

# 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<sup>o</sup> Dr<sup>a</sup> Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

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

Prof<sup>o</sup> 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<sup>o</sup> Dr<sup>a</sup> 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<sup>o</sup> Dr<sup>a</sup> Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof<sup>o</sup> Dr<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof<sup>o</sup> Dr<sup>a</sup> 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

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)</b>	
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: <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.270221111">https://doi.org/10.22533/at.ed.270221111</a></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>
<b>Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166</b>	

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

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
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	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211111">https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211111</a>	
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>14</b>
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	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211112">https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211112</a>	
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>25</b>
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	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211113">https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211113</a>	
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>47</b>
ANÁLISE DE ALGORITMOS DE ESTIMAÇÃO PARAMÉTRICA APLICADOS AO PROJETO DE CONTROLADOR ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA	
Henrique Coldebella	
Leandro Castilho Brolin	
Flávio Luiz Rossini	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211114">https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211114</a>	
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>59</b>
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 6 .....72****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 7 .....87****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 9 .....101****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 REMISSIVO .....112**

## ESTRATÉGIA TÉCNICA À IMPLANTAÇÃO FUNCIONAL DE COMPENSAÇÃO REATIVA SÉRIE MODULAR

*Data de aceite: 01/11/2022*

**Cíntia Veiga Claudio**

CPFL Energia  
Campinas, SP, Brasil

**Fernanda Trindade**

UNICAMP  
Campinas, SP, Brasil

**Guilherme Ferretti Rissi**

CPFL Energia  
Campinas, SP, Brasil

**Mateus Teixeira Duarte**

BREE  
Quatro Barras, PR, Brasil

**Massayuki Suzuki**

Appitec  
Jundiaí, SP, Brasil

**Nelson C. Jesus**

GSI – Engenharia e Consultoria LTDA  
Taubaté, SP, Brasil

**RESUMO:** O Presente trabalho apresenta a metodologia desenvolvida para implantação da utilização de banco de capacitor série de modo expedita, sem envolver estudos técnicos exaustivos. O BCS projetado tem a flexibilidade de locação entre os alimentadores, bem como pode ser reproduzida em larga escala. A pesquisa apresenta uma mudança de paradigma na utilização do BCS, no lugar de atender uma demanda específica, pesquisou-se os alimentadores que poderiam ser candidatos a instalação, e projetou-se um BCS padrão que atende a maioria, em pontos específicos. Esta metodologia é uma contribuição técnica para implantação e inovação da utilização do BCS, e está sendo desenvolvido em um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). No momento a CPFL concluiu os estudos e está na fase de aquisição dos materiais e equipamentos para 3 BCS a serem instalados em 2021.

**PALAVRAS-CHAVE:** Compensação Reativa Série, Planejamento, Compensação Reativa Série, Ressonância Subsíncrona, Potência de Curto Circuito, Qualidade de Energia.

Trabalho vinculado ao Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), financiado pela CPFL: PA3052 – Aplicação Sistemática de Compensação Reativa Série em Redes de Distribuição com Controle e Proteção.

## 1 | INTRODUÇÃO

O principal fator que desencadeou o estudo e o uso dos Banco de Capacitores em Série (BCS) em redes de distribuição de energia elétrica foi a compensação reativa que permite manter os níveis de qualidade adequada no sistema de distribuição, em situações não convencionais.

A instalação do Banco de Capacitores em Série na rede de distribuição é uma alternativa, que em alguns casos, se mostra mais eficaz, rápida e econômica que alguns equipamentos já comumente utilizados para regular o nível de tensão, como banco de capacitores em paralelo e/ou regulares de tensão. Estes, em algumas situações, não proporcionam os níveis adequados de qualidade de fornecimento estabelecidos pelo Módulo 8 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), principalmente pela rapidez na operação (Índices de Fator de Impacto) [1]. Além disso a instalação de BCS pode adiar a realização de obras no sistema elétrico, como as obras de construções de novas subestações, de ramais de transmissão e de novos alimentadores. Estas obras possuem um custo elevado e podem ser postergadas inviabilizando a expansão de cargas novas ou existentes.

Um dos fatores que determinou a necessidade de utilização do banco série foi o aumento na demanda de energia elétrica, devido ao crescimento de cargas principalmente de indústrias e agronegócios em locais longe da fonte. Os principais causadores destes problemas são motores de indução (MIT), pontes retificadoras, sistemas de irrigação, entre outros que exigem uma compensação de reativo mais eficaz e não estática e um rápido ajuste de tensão da rede, algo que não é possível de ser feito com os reguladores de tensão. A utilização de BCS permite a regulação de tensão instantânea e fornece um reativo proporcional à corrente da carga que está a jusante do equipamento, possibilitando o acionamento de motores e melhorando os níveis de tensão.

A CPFL é uma empresa pioneira na instalação de banco de capacitores série em sistemas de distribuição, possuindo um histórico de implantações, que será abordado neste trabalho. Atualmente a CPFL possui um projeto P&D, que desenvolve uma metodologia de aplicação e a elaboração de um banco série modular, de modo expedita.

O trabalho de desenvolvimento da pesquisa engloba as seguintes características principais: rápida implantação e bem como realocação; Mitigação de VTCD nos clientes devido a operação das cargas, Fator de Impacto; Compensação instantânea; Menor Investimento comparados ao nova Subestação, recondutoramento; Custo equivalente a RTs.

Portanto a proposta deste projeto de P&D é uma mudança de paradigma de aplicação do BCS utilizados até presente dias, para uma Estratégia Técnica Funcional de selecionar os alimentadores que sejam candidatos e identificar os pontos favoráveis a instalação.

## 2 | COMPENSAÇÃO REATIVA SÉRIE (CRS)

A compensação série na rede de distribuição é realizada através da instalação de capacitores conectados em série com o objetivo de reduzir a impedância reativa do sistema no ponto de instalação. A compensação de impedância reativa poderá ser realizada de forma parcial, total ou até mesmo com sobre compensação, devido à inserção de uma reatância negativa no circuito. Dessa forma o capacitor série fornece potência reativa proporcional à carga que está a jusante, propiciando uma redução da queda de tensão ao longo do alimentador. Porém deve ser considerado que o reativo injetado pelo BCS depende da demanda de potência reativa oriunda das cargas. Assim, a elevação da tensão dependerá do fator de compensação e da demanda do fluxo reativo proveniente da carga a jusante ao banco.

O efeito do capacitor em série sobre a queda de tensão em uma linha pode ser melhor compreendido considerando-se a equação abaixo:

$$V = I \cdot R \cdot \cos Y + I \cdot X_L \cdot \sin Y \quad (1)$$

Onde: V – queda da tensão na linha

I – corrente na linha

R – resistência indutiva da linha

$X_L$  - reatância indutiva da linha

Y – ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente

Levando-se em consideração a reatância capacitiva do capacitor em série,  $X_C$ , a equação acima fica:

$$V = I \cdot R \cdot \cos Y + I \cdot (X_L - X_C) \cdot \sin Y \quad (2)$$

Em função do valor de  $X_C$ , o segundo termo desta última equação pode tornar-se igual a zero ou mesmo negativo, ou seja, o capacitor em série pode compensar a queda de tensão devido à resistência indutiva da linha e ainda a queda de tensão devido à resistência da mesma.

O capacitor em série é particularmente útil em redes extensas com flutuações de tensão elevadas devido às características de funcionamento de cargas como as máquinas de solda elétrica, fornos a arco, motores partindo, cargas variáveis, entre outros. Com a aplicação do capacitor em série é possível reduzir quase instantaneamente a queda de tensão transitória causada pela flutuação de tensão, da mesma forma reduz a queda de tensão causada pelo crescimento vegetativo de cargas.

Entretanto, a operação de capacitores em série, dependendo do grau de compensação, pode causar fenômenos indesejáveis, tais como ressonância subsíncrona de motores durante o período de partida e ferro ressonância de transformadores. Disposto

a evitar tal ressonância pode-se reduzir o grau de compensação do banco de capacitor ou ainda, podem ser utilizadas resistências ligadas em paralelo com o banco de capacitores.

A ferro ressonância que se refere ao aparecimento repentino de uma tensão autossustentada com altos níveis de distorção harmônica, ocorre quando é criado um circuito ressonante pelo BCS e por um transformador ligado em série durante o momento da energização. Porém este fenômeno é relativamente raro, visto que, qualquer carga no lado secundário do transformador tem tendência de amortecer a ferro ressonância.

### **3 | HISTÓRICO DE CRS**

Inicialmente a CPFL fez a utilização de capacitores em série como forma de regulação de tensão em casos específicos. No decorrer das experiências e do conhecimento adquirido sobre a sua aplicação, a empresa buscou inovar e desenvolveu o Compensador Série Modular (CSM) através do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento 96 (P&D-96) [2] e [3]. Atualmente, a CPFL também está elaborando um novo projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D-3052), que abordará o assunto de Bancos de Capacitores em Série novamente, porém com uma nova vertente.

A seguir serão apresentadas, resumidamente, as instalações de capacitores série em SDMT realizadas pela CPFL e um panorama sobre o novo projeto.

#### **A. Instalação do BCS na cidade de Guaíra –SP**

Foi realizada uma instalação em caráter experimental na rede de 13,8 kV visando obter subsídios para situações similares e oferecer melhores condições de fornecimento de energia.

Esta rede a princípio foi escolhida tendo em vista a configuração do sistema, uma rede extensa, com condutores de baixa capacidade, carregamento significativo e uma queda de tensão elevada, mesmo com a utilização de banco de regulador de tensão. Considerando que outras cargas estavam em vias de serem conectadas em Guaíra, foi necessário o estudo de melhorias na região, no qual foi definida a utilização de banco de capacitores em série por apresentar de imediato o benefício esperado.

O banco de capacitores em série, como demonstra Fig. 1, foi instalado a aproximadamente 7 km da localidade de Guaíra e energizado no ano de 1967. Foram utilizadas 14 unidades de capacitores por fase, de 50 kVAr, 6,7 kV e 60 Hz cada, apresentando assim 64 Ohms por fase e grau de compensação  $K = 3,44$ . O valor do fator  $K$  foi assumido conforme os estudos publicados pela Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget (ASEA) – Suécia e a estrutura para o banco foi feita de maneira semelhante a utilizada para um banco de capacitor em série na linha de 12 kV da Cia Pacific Gas and Electric Co. S.Francisco, Cal, USA.

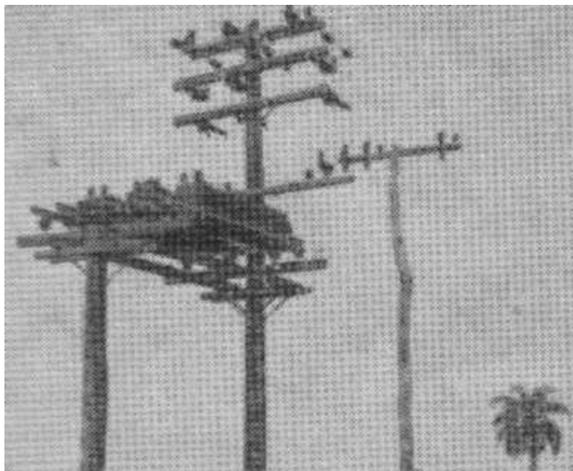


Fig. 1 – Banco de Capacitor em Série de Guaira.

A CPFL apresentou um artigo no IV SENDI sob o tema “Considerações sobre aplicações de Banco de Capacitores em série” em JAN/1969 [4].

Este BCS operou satisfatoriamente durante aproximadamente 3 anos, quando foi construída uma subestação no local, não sendo mais necessária sua utilização.

## **B. Instalação do BCS na cidade de Sabino –SP**

Em meados dos anos 80 havia um desafio de adequar os níveis de tensão na localidade de Sabino, que era suprida pelo alimentador da Subestação (SE) Lins, a uma distância de 35 km em condutor 6 AWG.

Dentre as soluções avaliadas estudou-se a instalação do BCS, de forma experimental com uma compensação de 200% da reatância indutiva da linha, com 7 unidades capacitivas em paralelo por fase. O BCS de Sabino operou por 28 anos, proporcionando uma solução para a região com um benefício técnico e econômico mais elevado, em comparação a instalação de Bancos Reguladores de Tensão. O BCS foi desativado após a energização da SE Sabino 34,5 kV, energizada em 2017.

## **C. Instalação do BCS na cidade de Colômbia –SP**

No ano de 2006, em atendimento a uma fazenda de plantação de laranjas que possuía sistema de irrigação no município de Colômbia-SP, onde havia a necessidade de acionamento de 61 motores de indução (MIT), com potências entre 150 CV e 250 CV. A instalação do cliente ficava a 24 km da SE Colômbia 1, atendido com alimentador com 477 MCM CA, com dois bancos reguladores de tensão fechados em delta (15% de regulação) e quatro bancos de capacitores em derivação.

A fazenda em questão conseguia colocar em operação apenas 40 motores de indução, dos 61 que possuía, pois o acionamento de qualquer outro MIT provocava o

desligamento dos outros motores.

As soluções comumente utilizadas para resolver problemas de tensão, como os reguladores de tensão, não seriam suficientes pois estes equipamentos possuem um tempo de atuação superior ao tempo de partida dos MIT. Este tipo de carga exige das Distribuidoras investimentos elevados em construção de nova subestação. CPFL avistou a oportunidade de uma nova aplicação de BCS, uma vez que o projeto P&D- 96 [5] estava em curso. Neste projeto a CPFL buscou o desenvolvimento de um novo modelo de capacitor série, o Compensador Série Modular (CSM), que permitia a aplicação em qualquer ponto da distribuição e que pudesse ser reutilizado em outros atendimentos através de um rearranjo simples e seguro das células. A Fig. 2 apresenta um diagrama esquemático do CSM.

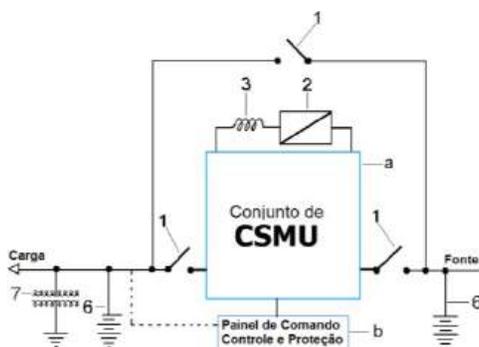


Fig. 2 – Compensador Série Modular – CSM

O CSM foi constituído pelos seguintes equipamentos:

- RACK para 16 capacitores por fase;
- Conjunto de 15 Capacitores por fase com fusível externo. Esta parcela de equipamentos pode variar de um para outro ponto do sistema, cuja configuração define a reatância capacitiva do CSM (a);
- Painel de Comando, Controle e Proteção (b);
- Transformador trifásico para alimentação do painel de controle e da bobina de abertura da chave a vácuo (7);
- Chave de by-pass (1);
- Chave a vácuo: 03 chaves monofásicas (2);
- Reator com núcleo de ar (3);
- Para-raios (6).

