, pp. 820-827 vol.2.

MALVINO, Albert; BATES, David. **Eletrônica - Volume 2**. AMGH Editora Ltda: Porto Alegre, 2012.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. Pearson Prentice Hall: São Paulo, 2010.

SLOTINE, J. E.; LI, W. **Applied Nonlinear Control**. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, 1991.

A

Arco submerso 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 71

C

Chapas finas 59, 61

Comparação 5, 23, 47, 91, 98

Comparação de desempenho 91

Compensação reativa série 1, 3, 11, 13

Construção civil 101, 102, 103, 104, 105, 109, 110

Controle Adaptativo por Modelo de Referência (CAMR) 49, 91, 93, 100

Controle por modo deslizante 14, 16, 23

Conversor CC-CC buck 14, 16, 17

Curto circuito 1, 12, 13

D

Demanda energética 26

Desarrollo local 26

Destinação 101, 102, 103, 107, 108

Distorções harmônicas 72, 73, 75, 76, 81, 82

E

Energía fotovoltaica 26, 29, 41, 42, 45

G

Generación distribuida 26, 30, 39, 40, 42, 43, 45, 46

GeoGebra 87, 88, 89, 90

Geração 12, 73, 77, 101, 102, 103, 104, 106, 107, 109

Gerenciamento 75, 101, 102, 103, 104, 106, 107, 108, 109, 110

I

Impactos ambientais 101, 102

Interpretación 87, 89

M

Método do Gradiente (MG) 47, 49, 50, 91, 96

Método dos Mínimos Quadrados Recursivo (MMQR) 47, 49, 51, 91, 97

MG 47, 48, 49, 50, 51, 53, 54, 55, 56, 57, 91, 92, 96, 97, 98, 99

MMQR 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 57, 91, 92, 97, 98, 99

P

Partícula magnética 59, 62, 63, 68, 69, 70

Planejamento 1, 13, 107, 108, 109

Potência de 1, 11, 79

Q

Qualidade da solda 59, 60, 61, 62

Qualidade de energia 1, 72, 73, 75, 77, 84

R

Resíduos 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110

Ressonância subsíncrona 1, 3, 7, 11

Resultados simulados 47, 48

Retrofit de iluminação 72, 73, 80

S

Secciones cónicas 87, 88, 89

Sistema não linear 14

Sostenibilidad 26, 27, 28, 45

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações 2

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações 2

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 