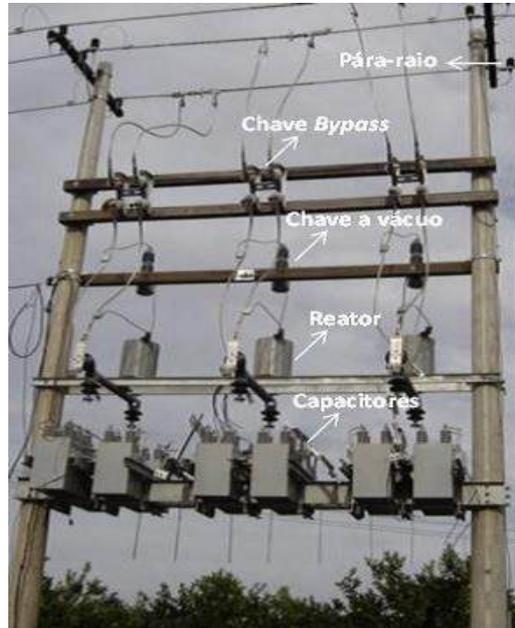


Fig. 3. – CSM-01 Instalado em Campo.

Com o objetivo de eliminar o problema de acionamento dos motores, foi definido que o CSM-01 seria então instalado no alimentador que atendia a fazenda. Assim, seria possível atender as cargas da fazenda dentro do menor tempo possível, até a conclusão da nova subestação Colômbia 2 – Rio Grande. Deste modo foi escolhido um ponto a 20,2 km da SE Colômbia 1, onde o valor da reatância indutiva era de 8,8 Ohms e o valor da reatância capacitiva do CSM era 14,4 Ohms, ou seja, com uma sobre compensação de 164%.

Após diversos testes in loco foram constatados fenômenos de ressonância subsíncrona quando do acionamento do 21º motor, indicando a necessidade de realização de novas simulações e estudos. À vista disso, com a redução da reatância capacitiva do CSM para 10,3 Ohms, através da inserção de mais células capacitivas, uma sobre compensação de 117%, foram acionados os 61 motores com sucesso e satisfação do cliente.

Este banco ficou em operação até o final de 2008, quando foi energizada a SE Colômbia 2.

#### **D. Instalação do BCS na cidade de Ibiúna –SP**

Através de simulações foi verificado que o alimentador que atendia parte da área rural do município de Ibiúna, em 23,1 KV, apresentava pontos com tensão de 20,64 kV. Com isso a tensão de fornecimento representava 93% de 22 kV, que é a tensão de operação, conforme apresentado na Fig. 4. Como este é o limite inferior da faixa considerada como

tensão adequada, conforme Módulo 8 do PRODIST, o alimentador estava em seu limite. Visando ampliar a capacidade de atendimento a novas cargas, foi definido que o CSM-02, o segundo protótipo do P&D-96, seria instalado neste alimentador, o qual atendia também uma grande empresa, localizada a 11 km da SE Ibiúna.

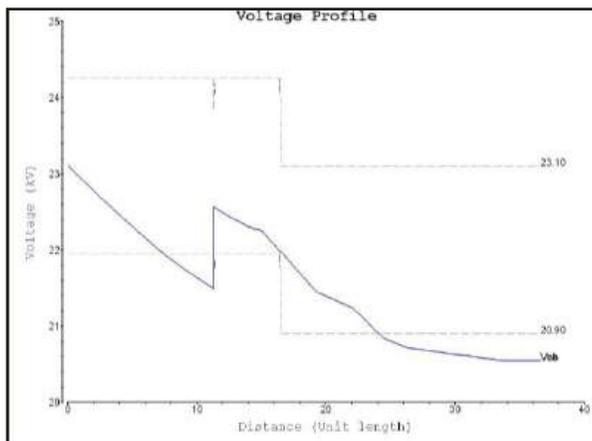


Fig. 4. – Perfil da Tensão no Alimentador – Carga Pesada.

O CSM-02, Fig. 5 foi projetado utilizando varistores de óxido de zinco como dispositivo de proteção contra sobretensão, o que permitiu a utilização de capacitores menores do que o do CSM-01.

Após simulações considerando as características do alimentador, foi definido que o local para instalação do equipamento ficaria a 29,5 km da subestação, onde a reatância indutiva era 17,1 Ohms, e a reatância capacitiva do CSM deveria ser de 20,52 Ohms (sobrecaptação de 120%).

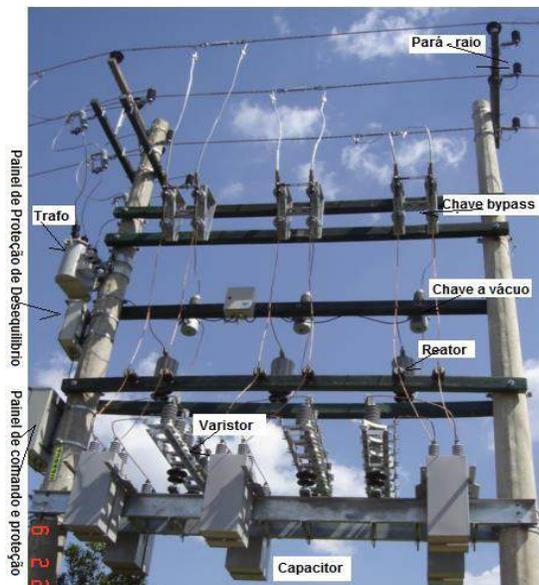


Fig. 5 – Banco Capacitor em Série de Ibiúna – CSM-02.

A Fig. 6 mostra o resultado do monitoramento da tensão na saída do CSM-02 em dois momentos, um com o banco desligado e outro com o banco ligado. O gráfico permite constatar o ganho de tensão alcançado com a aplicação do CSM-02.

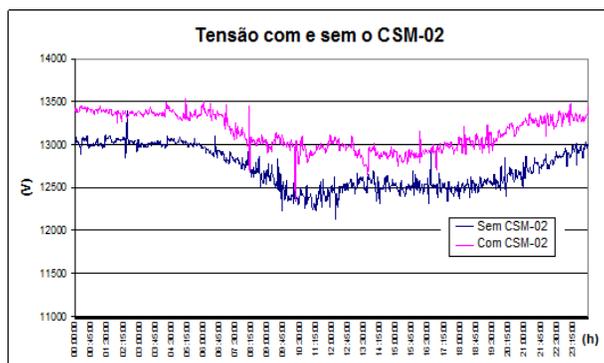


Fig. 6 –Gráfico de Tensão (com e sem o CSM-02)

A partir de 2012 houve a redução de carga do alimentador atual com a transferência de uma grande empresa para o alimentador ao lado, com isto, a tensão de fornecimento retornou aos seus limites normais, não sendo mais necessário a utilização do CSM-2.

## E. Instalação do BCS na cidade de Santa Maria da Serra –SP

A cidade de Santa Maria da Serra é atendida pelo alimentador que se origina da

subestação da cidade de Brotas, em tensão 13,2 kV, com 40km de extensão. Até o ano de 2011, a cidade possuía uma demanda de 2,1 MVA e a configuração da rede até ela era constituída de 22 km em condutor de seção 336,4 MCM CA e 18 km em 4/0 AWG CAA, 2 bancos reguladores de tensão fechados em delta e 4 bancos de capacitores paralelos.

Em 2011 um cliente industrial da cidade solicitou aumento de demanda de 450 kW. O valor não é expressivo se considerado um sistema mais robusto ou se a carga estiver próximo da fonte, no entanto, devido à grande distância que se encontrava da subestação e do baixo valor de corrente de curto-circuito trifásico no local, em torno de 360 A, as simulações indicaram flutuações acima de 10% quando do acionamento do motor de 150 CV do cliente [6].

A CPFL concebeu a oportunidade para aplicação de um BCS, e desta vez, a ideia era a reutilização do CSM-01 originalmente instalado em Colômbia, que estava fora de serviço desde a conclusão da obra de construção da SE Colômbia 2- Rio Grande.

No ano de 2012 a mesma indústria solicitou novo aumento de carga, de 565 kW, o qual foi permitido após readequação da reatância capacitiva do CSM-01 de 14,4 para 16 Ohms (aumento da compensação para 97%) e recondutoramento de aproximadamente 5 km de rede.

Neste caso o CSM-01 viabilizou o aumento de carga solicitado dentro do prazo requerido e a partida do motor de 150 CV apresentou uma flutuação de tensão abaixo de 5%. Deste modo, foi evitada a necessidade de construção de alimentador expresso de aproximadamente 40 km até o município de Santa Maria da Serra, possibilitando viabilizar o atendimento ao cliente com o menor custo global.

Até o presente momento o CSM-01 continua em operação, possibilitando a indústria permanecer em operação.

Na Fig. 7 apresenta a simulação realizada através da utilização do software Cyme, com as configurações e medições da rede atual, demonstrando que o BCS é primordial para o atendimento da localidade até os dias de hoje.

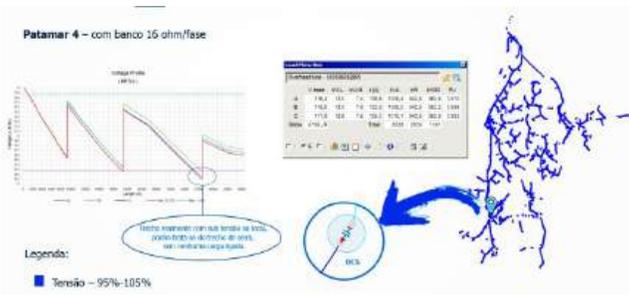


Fig. 7 – Simulação Bancos de Capacitor em Série na Cidade de Santa Maria da Serra nos dias atuais.

## 4 I ESTRATÉGIA TÉCNICA FUNCIONAL PARA IMPLANTAÇÃO DO CRS.

Através das instalações do BCS, citadas anteriormente, realizadas no Estado de São Paulo, a CPFL teve um resultado bastante positivo, pois, todos os casos de capacitores em série instalados no SDMT tiveram êxito, principalmente o modelo do CSM, que se mostrou como um equipamento de fácil adaptação ao sistema e realocável. Além disso o custo é relativamente baixo, se comparado com os custos de outros equipamentos já utilizados na rede, com a vantagem de regular a tensão instantaneamente, elevar o nível de curto-circuito, fornece potência reativa proporcional à demanda das cargas a jusante e melhorar a estabilidade de tensão.

Porém apesar do resultado positivo, foi verificado alguns pontos de atenção sobre o local de instalação de um capacitor série e a característica da carga a ser atendida. As experiências mostraram que quando essas cargas não são predominantemente indutivas variáveis, como no acionamento de motores, poderá ser utilizada uma compensação maior no BCS, a exemplo do instalado em Sabino, onde se aplicou uma sobre compensação de 150%. Em Colômbia foi necessária a redução da compensação de 164% para 117%, devido à predominância de motores. Assim sendo, em casos de regiões que possuam áreas com grande concentração de MIT's, poderá ocorrer o fenômeno de ressonância subsíncrona, havendo assim a necessidade de análises de transitórios.

### PROJETO P&D - PA3052 - APLICAÇÃO SISTEMÁTICA PARA COMPENSAÇÃO REATIVA SÉRIE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

O projeto de P&D-3052 irá elaborar uma metodologia de aplicação sistemática de BCS nas redes de distribuição pertencentes as distribuidoras do Grupo CPFL Energia, fundamentada em simulações assertivas e resultados obtidos através de medições realizadas em campo. Este irá prospectar e testar as inovações tecnológicas associadas às práticas de controle e proteção vinculadas a Banco Capacitores em Série, e implantação da melhor destas, no padrão técnico de sua montagem [7].

Este projeto, diferentemente dos projetos anteriores, pretende desenvolver um padrão técnico de montagem com dimensionamento do conjunto Compensador Reativo Série (CRS) Modular Padrão, com sistema de controle e proteção testados, definido pela metodologia e aprovado pela CPFL. De forma global os principais parâmetros a serem considerados na definição dos alimentadores para estabelecimento de uma metodologia expedida de aplicação para os sistemas com compensação série estão relacionados a seguir:

- Alimentador Rural com longa extensão; e baixa potência de curto-circuito;
- Pelo menos dois (2) reguladores de tensão em cascata;
- Cargas urbanas/distritos a mais de 20 km da SE;

- Motores de indução na ponta dos alimentadores e que tenha dificuldade de liberação devido à partida destes;
- Existência de cargas potencialmente perturbadoras na ponta dos alimentadores;
- Localidades pequenas e demandas reduzidas, com restrição de construir Subestação, e problema de estabilidade de tensão.

O P&D-3052 definirá alternativas técnicas para mitigar as perturbações pertencentes ao sistema de distribuição, quando provocadas por variações de carga não lineares e/ou geração distribuída e os distúrbios no sistema elétrico prévia e posterior a instalação da BCS.

Nesta Estratégia Técnica para implantação de Banco de Capacitor Série, após exaustivos estudos e simulações, chegou-se à conclusão de limitar a máxima capacidade em 1200 ampères pela razão de atender a maior parte dos alimentadores, bem como apresenta um custo atrativo eliminando a utilização de varistores de amortecimento, que é um dos componentes de maior custo e dificuldade de aquisição por necessitarem das compras no exterior.

Para estes estudos iniciais foram selecionados 14 alimentadores de 15 KV, para a modelagem no programa ATPDraw, e paralelamente as pesquisas para definir a corrente de curto circuito máximo que o BCS deveria suportar, considerando a quantidade máxima de vasos e a simplicidade de não utilizar varistores. Concluiu-se, através das simulações, que o valor máximo de 1200 A de Icc é adequada. Portanto, as simulações foram direcionadas aos alimentadores e na escolha dos pontos estratégicos que após a instalação de BCS não ultrapassassem o Icc adotado. E após as simulações exaustivas, com alternativas técnicas de não ultrapassar os limites de qualidade do fornecimento, foram escolhidos 5 alimentadores, dos quais 2 selecionados para instalação de BCS. Para concluir foram contemplados com uma carga fictícia de um motor de grande porte (Motor de Indução Trifásico (MIT) - 250 CV), no final da extensão do alimentador, verificando o desempenho e eficácia do BCS, sem ultrapassar os limites de qualidade do alimentador e verificando ganhos consideráveis.

Portanto tem-se um CRS Modular padrão, que poderá ser instalado em qualquer um dos alimentadores pesquisados, de custo menor e com os critérios de contorno para aplicações futuras.

Atualmente a CPFL concluiu os estudos necessários e está na Etapa de aquisição de equipamentos e materiais para montagem de 3 BCS.

## 5 | CONCLUSÃO

Através do histórico apresentado, comprovou-se a eficácia da aplicação do Banco de Capacitores em Série no Sistema de Distribuição em Média Tensão (SDMT), melhorando

a estabilidade da tensão destes sistemas, proporcionando fornecimento de potência reativa e elevação do nível de curto circuito, conforme verificado nos casos retratados.

Tendo como base as diversas vantagens técnicas e econômicas do banco de capacitor série, a CPFL entende que o mesmo pode ser utilizado como recurso confiável, rentável e de rápida implementação em soluções da empresa, como o atendimento a grandes cargas distantes das fontes, acionamento de motores, regulação de tensão, dentre outros que requerem um estudo específico mais apurado. Um destaque é a fácil adaptação do BCS ao sistema, através de uma mudança na combinação das células capacitivas.

O novo projeto P&D pretende estabelecer o BCS como um modelo padrão para soluções de problemas em SDMT, tal como sua metodologia de aplicação para estudos na rede.

## REFERÊNCIAS

[1] ANEEL. PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>;

[2] M, Suzuki, D. J. Ferreira, W. M. Borges, J. Camargo, G. P. Caixeta "Relatório técnico CPFL – Novo Sistema de Compensação Reativa Série Modular– PD96", outubro, 2007;

[3] F. P. Marafão, J. Camargo, E.R. Zanetti Jr, R.A. Souza R.A. "Capacitor Série como Alternativa de Investimentos para a Expansão da Distribuição" - XVI SENDI - Brasília – 2004;

[4] N. Oranges, R.R. Stefano., V.A. Hionin, "Considerações sobre a Aplicação de Capacitores em Série".- IV SENDI, 1969;

[5] M, Suzuki, D. J. Ferreira, W. M. Borges, J. Camargo, G. P. Caixeta. "Compensador Série Modularizado para Sistemas de Distribuição até 23 KV"- XIX SENDI - São Paulo - novembro, 2010;

[6] A.L. Lemes, M. Suzuki., D.J. Ferreira. "Análise das Aplicações de Capacitores em Série nos Sistemas de Média Tensão realizadas pela CPFL" – XXI SENDI - Santos–novembro, 2014;

[7] ANEEL. PRODIST Módulo 2 – Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-2>. Acesso em: 5 jan. 2020;

[8] Cogo, J. Roberto e Filho, J. Batista Siqueira. Capacitores de Potência e Filtros de Harmônicos: Editora Cm - Ciência Moderna, 2018. 338 p;

[9] Asea Brown Boveri Ltda. (ABB): Capacitores de Potência em Baixa Tensão, Departamento de Sistemas de Potência, Catálogo start-BR 101, 1991;

[10] The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): IEEE Standard for Shunt Power Capacitors, IEEE Std 18-2012 (Revision of IEEE Std 18-2002);

[11] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): Capacitores de Potência – Especificação, NBR – 5282, Julho de 1977;

[12] Cogo, J. Roberto: Correção de Fator de Potência, Apostila do Curso da Qualidade da Tensão em Sistemas Elétricos, pós-graduação da EFEI, Itajubá, 1995.

# 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).

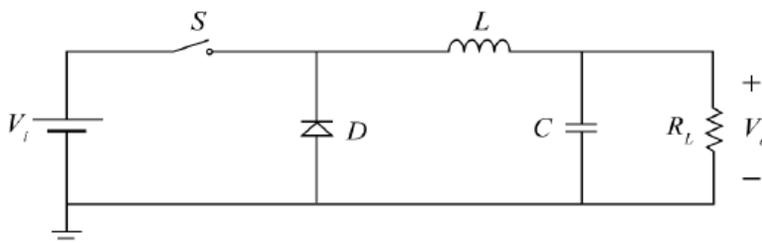


Figura 1 – Conversor CC-CC Buck

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.

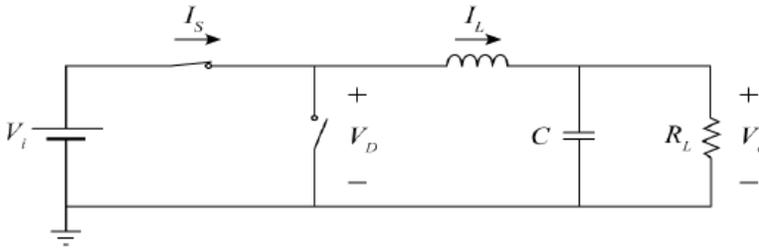


Figura 2 – Conversor CC-CC Buck em  $t_1$

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  $t_2$ .

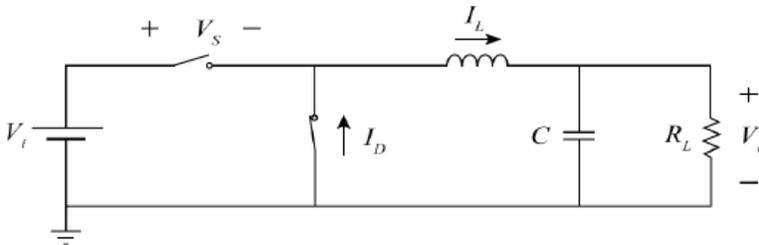


Figura 3 – Conversor CC-CC Buck em  $t_2$

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  $\lambda$  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  $\lambda$  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

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

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  $\alpha$  definido como

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

## 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 $\mu H$
Capacitor ( $C$ )	8,68 $\mu F$
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 $\Omega$

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.

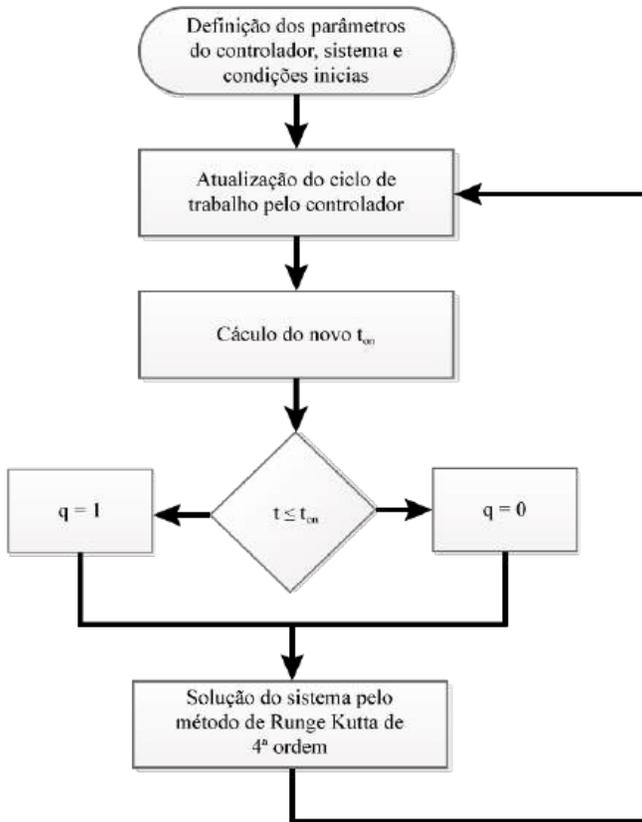


Figura 4 – Fluxograma da simulação

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.

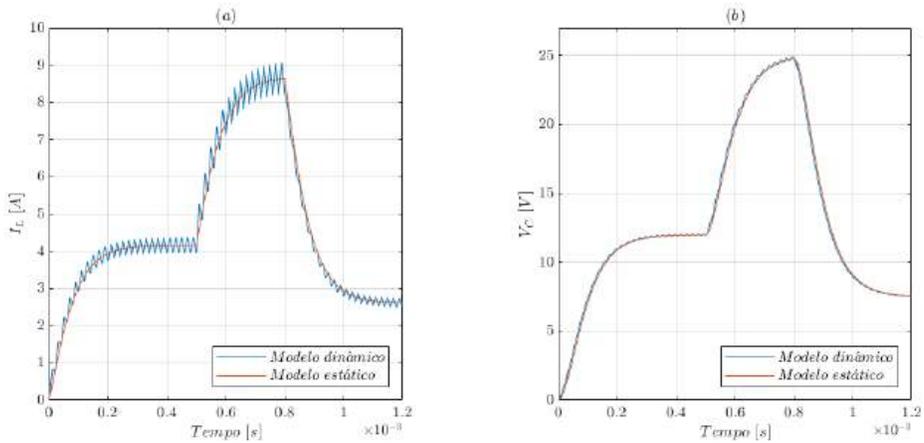


Figura 5 – Sistema em malha aberta: (a) corrente no indutor; (b) tensão sobre o capacitor

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.

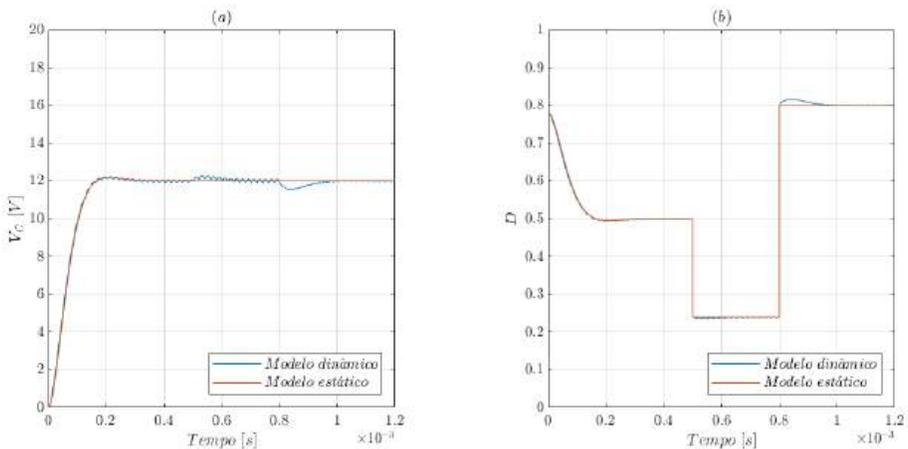


Figura 6 – Sistema em malha fechada: (a) tensão sobre o capacitor; (b) ciclo de trabalho

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  $5\Omega$ , 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.

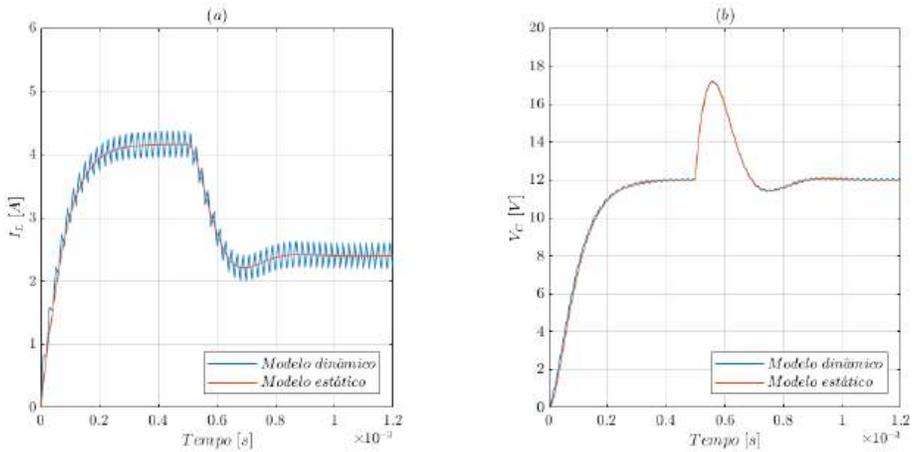


Figura 7 – Sistema em malha aberta: (a) corrente no indutor; (b) tensão sobre o capacitor

Fonte: Autoria própria (2022).

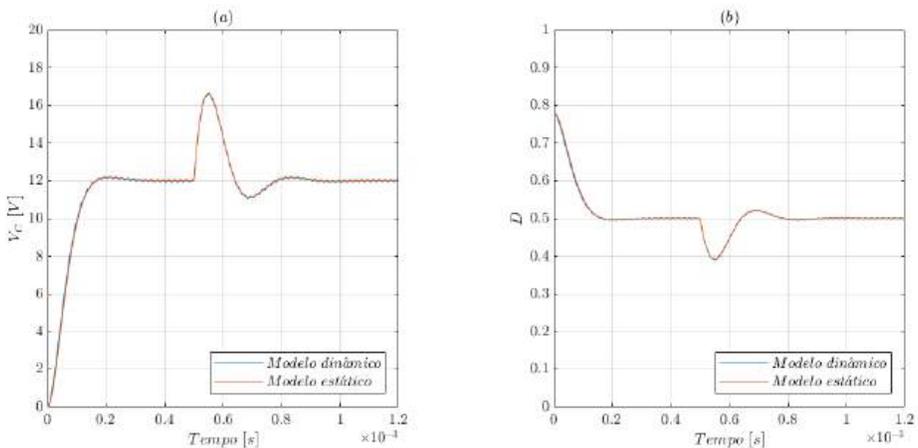


Figura 8 – Sistema em malha fechada: (a) tensão sobre o capacitor; (b) ciclo de trabalho

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).

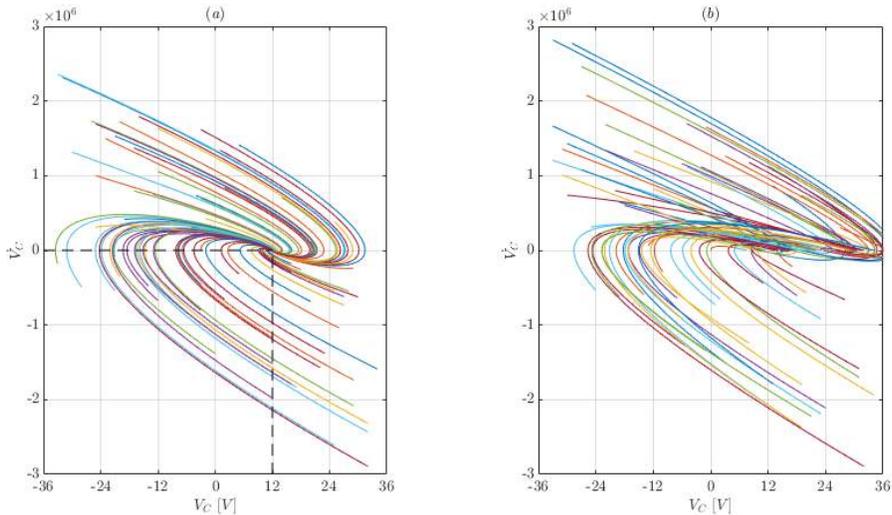


Figura 9 – Plano de Fase (a) sistema em malha fechada; (b) sistema em malha aberta

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.

## CAPÍTULO 3

# USO DE MICRORREDES FOTOVOLTAICAS. CASO DE ESTUDIO EXTENSIÓN LODANA, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ

*Data de submissão: 19/10/2022*

*Data de aceite: 01/11/2022*

### **María Rodríguez Gámez**

Carrera de Ingeniería eléctrica,  
Universidad Técnica de Manabí,  
Portoviejo, Manabí, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-0003-3178-0946>

### **Antonio Vázquez Pérez**

Universidad Técnica de Manabí,  
Portoviejo, Manabí, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-0002-2994-8626>

### **Guillermo Antonio Loor Castillo**

Carrera de Ingeniería eléctrica,  
Universidad Técnica de Manabí,  
Portoviejo, Manabí, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-0002-4986-7524>

### **Wilber Manuel Saltos Arauz**

Carrera de Ingeniería eléctrica,  
Universidad Técnica de Manabí,  
Portoviejo, Manabí, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-0001-5520-595X>

### **Italo Humberto Navarrete García**

Carrera de Ingeniería eléctrica,  
Universidad Técnica de Manabí,  
Portoviejo, Manabí, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-0003-0798-3321>

### **Marcos Lenin Davila Cedeño**

Carrera de Ingeniería eléctrica,  
Universidad Técnica de Manabí,  
Portoviejo, Manabí, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-0002-3248-2409>

### **Lucio Alfredo Valarezo Molina**

Carrera de Ingeniería eléctrica,  
Universidad Técnica de Manabí,  
Portoviejo, Manabí, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-0003-0490-7542>

### **Julio Cesar Mera Macias**

Carrera de Ingeniería eléctrica,  
Universidad Técnica de Manabí,  
Portoviejo, Manabí, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-0002-4035-4159>

### **Julio Cesar Guamán Segarra**

Carrera de Ingeniería eléctrica,  
Universidad Técnica de Manabí,  
Portoviejo, Manabí, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-0002-8985-1519>

### **Lenin Agustín Cuenca Álava**

Carrera de Ingeniería eléctrica,  
Universidad Técnica de Manabí,  
Portoviejo, Manabí, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-0002-5079-9469>

### **Washington Colon Castillo Jurado**

Carrera de Ingeniería eléctrica,  
Universidad Técnica de Manabí,  
Portoviejo, Manabí, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-00032-7011-1131>

### **José Ricardo Núñez Álvarez**

Departamento de Energía, Universidad de  
la Costa, Barranquilla, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-6607-7305>

**RESUMEN:** El objetivo del trabajo consiste en estudiar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la introducción de la energía solar fotovoltaica en el modo de la generación distribuida, mediante los resultados del desarrollo de las ideas conceptuales en un caso de estudio, que por la sencillez y versatilidad de los métodos de análisis utilizados puedan servir para generalizar las experiencias en otros territorios presenten condiciones geográficas y climáticas similares. La metodología empleada para el estudio fueron la búsqueda bibliográfica, el sistema de información geográfica para el estudio climatológico y el software PvSyst para el diseño del sistema. En el trabajo se realiza una exposición de la problemática, fundamentalmente para la implementación de los sistemas fotovoltaicos en forma de generación distribuida, para disminuir demanda en horario diurno en los centros educativos que funcionan fundamentalmente en los horarios donde hay un alto potencial solar y teniendo en cuenta que la generación de electricidad, por esta vía hoy se implementa de forma simbólica. Se tuvo como resultado la propuesta de una central fotovoltaica para disminuir la demanda en horario diurno en el modo de la generación distribuida, de forma tal que se incremente la calidad del servicio, la eficiencia del sistema, reducción de los costos de la energía, propiciando la preservación de los recursos naturales y disminuyendo las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente, potenciando el desarrollo energético local sostenible.

**PALABRAS-CLAVE:** Energía fotovoltaica, desarrollo local, sostenibilidad, generación distribuida, demanda energética.

## USE OF PHOTOVOLTAIC MICROGRIDS. CASE STUDY EXTENSION LODANA, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ

**ABSTRACT:** The objective of the work is to study the technical, economic and environmental feasibility of the introduction of photovoltaic solar energy in the distributed generation mode, through the results of the development of conceptual ideas in a case study, which due to its simplicity and The versatility of the analysis methods used can serve to generalize the experiences in other territories present in similar geographic and climatic conditions. The methodology used for the study was the bibliography search, the geographic information system for the climatological study and the PvSyst software for the design of the system. In the work, an exposition of the problem is made, superior for the implementation of photovoltaic systems in the form of distributed generation, to reduce the demand during daytime hours in educational centers that function superior in the hours where there is a high solar potential and having Keep in mind that the generation of electricity in this way is today implemented in a symbolic way. The result was the proposal of a photovoltaic plant to reduce the demand during daytime hours in the distributed generation mode, in such a way that the quality of service, the efficiency of the system, reduction of energy costs, are increased, promoting there was of natural resources and reducing CO<sub>2</sub> emissions to the environment, promoting sustainable local energy development.

**KEYWORDS:** Photovoltaic energy, local development, sustainability, distributed generation, energy demand.

## 1 | INTRODUCCIÓN

Las previsiones del World Energy Outlook, sobre el panorama energético mundial con proyección a 2040, plantea que entre 1940 a 2016 la demanda de energía en el mundo creció en un 60%, estimándose una tendencia al incremento sostenido hasta el año 2040, debido especialmente al desarrollo exponencial de la industria, aumento poblacional, uso intensivo de tecnologías, consumismo de la sociedad y aumento de la contaminación ambiental, en muchos casos motivado por el incremento de la huella del carbono (WEO, 2017).

La Agencia Internacional de Energía (IEA), en el año 2018 señala que, la participación de la electricidad en el uso mundial de la energía está creciendo, mientras que el aumento de las tecnologías bajas en carbono está provocando una gran transformación en la forma en que se genera la electricidad (WEO, 2018). Plantean que, en el año 2019, el análisis energético indica la necesidad de cambios rápidos y generalizados; pero las decisiones tomadas por los gobiernos siguen siendo críticas para el futuro del sistema energético. Se enfatiza que la demanda de energía crecerá un 1,3% anual hasta 2040. Eso llevará a tensiones en todos los aspectos de los mercados energéticos y un fuerte crecimiento de las emisiones relacionadas con la energía (WEO, 2019).

En la actualidad ecuatoriana el tema energético constituye un elemento decisor para el futuro inmediato de la sociedad. El alto costo de la energía con una tendencia de continuar incrementando en los próximos años y la contaminación ambiental asociada a la generación de electricidad, así como su distribución y consumo, constituyen temas actuales del debate sociopolítico y científico, que apuesta por encontrar alternativas de solución que, al propio tiempo garanticen la sostenibilidad del desarrollo en el territorio (Sánchez, 2015); (Macías, Valarezo, & Loor, 2018).

Desde sus comienzos la producción de electricidad en Ecuador se realizó mediante el consumo intensivo de hidrocarburos, con un bajo aprovechamiento de la energía primaria contenida en el combustible fósil, que nunca sobrepasó el 30% de eficiencia en cuanto al aprovechamiento de la energía primaria contenida en el combustible fósil. Al propio tiempo que la energía primaria no aprovechada industrialmente se convierte en contaminación, lo que encarece el costo de la electricidad (Jaramillo & Chamba, 2008).

En un periodo de 10 años (2007-2017) se abrieron nuevos horizontes para el progreso nacional de cara al siglo XXI, marcado por una pujante voluntad inversionista en ramas claves de la economía y el desarrollo social de la nación ecuatoriana. Se destaca el cambio de la matriz energética mediante el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía (FRE) (Guido, Poveda-Burgos, Ruiz, & González, 2017).

Para que se tenga una idea, se puede resaltar que en el año 2010 en Ecuador la oferta de energía eléctrica procedía básicamente de tres fuentes: la generación hidráulica con 48%, la generación térmica 47%, representando entre las dos el 95% de la oferta total;

el 5% restante se importaba desde Colombia y Perú (Jurado, 2012); (Piloso, 2017).

A partir del año 2013, el Estado ecuatoriano asumió el reto de cambiar la matriz energética e incrementar el aporte de las fuentes renovables de energía, lo que para el año 2017 se había logrado con la construcción de varias centrales de generación hidráulica, que aprovechan los grandes potenciales que se localizan en la región centro del país. Con ello se había logrado incrementar la participación de la energía hidráulica a más del 70%, transformando el país de importador a exportador de energía hacia Perú y Colombia, ofreciendo un importante aporte a la reducción en las emisiones de carbono derivado de la generación de energía (Bordons, García, & Valverde, 2015).

Pero las centrales eléctricas construidas se ubican en el centro del país, a más de 350 kilómetros de las principales ciudades de la región costera. Esta situación implica un nivel de pérdidas que se producen durante la transmisión y distribución de la electricidad, pues se siguen los mismos principios técnicos de la generación centralizada (Correa, Celi, & Gómez, 2017). El Sistema Nacional Interconectado (SNI) presenta pérdidas de energía que llegan a ser del 18%, lo que equivale a más de 413 millones de dólares y más de 11 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas a la atmósfera anualmente (ARCONEL, 2019). La situación resulta ser más grave en la provincia de Manabí, por su ubicación y por la contaminación ambiental que se produce durante el invierno, donde las pérdidas energéticas pueden llegar hasta el 23%, siendo aún peores en las zonas rurales (Vázquez & Castillo, 2015).

Los escenarios energéticos ayudan a la toma de decisiones con respecto a la transformación del sistema de suministro de energía (Redera, Stappela, Hofmannb, Försterc,; Emelec, Hülkb, M, Glauerd, 2020). Cada territorio posee sus propias características energéticas y establece sus prioridades sociales, resultando clave la disponibilidad que se tenga de las fuentes de suministro en función de la sostenibilidad.

Actualmente en Ecuador la energía se considera como un problema estratégico (Asamblea Constituyente, 2008). Se gestiona y suministra mediante una gestión centralizada, donde no se aprecian adecuadamente las potencialidades endógenas de las localidades, ni las alternativas de aprovechamiento de los recursos energéticos que existen localmente, situación que se acentúa en los territorios más pobres (MEER, 2016).

El caso de estudio de la investigación se desarrolla en las instalaciones de la extensión universitaria ubicada en Lodana, cantón Santa Ana, donde se localizan las facultades de: Ciencias Agrícolas, Agronómicas y Veterinarias. Un estudio previo fue realizado en la provincia de Manabí donde ya se apuntaba el potencial solar de la región para la introducción de tecnologías fotovoltaicas conectadas directamente a la red de baja tensión (Rodríguez, Vázquez, Saltos, & Guardarrama, 2017).

En este trabajo, se pretende ir más allá y estudiar la factibilidad energética, económica y ambiental que justifica la introducción de una microrred fotovoltaica, capaz de cubrir una parte importante del consumo de energía de la institución, reduciendo así

la factura que se paga a la empresa eléctrica. Se pretende brindar una contribución a la disminución del impacto ambiental derivado de la generación de electricidad, de tal manera que la experiencia sea suficientemente versátil como para generalizar su aplicación en otros territorios que presenten una situación similar en cuanto a su ubicación geográfica y climática.

## 2 | MATERIALES Y MÉTODOS

Se parte del concepto básico que una microrred consiste en una red eléctrica integrada, para suministrar la demanda en forma local (Velázquez, Sarmiento, Silva, Vidrio, & Nieva, 2010); en este caso una central fotovoltaica conectada a la red eléctrica que incorpora energía directamente al consumo, entregando el excedente a la red eléctrica.

Para el desarrollo del trabajo se asumió el tipo de investigación de campo, lo que permitió el conocimiento a fondo que posibilitó manejar los datos con seguridad y obtener información respecto al sistema energético en la extensión Lodana, de la Universidad Técnica de Manabí (UTM), así como las estimaciones del potencial de energía solar que incide en la localidad estudiada.

El método corresponde al descriptivo-deductivo, por lo que este tipo de investigación se ocupa de la descripción de datos y características de la gestión energética en la institución y las posibilidades de cubrir una parte del consumo de electricidad mediante la introducción de una microrred fotovoltaica conectada a la línea eléctrica del SNI.

Se emplearon las técnicas investigativas de revisión de documentos, textos, tesis, libros, normas técnicas, páginas web y manuales, para la obtención de la información apropiada y clara para el desarrollo teórico del tema abordado. Para gestionar la información relacionada con el potencial solar se utilizó el Sistema de Información Geográfica para el Desarrollo Sostenible (SIGDS), que se fundamenta en un sistema de información geográfica (SIG ó GIS en Inglés) (UTM, 2018), que contiene los datos relacionados con los potenciales de las fuentes renovables de energía del territorio en la provincia de Manabí, del cual se utilizaron los datos del potencial solar mostrado en la GeoWeb (Rodríguez, Vázquez, Martínez, & Bravo, 2019).

Para el diseño de la instalación fotovoltaica conectada a la red se utilizó el software PVsyst 6.8.6. (PVsyst V 6.8.6, 2019) y como material didáctico de base se usó el libro La Energía Fotovoltaica en la provincia de Manabí (Rodríguez, M; Vázquez, A, 2018).

Para el análisis económico se utilizó el software CHomer (Rodríguez, M; Vázquez, A, 2018), que constituye una solución tecnológica especialmente diseñada para la realización de los estudios de factibilidad económica en inversiones fotovoltaicas, a partir de las experiencias derivadas del trabajo con la herramienta Homer, resultando útil para agilizar y determinar la factibilidad del proyecto que se realiza en la extensión Lodana de la UTM.

El manejo de la base de datos cartográficos se realizó utilizando el software QGIS

versión libre y de código abierto, que permite experimentar el análisis espacial y compartir contenido geográfico vía Web GIS (UTM, 2018), contando con una plataforma que va a posibilitar la organización, creación e intercambio de información desde cualquier lugar, momento y dispositivo. Para la información cartográfica se utilizó la publicada en la página web de escala regional 1:250.000, versión enero 2013. Capas de información geográfica básica del Instituto de Geografía Militar (IGM) de libre acceso (Codificación UTF-8) (IGM, 2013).

Durante la investigación se realizó un inventario de carga en las instalaciones de la extensión Lodana de la UTM, pudiendo estimar el consumo horario de energía eléctrica. Al propio tiempo se realizó un reconocimiento del terreno para definir la ubicación del generador fotovoltaico y determinar el punto de conexión óptimo a la red eléctrica.

### 3 I ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Las tecnologías que aprovechan las (FRE), representan un futuro energético promisorio para la sociedad, pueden ser implementadas en cualquier sitio según los potenciales disponibles, solo se necesita realizar los estudios de potencial y el análisis de la factibilidad energética, económico y ambiental, lo que permite su aplicación de manera sostenible (Sarmiento, Rodríguez, Castillo, & Vázquez, 2014).

Alemania es uno de los países pioneros que emprendió la transición energética, abordando el tema con una visión integradora de los procesos (Alvarez & Ortiz, 2016) para la aplicación de estrategias y políticas que apoyan el desafío al cambio y que en muchos casos pueden servir como instrumentos para el diseño de políticas similares en otros territorios.

Actualmente Alemania es líder en la introducción de las energías limpias (AleaSoft Energy Forecasting, 2019), con una potencia renovable de más de la mitad del parque productor con el 56% de la potencia total instalada.

Los países nórdicos son un ejemplo del uso de las alternativas renovables, las necesidades energéticas y la falta de combustibles fósiles, los han llevado a realizar diferentes investigaciones que podrían implantarse en diferentes regiones geográficas, muestra de ello son los estudios realizados en Dinamarca (Baizura, Chun-Lien, Zhaoxia, Vázquez, & Guerrero, 2018), donde algunas de las prácticas aplicadas podrían implementarse en regiones donde las condiciones resultan adecuadas para su inserción.

España también ha sido promotora de la introducción de las FRE en forma de microrredes en el modo de la generación distribuida (GD), pretendiendo integrar de manera eficiente la diversidad de los recursos energéticos, para lo que han estado enfrascados en los sistemas de control para la gestión energética de diferentes orígenes, fundamentalmente fotovoltaica y eólica (Bordons, García-Torres, & Valverde, 2015); también han incursionado en el estudio de la viabilidad en la implementación de las microrredes, sus consideraciones

técnicas, regulatorias y económicas (López, 2018).

En América Latina se han dado pasos relacionados con la introducción de las FRE. En Argentina se propone una visión general del uso de tecnologías para la seguridad, operación, gestión y control de microrredes (Medina, 2014) mediante redes inteligentes para vincular la generación y almacenamiento distribuido, a partir de un suministro con altos estándares de calidad y confiabilidad a precios razonablemente bajos; a pesar de que existen limitaciones con el diseño de políticas y estrategias que permitan las condiciones para la penetración de las energías renovables en el sistema eléctrico argentino.

Otros países como Colombia se encuentran enfrascados en introducir las microrredes en campus universitarios (Salazar, 2017), siendo una estrategia adecuada para el aprovechamiento de las FRE y las nuevas tecnologías de comunicación, disminuyendo la huella del carbono y los impactos negativos al ambiente.

En la actualidad, las microrredes basadas en el aprovechamiento de las FRE constituyen una alternativa energética limpia, que cada vez encuentra más espacios para su generalización. En Ecuador se han realizado diferentes estudios para lograr implementar las microrredes. En el proyecto realizado por (Saltos, Rodríguez, Vázquez, Loor, & Cuenca, 2017), se demuestra su viabilidad como una alternativa viable para el mejoramiento de la calidad de energía en zonas aisladas y de difícil acceso, las que en invierno confrontan problemas con la estabilidad del servicio y en tiempos normales se producen problemas con la calidad de la tensión en la red (Rodríguez, Vázquez, Veléz, & Saltos, 2018).

El puerto de Manta en la provincia de Manabí constituye una de las principales instalaciones económicas del territorio (Rosillo, Intriago, & Bravo, 2019), donde se realizan operaciones con contenedores utilizando grandes grúas que presentan un elevado consumo de electricidad (El Comercio, 2019), pudiendo valorar la introducción de FRE como alternativa energética limpia (Baizura, Othman, Vásquez, Guerrero, & Lien, 2018).

En la UTM, se han realizado varios proyectos de investigación, encaminados a proponer la aplicación de metodologías científicas capaces de generar información relevante, que por su versatilidad ofrezcan la posibilidad de aplicación en todo el territorio.

Entre los proyectos desarrollados en la UTM se encuentra el SIGDS, que se sustenta en una página web de acceso abierto, que asegura información georreferenciada confiable sobre los potenciales de las FRE, como apoyo al proceso de toma de decisiones por las autoridades facultadas (Martínez, Rodríguez, Bravo, Vázquez, & Valencia, 2019); (Rodríguez M., Vázquez, Martínez, & Bravo, 2019). La aplicación puede ser utilizada por estudiantes, profesores e investigadores, sirviendo de ayuda para realizar diferentes proyectos de investigación a partir de información georreferenciada en la provincia.

Otro de los proyectos desarrollados en la UTM, está relacionado con la introducción de microrredes fotovoltaicas conectadas a la red en las instituciones que presentan el mayor consumo de electricidad en el horario diurno, cuando la radiación solar se encuentra disponible para ser aprovechada. Los estudios realizados demuestran que los centros

educacionales pueden ser beneficiados a priori, pues la mayor parte del consumo de energía eléctrica se experimenta durante las horas diurnas (Rodríguez, M; Vázquez, A, 2018). Lo anteriormente señalado se logró evidenciar mediante la evaluación de una microrred fotovoltaica conectada a la línea eléctrica que, se instaló en el año 2016 en la superficie techada de la Facultad de Ciencias matemática, Física y Química de la UTM (Vázquez, Rodríguez, Saltos, Rodríguez, & Cuenca, 2018).

El proyecto referido anteriormente logra demostrar la factibilidad energética, económica y ambiental que resulta de la introducción de la tecnología fotovoltaica en un centro de la educación superior, donde logra reducir el costo de la energía mediante una inversión perfectamente viable desde el punto económico y ambiental.

A diferencia de los sistemas convencionales de generación, transmisión y distribución de la electricidad, los sistemas fotovoltaicos presentan unos gastos de mantenimiento prácticamente simbólicos, pues no requieren la instalación de nuevas líneas eléctricas, ni transformadores, no necesitan ser abastecidos con combustible y lubricantes, constituyendo un potencial reductor de impactos ambientales.

Considerando lo analizado anteriormente, se ha entendido desarrollar el proyecto mediante un caso de estudio, de manera que las experiencias alcanzadas y los propios resultados del proyecto, propicien la generalización de la tecnología en otros territorios.

## **Estudio de carga y el consumo energético**

Con el objetivo de planificar y organizar las actividades del proyecto, se realizaron las coordinaciones del trabajo con las autoridades y factores de la institución, acordando realizar la socialización del proyecto con todo el personal docente y estudiantes, para lograr la comprensión de las acciones que se deben realizar. Acto seguido se realizó el inventario de carga y el estimado del consumo energético horario en la entidad. En la tabla 1 se muestran los resultados del estimado de consumo energético horario por meses del año y el costo de la energía que debe ser cancelado mensualmente a la empresa eléctrica.

Meses del año	Consumo de energía		Total (kWh)	Pagado (USD)	Costo promedio de la energía (USD/kWh)
	08:00-18:00 h (kWh)	18:00-08:00 h (kWh)			
Enero	8189	2938	11127	2204,45	0,20
Febrero	8189	2938	11127	2204,45	0,20
Marzo	16073	7611	23684	2386,8	0,10
Abril	12919	7317	20236	2445,78	0,12
Mayo	21355	8468	29823	2804,46	0,09
Junio	20364	7857	28220	2697,86	0,10
Julio	19571	7941	27512	2703,03	0,10
Agosto	22594	7074	29668	2894,59	0,10
Septiembre	19684	7287	26971	2688,41	0,10
Octubre	22985	6987	29972	2871,53	0,10
Noviembre	26189	6529	32718	2905,18	0,09
Diciembre	16005	6787	22792	2498,25	0,11
Total	214117	79732	293850	31304,79	0,11

Tabla 1. Estimado del consumo de electricidad y costo de la energía

Fuente: Elaboración propia aprovechando los datos del estimado de consumo de energía y las planillas del pago del servicio eléctrico

En la figura 1 se muestra el comportamiento gráfico del consumo mensual de energía en el horario diurno (08:00-18:00) y el horario nocturno (18:00-08:00 h).

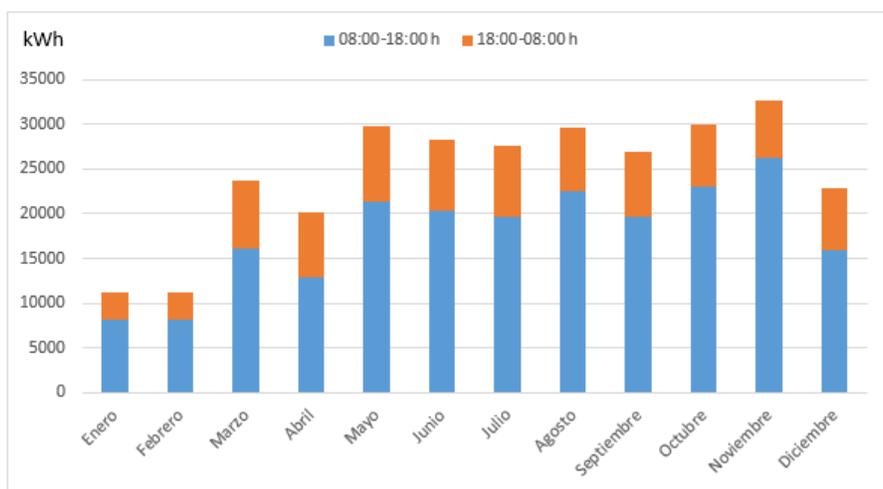


Figura 1. Gráfico del comportamiento del consumo mensual de energía

La información reflejada en la tabla 1 indica que los meses de menor consumo de electricidad son diciembre, enero y abril, coincidiendo con los momentos de receso de las

actividades académicas. El pico de mayor consumo de energía se produce en los meses de noviembre, agosto y mayo. Los de menor impacto en el gasto económico por concepto del pago de la factura eléctrica corresponde desde diciembre hasta abril, experimentándose un alza desde mayo a noviembre.

En la figura 2 se muestra el análisis gráfico del comportamiento horario del consumo promedio de energía eléctrica en un día en la extensión Lodana.

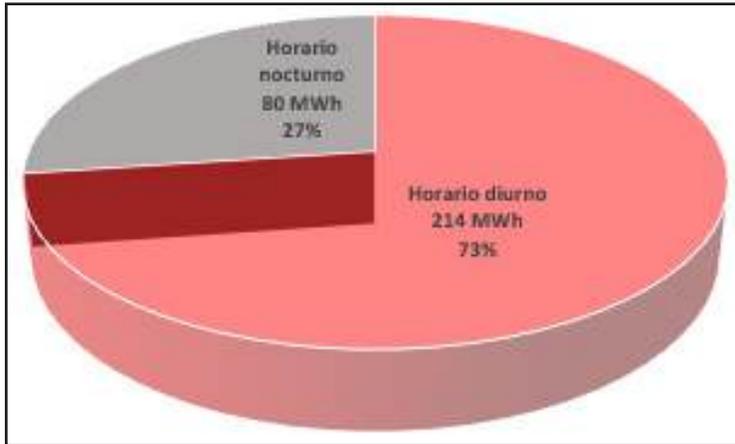


Figura 2. Comportamiento horario del consumo promedio de energía eléctrica  
Fuente: Elaborado con los datos del estimado de consumo horario de energía

Se puede apreciar en la información reflejada en la figura 1, que el mayor consumo de energía de la institución se experimenta en el horario diurno, cuando la radiación solar se encuentra disponible de ser aprovechada mediante la introducción de la tecnología fotovoltaica.

### Examen del comportamiento de la radiación solar

La ubicación geográfica del sitio donde se realiza el caso de estudio propicia la incidencia de un potencial solar que ofrece viabilidad de ser aprovechado durante todo el año de manera prácticamente invariable. En la figura 3, se muestra el mapa del potencial solar promedio anual que incide en la provincia de Manabí, donde se puede apreciar la ubicación de la extensión universitaria Lodana.

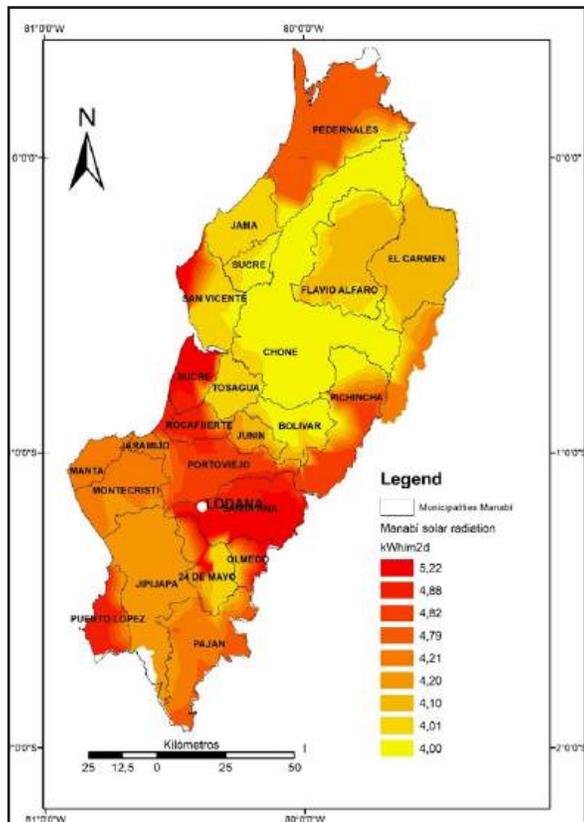


Figura 3. Mapa del potencial solar promedio anual de la provincia de Manabí

Fuente: Elaboración propia con información del proyecto SIGDS

En la tabla 2, se expone el análisis sobre el comportamiento del potencial solar promedio anual en el sitio donde se ubica la extensión Lodana, así como el resultado de las estimaciones de la productividad normalizada y la específica.

Concepto	Prom. anual	Ene	Feb	Mar	Abril	May	Jun	Julio	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Potencial solar promedio anual Cantón Santa Ana (kWh/m <sup>2</sup> día)	4,733	5,290	5,169	5,660	5,583	5,063	4,046	3,681	4,030	4,363	4,339	4,536	5,059
Potencial solar en el sitio Lodana (kWh/m <sup>2</sup> día)	4,820	5,470	5,300	5,810	5,740	5,210	4,090	3,660	4,000	4,370	4,400	4,590	5,220
Productividad normalizada (kWh/kWp día)	4,216	4,713	4,605	5,042	4,974	4,510	3,604	3,280	3,590	3,887	3,865	4,041	4,507
Productividad específica (kWh/kWp año)	1539	146	129	156	149	140	108	102	111	117	120	121	140

Tabla 2. Análisis sobre el comportamiento del potencial solar promedio anual

En la figura 4 se muestra un gráfico comparativo sobre el comportamiento del potencial solar que incide mensualmente en el cantón Santa Ana y en el sitio Lodana, así como la productividad normalizada estimada en cada mes del año.

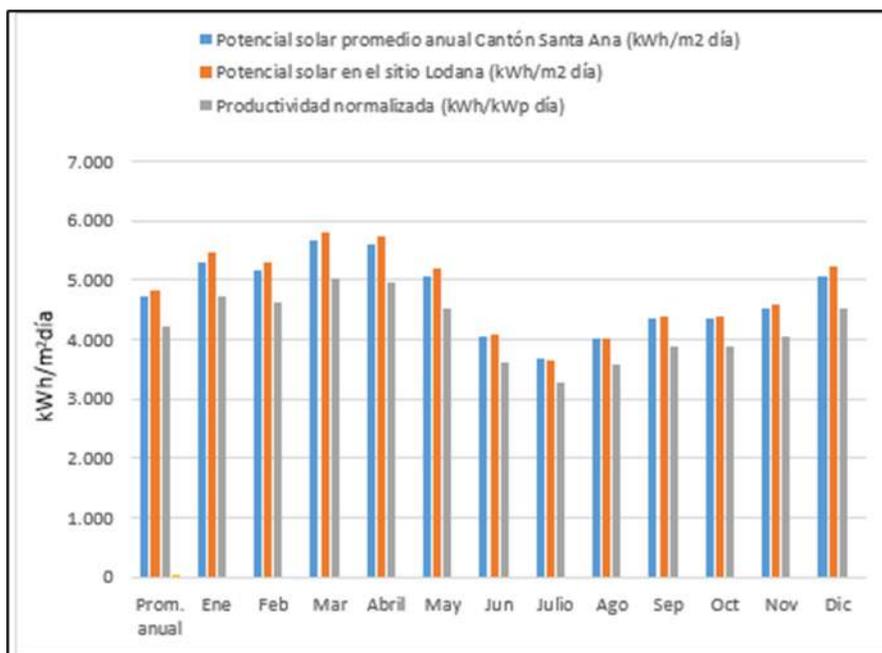


Figura 4. Comportamiento del potencial solar y productividad normalizada

El análisis de los datos permite apreciar que la radiación solar promedio anual que incide en el sitio Lodana, se comporta ligeramente por encima del promedio cantonal, confirmando la viabilidad de introducir la tecnología fotovoltaica con el fin de lograr la repotenciación energética de la institución. Se puede apreciar que los promedios diarios de la generación de energía por cada kWp de fotovoltaica instalado, garantiza la viabilidad técnica del sistema.

### Estimaciones técnicas

Si se conoce que el consumo promedio diario de energía en las horas diurnas en las instalaciones de la extensión Lodana es de 586,6 kWh día y sabiendo el valor de la productividad normalizada, se logró estimar la potencia fotovoltaica requerida para cubrir el consumo energético en el horario diurno, lo que se realizó aplicando la ecuación 1 (Rodríguez, M; Vázquez, A, 2018).

$$P_{fvNi} = \frac{CEdhd}{P_n} \quad (1)$$

$$P_{fvNi} = 139,14 \text{ kWp}$$

Donde:

$P_{fvNi}$  → Potencia fotovoltaica necesaria a instalar (kWp)

$CE_{dhd}$  → Consumo diario promedio de electricidad en el horario diurno (586,6 kWh día)

$P_n$  → Productividad normalizada (4,216 kWh/kWp día)

Para cubrir el consumo de electricidad en el horario diurno de la institución se requiere instalar una potencia fotovoltaica de 130 kWp, no obstante, considerando las limitaciones financieras que presenta la entidad y teniendo en cuenta los precios que tienen las tecnologías en el mercado ecuatoriano, se adoptó el compromiso técnico de proponer la instalación con una capacidad fotovoltaica conectada a la red de 70 kWp.

### **Diseño técnico de la instalación fotovoltaica**

Una vez que se ha considerado la capacidad fotovoltaica que se puede instalar, se procedió al diseño de la composición y estructura técnica de la instalación, para lo cual se utilizó la herramienta PVsyst 6.8.6 (PVsyst V 6.8.6, 2019), resultando la siguiente estructura: 280 módulos de silicio monocristalino de 250 Wp, conectados estructuralmente en 14 cadenas integradas por 20 módulos cada una conectados en serie y las cadenas conectadas en paralelo a los inversores, que sumarían globalmente una potencia nominal de 70 kWp y una potencia en condiciones de funcionamiento de 62,3 kWp a una temperatura de 50° C, con un voltaje de máxima potencia  $V_{mpp}$  = 545 V y una corriente máxima equivalente a 114 A; un inversor fotovoltaico DC-AC, del modelo PVM 450-068-TT, con una potencia de 68 kW en la salida AC; el conjunto de protecciones a la entrada y salida del inversor; el cableado de conexión a la red; los soportes de los generadores fotovoltaicos que se instalaran en las superficies techadas de los edificios y; la protección perimetral de la instalación.

### **Impacto energético**

En la tabla 3, se muestra el balance de los resultados principales, estimados en un año de operaciones de la central fotovoltaica de 70 kWp en la extensión universitaria Lodana.

Meses	PSPi (kWh/m <sup>2</sup> mes)	Tap (°C)	EArray (kWh)	E_Grid (kWh)	ES (%)
Enero	155,5	28,0	8268	7969	10,04
Febrero	142,1	26,2	7565	7291	10,05
Marzo	183,1	26,6	9596	9245	9,89
Abril	180,7	26,6	9559	9216	9,99
Mayo	175,2	26,1	9309	8974	10,03
Junio	130,5	25,0	7072	6809	10,23
Julio	131,2	24,6	7104	6838	10,22
Agosto	135,5	24,6	7321	7050	10,20
Septiembre	135,9	24,8	7341	7070	10,20
Octubre	138,5	25,0	7374	7097	10,05
Noviembre	132,7	25,1	7089	6825	10,09
Diciembre	147,9	25,7	7923	7639	10,11
Total (año)	1788,8	25,7	95521	92024	10,08

Tabla 3. Resultados principales

Fuente: Simulación utilizando la herramienta PVsyst 6.8.6

Donde:

PSPi → Potencial solar sobre plano inclinado

Tap → Temperatura ambiental promedio

EArray → Energía generada por el sistema FV

E\_Grid → Energía entregada a la red

ES → Eficiencia en el aprovechamiento de la energía primaria del Sol

En la figura 5 se muestra el gráfico del comportamiento de la energía generada por la central fotovoltaica y la que se incorpora a la red eléctrica por meses del año, luego de deducida las pérdidas del sistema FV.

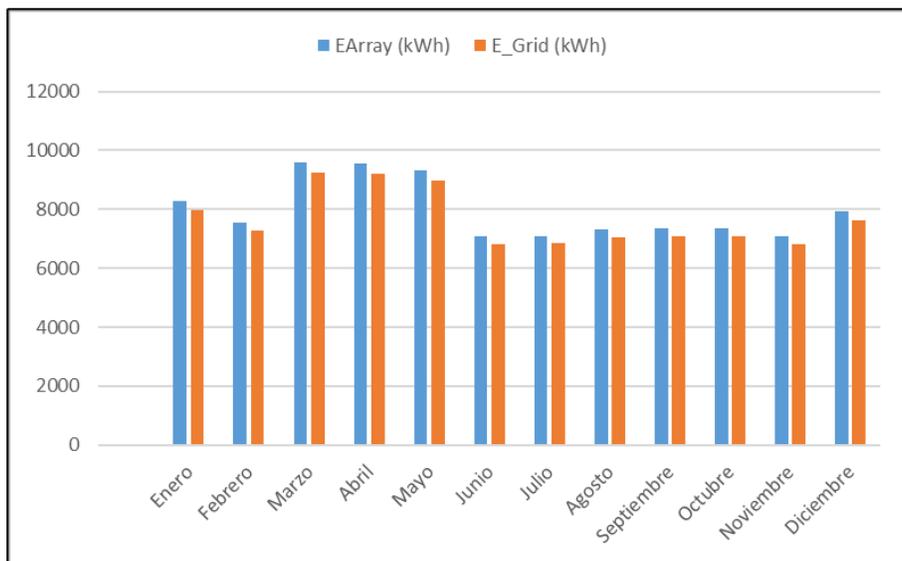


Figura 5. Gráfico del comportamiento de la energía generada y la que se incorpora a la red

Cuando se analiza que las pérdidas de energía del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador pueden llegar a ser hasta del 23% en la provincia de Manabí (ARCONEL, 2019), se logra apreciar que las pérdidas de energía en el sistema fotovoltaico resultan prácticamente simbólicas, comprobando la alta eficiencia que se puede alcanzar con la introducción de la tecnología fotovoltaica en el modo de la generación distribuida. En la tabla 4 se ofrece el análisis del impacto energético considerando el consumo de energía de la institución estudiada en horarios diurnos, en relación con la productividad energética estimada de la tecnología fotovoltaica.

Concepto	Total (año)	Ene	Feb	Mar	Abril	May	Jun	Julio	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Consumo total de energía (MWh)	214,1	8,2	8,2	16	13	21,3	20,3	19,6	22,6	19,7	23	26,2	16
Productividad FV con 70 kWp instalado (MWh)	91,7	7,9	7,2	9,2	9,2	9	6,8	6,8	7	7,1	7,1	6,8	7,6
Porcentaje de cubrimiento fotovoltaico (%)	43	97	89	58	71	42	34	35	31	36	31	26	48

Tabla 4. Análisis del impacto energético

Se puede apreciar que con la introducción de una central fotovoltaica de 70 kWp conectada a la red en las condiciones de la extensión universitaria Lodana, se lograr cubrir el 43% del total del consumo de energía en el horario diurno, pudiendo observar que desde las primeras investigaciones realizadas sobre el impacto energético de las tecnologías

fotovoltaicas, se comprobó que desde el punto de vista técnico se logran otros impactos positivos, especialmente en el perfil de tensión, de las instalaciones que son beneficiadas con la introducción de las microrredes fotovoltaicas conectadas en el modo de la generación distribuida (Huacuz, 1999); (Benalcazar, Lara, & Samper, 2020).

## Impacto económico

Otro de los elementos que demuestra la viabilidad de introducir las microrredes fotovoltaicas en el modo de la generación distribuida, radica en los beneficios económicos que se reportan. Todas las instalaciones de generación de energía representan una inversión inicial que debe ser considerada de manera cuidadosa y analizada minuciosamente durante el ciclo de vida.

Los generadores fotovoltaicos basados en el silicio mono cristalino tienen un ciclo de vida útil operando en condiciones normales que está estimado en 25 años, por lo que el análisis de factibilidad económica que se ha realizado abarca todo ese tiempo. El costo de la energía para la institución estudiada se comporta en 0,11USD/kWh como promedio anual y es el dato que se ha utilizado para realizar el estudio del impacto económico; pero el costo real estimado para la provincia de Manabí es de 0,21USD/kWh.

En la tabla 5, se muestra el costo que representa el paquete tecnológico hasta la instalación y montaje de la central fotovoltaica.

No	Partida de gastos	Potencia FV 70 kWp		
		Cantidad (u)	Precio unitario (USD)	Precio Total (USD)
1	Módulos fotovoltaicos 280 Wp 24V	280	98,75	27.650,00
2	Inversor de conexión a red de 33 kW	2	2.690,00	5.380,00
3	Costo de envío	1	11.00,00	1.100,00
4	Insumos eléctricos para la instalación	1	1.900,00	1.900,00
5	Estructura para los módulos	1	3.267,00	3.267,00
6	Montaje, instalación y prueba	1	5.600,00	5.600,00
7	Costo total de la inversión			44.897,00

Tabla 5. Costo del paquete tecnológico, instalación y montaje

Los cálculos del estudio de factibilidad económica se realizaron con la ayuda del software CHomer (Rodríguez, M; Vázquez, A, 2018), utilizando los siguientes datos de partida: costo de la inversión 44 897,00, los que se cubrirán con recursos propios; una inflación estimada en 3%; una amortización en 5 años; una tasa de descuento del 10%; un gasto planificado de mantenimiento del 10%; con un ingreso inicial en el primer año proveniente del monto evitado de la factura eléctrica equivalente a 11.850,30 y; un tiempo de análisis de 25 años.

Los cálculos realizados reportan un valor actualizado neto (VAN) de 65.018,26, indicando un flujo de caja positivo para la inversión; una tasa interna de retorno del 25%, indicando que la inversión es rentable y que existen oportunidades reales para la reinversión y; un periodo de recuperación económica de 4 años. En la tabla 6, se muestran los resultados generales del análisis de inversión.

Años	Ingresos (\$)	Costes variables (\$)	Amortización (\$)	BAIT (\$)	BAT (\$)	Impuestos (\$)	Beneficio neto (\$)	Flujo de caja (\$)	Beneficio acumulado (\$)
1	11.850,30	1.185,03	8.979,40	1.685,87	1.685,87	168,59	1.517,28	10.496,68	10.496,68
2	12.176,78	1.220,58	8.979,40	1.976,20	1.976,20	197,62	1.778,58	10.496,68	21.254,67
3	12.511,03	1.157,20	8.979,40	2.274,43	2.274,43	227,44	2.046,99	11.026,39	32.281,05
4	12.855,08	1.294,91	8.979,40	2.580,77	2.580,77	258,08	2.322,69	11.302,09	43.583,14
5	13.206,60	1.333,76	8.979,40	2.895,43	2.895,43	269,54	2.605,89	11.585,29	55.168,43
6	13.538,81	1.373,77	0,00	12.165,04	12.165,04	1.216,50	10.946,53	10.948,53	66.116,97
7	13.877,28	1.414,99	0,00	12.462,29	12.462,29	1.246,23	11.216,06	11.216,06	77.333,03
8	14.224,21	1.457,44	0,00	12.766,78	12.766,78	1.276,68	11.490,10	11.490,10	88.823,13
9	14.579,82	1.501,16	0,00	13.078,66	13.078,66	1.307,87	11.770,79	11.770,79	100.593,92
10	14.944,31	1.546,20	0,00	13.398,12	13.398,12	1.339,81	12.058,31	12.058,31	112.652,23
11	15.700,87	1.592,58	0,00	13.725,34	13.725,34	1.372,53	12.352,81	12.352,81	125.005,04
12	16.495,73	1.640,38	0,00	14.060,51	14.060,51	1.406,05	12.654,46	12.654,46	137.659,50
13	16.093,39	1.689,57	0,00	15.115,66	15.115,66	1.440,38	12.963,44	12.963,44	150.622,94
14	16.495,73	1.740,26	0,00	15.484,58	15.484,58	1.475,55	13.279,92	13.279,92	163.902,86
15	16.908,12	1.792,46	0,00	15.155,66	15.155,66	1.511,57	13.604,09	13.604,09	177.506,95
16	17.330,82	1.846,24	0,00	15.484,58	15.484,58	1.548,46	13.936,13	13.936,13	191.443,08
17	17.764,09	1.901,63	0,00	15.863,47	15.863,47	1.586,25	14.276,22	14.276,22	205.719,30
18	18.208,20	1.958,67	0,00	16.249,52	16.249,52	1.624,95	14.624,57	14.624,57	220.343,87
19	18.663,20	2.017,43	0,00	16.645,97	16.645,97	1.664,60	14.981,37	14.981,37	235.235,24
20	19.129,99	2.077,96	0,00	17.052,03	17.052,03	1.705,20	15.346,83	15.346,83	250.672,06
21	19.608,24	2.140,30	0,00	17.467,94	17.467,94	1.746,79	15.721,15	15.721,15	266.393,21
22	20.098,44	2.204,50	0,00	17.893,94	17.893,94	1.789,39	16.104,54	16.104,54	282.497,75
23	20.600,90	2.270,64	0,00	18.330,26	18.330,26	1.833,03	16.457,24	16.497,24	298.994,49
24	21.115,92	2.338,76	0,00	18.777,17	18.777,17	1.877,72	16.899,45	16.899,45	315.894,44
25	21.643,82	2.408,92	0,00	18.234,90	18.234,90	1.923,49	17.311,41	17.311,41	333.205,86

Donde:

BAIT→ Ingreso menos impuesto

BAT→ Beneficio antes de impuestos

Tabla 6. Resultados generales del análisis de la inversión

Fuente: Elaboración propia mediante la utilización del software CHOMER (Rodríguez, M; Vázquez, A, 2018)

Resulta interesante señalar que cuando se realiza el estudio considerando el precio real de la energía, el VAN es equivalente a 161.856,47, con una TIR de 45% y 2 años para la recuperación económica de la inversión. Lo que permite ubicar a la inversión en un plano muy competitivo comparado con cualquier otra fuente energética.

## Impacto ambiental

Cualesquiera de las FRE representan una potencialidad positiva ambientalmente. En el caso de la energía fotovoltaica los impactos se reducen a la utilización del espacio; pero cuando se trata de las instalaciones en el modo de la GD, existe la posibilidad de

manejar el impacto mediante la utilización de las superficies de las edificaciones, techados de parqueos y pasillos exteriores, así como la utilización de terrenos improductivos, siempre que se encuentren cercanos a la instalación que será beneficiada con la tecnología fotovoltaica. En la instalación de Lodana se ha considerado instalar la tecnología en la superficie techada de las edificaciones, parqueos y pasillos exteriores que cuenta con 975m<sup>2</sup> de superficie utilizable.

Otro de los aspectos está asociado con la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Si se conoce que, por cada MWh de energía eléctrica generada en las centrales térmicas de la provincia de Manabí, se emiten a la atmósfera 0,9 toneladas de CO<sub>2</sub> (Rodríguez & Vázquez, 2018), se puede calcular el aporte de la energía fotovoltaica a la reducción de las emisiones contaminantes por concepto de evitar el consumo de energía que se genera con el petróleo, que en este caso es equivalente a 82,53 toneladas de CO<sub>2</sub> en el ciclo de vida.

Sintetizando lo analizado anteriormente se puede decir que existen otros impactos de cara a la gestión energética en el SNI, pero que su análisis rebasa los objetivos trazados para el trabajo, por lo que se recomienda su estudio a profundidad en la medida que el aporte de las FRE se vaya incrementando en la matriz energética del territorio.

Desde el punto de vista de los impactos energéticos, ya se ha comentado que las pérdidas del SNI en la provincia de Manabí pueden llegar hasta el 21%, lo que supone estimar que, como promedio, por cada kWh de electricidad suministrada por la tecnología fotovoltaica conectada a la red en el modo de la GD, se puede evitar la generación de 1,23 kWh en la central eléctrica. Otros de los impactos a estudiar están relacionado con los efectos de la penetración en la red, especialmente en las instalaciones que se conectan en el modo de la GD, así como el papel de la fotovoltaica para evitar petróleo en la generación, contribuyendo a la preservación de los recursos naturales.

## CONCLUSIONES

La investigación permitió verificar que al igual que en la provincia de Manabí, en el territorio nacional incide un elevado potencial solar durante todo el año de manera prácticamente ininterrumpida, lo que permite afirmar que la introducción de microrredes fotovoltaicas combinadas con las redes eléctricas del Sistema Nacional Interconectado, constituye una alternativa que resulta viable en función de la diversificación y relocalización de los recursos energéticos, la elevación de la eficiencia, el ahorro de recursos naturales, la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente y del costo de la energía.

Se logra demostrar la viabilidad técnica, económica y ambiental relacionada con la introducción de una central fotovoltaica conectada a la red en el modo de la generación distribuida en la extensión universitaria Lodana, donde se lograron desarrollar las ideas conceptuales, verificando que la tecnología fotovoltaica conectada directamente a la red de consumo ofrece un nivel de competitividad adecuado con cualquier otra de las fuentes

de energía.

Se logra demostrar la sencillez de los métodos de análisis utilizados, y se puede comprobar que su versatilidad permite su aplicación para ser generalizado en otros territorios que presenten condiciones geográficas y climáticas similares.

Las condiciones estructurales de la extensión Lodana de la Universidad Técnica de Manabí, ofrece la posibilidad de que los generadores fotovoltaicos se puedan incorporar en el modo de la generación distribuida, formando parte de las superficies techadas, así como las cubiertas de parqueos y pasillos exteriores, logrando con ello reducir al máximo la competencia de utilización del espacio útil que puede ser aprovechado para otras funciones, propiciando aproximar la generación de electricidad al consumo reduciendo las pérdidas de energía.

## REFERENCIAS

AleaSoft Energy Forecasting. (2019). *pv-magazine*, On line. (A. I. renovables, Productor) Recuperado el 9 de febrero de 2020, de <https://www.pv-magazine.es/2019/02/27/alemania-lider-en-la-implantacion-de-energias-renovables/>

Alvarez, E., & Ortiz, I. (2016). *La transición energética en Alemania (Energiewende)*. Política, Transformación Energética y Desarrollo Industrial. Instituto Vasco de Competitividad, Fundación Deusto. Bilbao: Cuadernos Orkestra. Recuperado el 29 de enero de 2020, de [https://www.orkestra.deusto.es/images/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orkestra/La\\_transici%C3%B3n\\_energ%C3%A9tica\\_en\\_Alemania\\_Energiewende\\_-\\_Versi%C3%B3n\\_web.pdf](https://www.orkestra.deusto.es/images/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orkestra/La_transici%C3%B3n_energ%C3%A9tica_en_Alemania_Energiewende_-_Versi%C3%B3n_web.pdf)

ARCONEL. (2019). *Balance Nacional de Energía Eléctrica*. información estadística de septiembre de 2019, Ministerio de Electricidad y Energías Renovables (MEER), Agencia de Regulación y Control de Electricidad, Quito, Ecuador. Recuperado el 11 de marzo de 2020, de <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/balance-nacional/>

Asamblea Constituyente. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Norma jurídica, Montecristi. Recuperado el 20 de enero de 2020, de <https://www.cosede.gob.ec/wp-content/uploads/2019/08/CONSTITUCION-DE-LA-REPUBLICA-DEL-ECUADOR.pdf>

Baizura, N., Chun-Lien, S., Zhaoxia, X., Vásquez, J., & Guerrero, J. (2018). Modelado y controles de los sistemas de almacenamiento de energía del volante para la recolección de energía de las grúas eléctricas de puerto. (R. a. (IAS), Ed.) *Transacciones IEEE en aplicaciones industriales*, 55(4), 3354-3364. doi:10.1109 / IAS.2018.8544652

Baizura, N., Othman, M., Vásquez, J., Guerrero, J., & Lien, C. (2018). Dimensionamiento óptimo y evaluación del rendimiento de una microrred basada en energía renovable en futuros puertos marítimos. (I. C. (ICIT), Ed.) *Ingeniería Informática*. doi:DOI: 10.1109 / icit.2018.8352322

Benalcazar, P., Lara, J., & Samper, M. (2020). Distributed photovoltaic generation in Ecuador: Economic analysis and incentives mechanisms. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, 18(3, March 2020). Recuperado el 29 de marzo de 2020

Bordons, C., García-Torres, F., & Valverde, L. (2015). Gestión Óptima de la energía en Micro redes con Generación Renovable. *Revista Iberoamericana de automática industrial*, 12, 117-132. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2015.03.001

Correa, R., Celi, K., & Gómez, F. (2017). *Perspectivas del desarrollo regional sustentable en Ecuador tomo II*. Titulación de Economía, Memorias RECIR 2016 - 1er Encuentro Internacional y 2do Encuentro Nacional de la Red Ecuatoriana de Ciencias Regionales, Departamento de Economía.

El Comercio. (2019). Puerto de Manta marca hito en movimiento de carga en contenedores. *Diario El Comercio*. Recuperado el 11 de enero de 2020, de <https://www.elcomercio.com/actualidad/puerto-manta-hito-contenedores-exportaciones.html>

Guido, H., Poveda-Burgos, K., Ruiz, M., & González, J. (2017). Desarrollo de energías renovables en el Ecuador del siglo XXI, optimización de recursos económicos y conservación del medio ambiente. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*. Julio 2017. Recuperado el 20 de febrero de 2020, de <http://www.eumed.net/coursecon/ecolat/ec/2017/energias-renovables-ecuador.html>.

Huacuz, J. (1999). *Generación eléctrica distribuida con energías renovables*. Boletín IIE, Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), Cuernavaca, México.

IGM. (2013). Capas de Información Geográfica básica del Instituto de Geografía Militar. *En línea*. Quito, Pichincha, Ecuador. Recuperado el 15 de enero de 2020, de <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/descargas/cartografia-de-libre-acceso/carto>

Jaramillo, J., & Chamba, D. (2008). *Una aproximación CTS a la implementación de la primera empresa de servicio eléctrico público en el Ecuador*. Informe Técnico, Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), Escuela de Electrónica y Telecomunicaciones, Loja, Ecuador. Recuperado el 10 de marzo de 2020, de <file:///X:/HISTORIA/jorgeluis-loja-pionera-de-la-generacion-electrica-junio-2008.pdf>

Jurado, J. (2012). *Análisis de las empresas de energía eléctrica tras la aplicación del Mandato 15*. Disertación previa a la obtención del título de Economista, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Economía, Quito, Ecuador.

López, M. (2018). *Análisis de la viabilidad de la implantación de microrredes en España. Consideraciones técnicas, regulatorias y económicas*. Proyecto de titulación, Universidad Pontificia de Comillas, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Madrid. Recuperado el 10 de marzo de 2020, de <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/22737/TFG-%20Lopez-Tafall%20Criado%2C%20Monica.pdf?sequence>

Macías, J., Valarezo, L., & Loor, G. (2018). Los Diferentes Costos que Tiene la Energía Eléctrica en el Ecuador Considerando los Cambios de la Estructura Actual. *Revista RIEMAT*, 3(2).

Martínez, V., Rodríguez, M., Bravo, J., Vázquez, A., & Valencia, J. (2019). Implementación de un Sistema de Información Geográfica para el Desarrollo Sostenible, en la Universidad Técnica de Manabí (Ecuador). *Espacios*, 40(39), 26. Recuperado el 4 de febrero de 2020, de <https://www.revistaespacios.com/a19v40n39/a19v40n39p26.pdf>

Medina, R. (2014). Microrredes basadas en Electrónica de Potencia: Características, Operación y Estabilidad. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, 12, 15-23. doi:DOI: 10.17163.ings.n12.2014.02

MEER. (2016). *Plan Maestro de Electricidad*. Plan Institucional Nacional, Ministerio de Electricidad y Energías Renovables, Quito. Recuperado el 15 de enero de 2020, de <https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/images/PME%202016-2025.pdf>

Piloso, A. (2017). *Diagnóstico y análisis de generación de energías renovables no convencionales en el sistema eléctrico del Ecuador*. Trabajo de titulación, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Facultad de Ingeniería. Carrera de Ingeniería Eléctrica, Manta, Manabí, Ecuador. Recuperado el 21 de febrero de 2020, de <https://repositorio.ulead.edu.ec/bitstream/123456789/636/1/ULEAM-IEL-0002.pdf>

PVsyst V 6.8.6. (2019). Herramienta para el diseño y simulaciones técnicas en sistemas. Recuperado el 7 de febrero de 2020, de <https://www.pvsyst.com/>

Redera, K; Stappela, M; Hofmannb, C; Försterc, H; Emelec, L; Hülkb, L; M, Glauerd. (2020). Identification of user requirements for an energy scenario database. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, Vol. 25 2020, 95-108. Recuperado el 25 de marzo de 2020, de <http://doi.org/10.5278/ijsepm.3327>

Rodríguez, M., Vázquez, A., Martínez, V., & Bravo, J. (2019). The Geoportal as Strategy for Sustainable Development. *International Journal of Physical Sciences and Engineering*, 3(1), 10~21. doi:<https://doi.org/10.29332/ijpse.v3n1.239>

Rodríguez, M., Vázquez, A., Martínez, V., & Bravo, J. (2019). The Geoportal as Strategy for Sustainable Development. *International Journal of Physical Sciences and Engineering*, 3(1), 10-21. doi:<https://doi.org/10.29332/ijpse.v3n1.239>

Rodríguez, M., Vázquez, A., Saltos, W., & Guardarrama, J. (2017). El potencial solar y la generación distribuida en la provincia de Manabí en el Ecuador. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología (REIMAT)*, 2(2), 41-45.

Rodríguez, M., Vázquez, A., Veléz, M., & Saltos, V. (2018). Mejora de la calidad de la energía con sistemas fotovoltaicos en las zonas. *Revista Científica*, 33(3), 265-274. doi:Doi: <https://doi.org/10.14483/23448350.13104>

Rodríguez, M; Vázquez, A. (2018). *Capítulo V. Estudio de factibilidad energética, técnico-económica y ambiental* (Vol. 1). Portoviejo, Manabí, Ecuador: Universidad Técnica de Manabí. Recuperado el 25 de enero de 2020, de ediciones@utm.edu.ec

Rodríguez, M; Vázquez, A. (2018). *La energía fotovoltaica en la provincia de Manabí* (Vol. 1). Portoviejo, Manabí, Ecuador: Universidad Técnica de Manabí. Recuperado el 9 de febrero de 2020, de [https://www.utm.edu.ec/ediciones\\_utm/index.php/component/content/article?id=713:la-energia-fotovoltaica-en-la-provincia-de-manabi](https://www.utm.edu.ec/ediciones_utm/index.php/component/content/article?id=713:la-energia-fotovoltaica-en-la-provincia-de-manabi)

Rodríguez, M; Vázquez, A. (2018). *La Energía Solar en la provincia de Manabí*. Portoviejo, Manabí, Ecuador: ediciones@utm.edu.ec. Recuperado el 5 de marzo de 2020, de [https://www.utm.edu.ec/ediciones\\_utm/index.php/component/content/article?id=713:la-energia-fotovoltaica-en-la-provincia-de-manabi](https://www.utm.edu.ec/ediciones_utm/index.php/component/content/article?id=713:la-energia-fotovoltaica-en-la-provincia-de-manabi)

Rosillo, N., Intriago, M., & Bravo, G. (2019). Resiliencia después del movimiento telúrico en Ecuador (2016). Políticas económicas para la sostenibilidad empresarial. *Economía y Desarrollo*, 162(2). Recuperado el 20 de marzo de 2020, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0252-85842019000200007&lng=es&tling=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0252-85842019000200007&lng=es&tling=es).

Salazar, J. (2017). Microrredes en universidades colombianas. *VICIUREE. Congresos de eEficiencia y gestión energética*, (pág. 12). Universidad industrial de Santander: (UIS).

Saltos, W., Rodríguez, M., Vázquez, A., Loor, G., & Cuenca, L. (2017). The Future of Micro-Grids in Ecuador. *International Journal of Physical Sciences and Engineering*, 1(3), 1-8. Recuperado el 12 de febrero de 2020, de <https://sciencescholar.us/journal/index.php/ijpse/article/view/53/82>

Sánchez, J. (2015). *El Sector Energético del Ecuador y la Diversificación de la Matriz Energética: El Caso de Manta*. México, Durango, México: Editorial de la Universidad Juárez del estado de Durango.

Sarmiento, A., Rodríguez, M., Castillo, O., & Vázquez, A. (2014). Sistemas Integrados de energías con fuentes renovables. *Ingeniería Energética*, XXXV(1), 71-78.

UTM. (2018). Una geoweb para el desarrollo sostenible. *Sistema de Información Geográfica para el Desarrollo Sostenible (SIGDES) de la Universidad Técnica de Manabí*. (M. R. Gámez, Ed.) Portoviejo, Manabí, Ecuador. Recuperado el 2 de marzo de 2020, de <http://geoportal.utm.edu.ec/>

Vázquez, A., & Castillo, W. (2015). La energía solar en la provincia de Manabí y el déficit de un Marco Regulatorio adecuado. En M. d. (MEER) (Ed.), *XXX Seminario Nacional del Sector Eléctrico Riobamba 2015*. Rio Bamba, Ecuador.

Vazquez, A., Rodríguez, M., Saltos, W., Rodríguez, C., & Cuenca, L. (2018). Rendimiento energético, económico y ambiental de una Central Fotovoltaica de 3,4 KWp en el modo de la generación distribuida (GD). *Revista Espacios*, 39(47), 34. Recuperado el 5 de febrero de 2020, de <http://www.revistaespacios.com/a18v39n47/a18v39n47p34.pdf>

Velazquez, R., Sarmiento, H., Silva, J., Vidrio, G., & Nieva, R. (julio-septiembre de 2010). Introducción al concepto de micro redes. *Tendencias tecnológicas*. Recuperado el 21 de enero de 2020, de <https://www.ineel.mx/boletin032010/tenden.pdf>

WEO. (2017). *Un mundo en transformación. Cambios globales en el sistema energético*. Informe emblemático, World Energy Outlook, IEA. Recuperado el 9 de febrero de 2020, de <https://www.mincotur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/406/PRIMERA%20NOTA.pdf>

WEO. (2018). *Perspectivas energéticas mundiales*. Agencia Internacional de Energía (IEA), World Energy Outlook. OECDilibrary. Recuperado el 3 de marzo de 2020, de [https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2018\\_weo-2018-en](https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2018_weo-2018-en)

WEO. (2019). *El World Energy Outlook 2019, de la IEA, aborda las disparidades del sistema energético global*. Agencia Internacional de Energía, World Energy Outlook. EnergyNews. Recuperado el 4 de marzo de 2020, de <https://www.energynews.es/el-world-energy-outlook-2019-de-la-iea-aborda-las-disparidades-del-sistema-energetico-global/>

# ANÁLISE DE ALGORITMOS DE ESTIMAÇÃO PARAMÉTRICA APLICADOS AO PROJETO DE CONTROLADOR ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA

Data de aceite: 01/11/2022

### Henrique Coldebella

Discente do Curso de Engenharia  
Eletrônica/DAELN. Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná, Campo  
Mourão, Paraná, Brasil  
ID Lattes: 5427493624834560

### Leandro Castilho Brolin

Coordenador. Docente no Curso  
de Engenharia Eletrônica/DAELN.  
Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil  
ID Lattes: 7118655172023189

### Flávio Luiz Rossini

Orientador. Docente no Curso de  
Engenharia Eletrônica/DAELN.  
Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil  
ID Lattes: 8616413126997528

**RESUMO:** O presente artigo, propõem-se um estudo teórico direcionado a uma comparação entre os algoritmos de estimação paramétrica do Gradiente e dos Mínimos Quadrados Recursivos, aplicados ao projeto de Controlador Adaptativo por Modelo de Referência (do inglês “*Model Reference Adaptive Controller*” -

MRAC). Atualmente, na área de Controle e Automação, tornou-se essencial no ambiente fabril o conceito de Indústria 4.0. Neste contexto, há necessidade de uma maior precisão e capacidade de contornar mudanças de pontos de operação, erros por variação de parâmetros e falhas ou mesmo quebra de componentes. Uma alternativa para melhorar o desempenho desses processos emergem com as técnicas de controle adaptativo. Assim, a presente proposta tem como objetivo comparar alguns métodos de projeto e simulação de sistemas de controle adaptativo aplicado a plantas típicas, tal como servo posicionamento. O presente artigo teve como foco o controlador MRAC e seus mecanismos de adaptação. Dessa forma, o trabalho foi dividido em etapas, a seguir: implementaram-se o Método do Gradiente (MG) e o Método dos Mínimos Quadrados Recursivo (MMQR) no bloco de adaptação do controlador; Compararam-se os resultados simulados no *software* Matlab®; e Estabeleceu-se um modelo com parâmetros variantes de um servomotor CC para validar os algoritmos estudados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Comparação entre

## ANALYSIS OF PARAMETRIC ESTIMATION ALGORITHMS APPLIED TO ADAPTIVE CONTROLLER DESIGN BY REFERENCE MODEL

**ABSTRACT:** This article proposes a theoretical study aimed at a comparison between the parametric estimation algorithms of the Gradient Method (GM) and the Recursive Least Squares (RLS), applied to the Model Reference Adaptive Controller project. Currently, in the area of Control and Automation, the concept of Industry 4.0 has become essential in the industrial environment. In this context, there is a need for greater precision and the ability to circumvent changes in operating points, errors due to parameter variation and failures or even breakage of components. An alternative to improve the performance of these processes emerges with adaptive control techniques. Thus, the present proposal aims to compare some methods of design and simulation of adaptive control systems applied to typical plants, such as servo positioning. This article focused on the MRAC controller and its adaptation mechanisms. Thus, the work was divided into stages, as follows: () the Gradient Method (MG) and the Recursive Least Squares Method (MMQR) were implemented in the adaptation block of the controller; The results simulated in the Matlab® software were compared; and () A model with variant parameters of a DC servomotor was established to validate the studied algorithms.

**KEYWORDS:** Comparison between RLS and GM. MRAC. Simulated Results.

## INTRODUÇÃO

O conceito de adaptação parte de uma ação em que se muda um determinado comportamento para se ajustar a novas condições. Da mesma forma, na indústria, existem processos ou plantas que estão sujeitas a alterações em seu comportamento dinâmico, seja por variação de seus parâmetros de operação ou erros imprevistos (ÄSTRÖM; WITTENMARK, 1995).

Neste contexto, deu-se início aos primeiros estudos direcionados a criação de um sistema de controle capaz de se ajustar continuamente às alterações dinâmicas no processo. Os primeiros controladores adaptativos surgiram na década de 1950, com o desenvolvimento de sistemas de piloto automático para aeronaves (GREGORY, 1959). Apesar disso, foi durante as décadas de 1970 e 1980, quando a base teórica de estabilidade foi provada com argumentos matemáticos sólidos, que os primeiros controladores adaptativos comerciais surgiram no mercado (LANDAU; LOZANO; MŠSAAD; KARIMI, 2011).

A principal inovação dos sistemas de controle adaptativo é a possibilidade de modificar os ganhos do controlador de forma que sejam atendidas as especificações do sistema de controle, ajusta-se o comportamento do sistema conforme as alterações paramétricas da planta (ÄSTRÖM; WITTENMARK, 1995) (ROSSINI, 2020).

Portanto, o presente artigo focou no projeto de Controlador Adaptativo por Modelo de Referência (do inglês “*Model Reference Adaptive Controller*” - MRAC). Esse tipo de

controlador contém um modelo que representa as especificações de desempenho para o processo a ser controlado, e um mecanismo para realizar o ajuste dos ganhos do controlador de forma recursiva (IOANNOU; SUN, 1996) (ROSSINI, 2020). Compararam-se os desempenhos do MRAC, a partir do uso de algoritmos de estimação distintos, o Método do Gradiente (MG), e o Método dos Mínimos Quadrados Recursivo (MMQR).

Dessa forma, realizou-se um estudo teórico direcionado ao desenvolvimento matemático e a implementação dos códigos de cada algoritmo, bem como a validação dos mecanismos modelados ao serem submetidos a um processo variante no tempo. Para isso, utilizou-se a ferramenta MATLAB® para conduzir as devidas implementações e simulações dos controladores estudados.

## CONTROLE ADAPTATIVO

Nesta seção, serão apresentados os principais referenciais teóricos para o desenvolvimento deste artigo. Com base nos principais autores da área de controle adaptativo, será apresentado o conceito base para o projeto de MRAC, bem como serão demonstrados os algoritmos matemáticos para a implementação do mecanismo de adaptação.

## CONTROLE ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA

Proposto inicialmente por Whitaker et al. (1958), o sistema MRAC, tem como objetivo regular o processo a ser controlado de forma a se obter um comportamento dinâmico próximo ao do modelo de referência pré-estabelecido no projeto. O modelo de referência  $F_m(s)$  descreve o comportamento esperado em malha fechada do sistema de controle (ÅSTROM; WITTENMARK, 1995).

Para que sejam ajustados os ganhos do controlador, implementa-se um mecanismo de adaptação, ou algoritmo de adaptação paramétrica. Esse algoritmo disponibiliza os respectivos sinais para realimentar o controlador com os parâmetros de ganho  $\hat{\vartheta}(t)$ , os quais são estimados com base na variação entre a resposta de saída do sistema  $y(t)$  e a saída do modelo de referência  $y_m(t)$  (GARCIA, 2019).

Assim, o mecanismo de adaptação recebe como entrada a saída do controlador  $u(t)$  e o valor do erro local  $\tilde{y}(t)$ , descrito por:

$$\tilde{y}(t) = y(t) - y_m(t) \tag{1}$$

O mecanismo tem como saída, portanto, um vetor de parâmetros estimados do controlador  $\hat{\vartheta}(t)$ . Na Figura 1, ilustra-se um diagrama de blocos típico do MRAC.

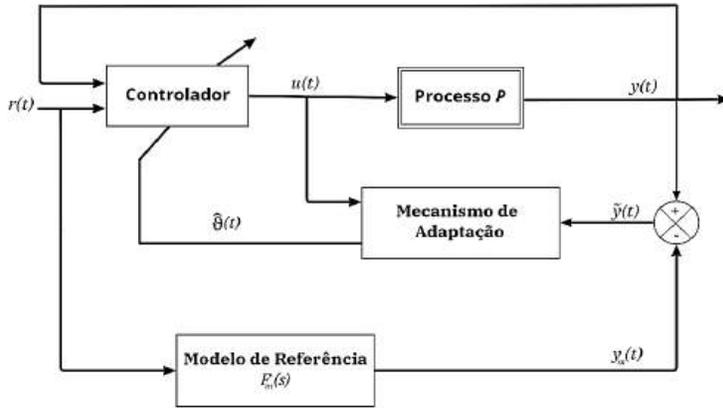


Figura 1 - Diagrama de Blocos de um MRAC  
 Fonte: Adaptado de (IOANNOU; SUN, 1996).

A lei de controle  $u(t)$  pode ser expressa da forma:

$$u(t) = \hat{\theta}^T \omega(t) \tag{2}$$

sendo  $\omega(t)$  o vetor de regressores do sistema.

O modelo apresentado na Figura 1 demonstra a importância do mecanismo de adaptação dentro de um sistema MRAC. Logo, para desempenhar a função de lei de controle e fornecer os ganhos do controlador, existem diferentes abordagens, tais como o MG e o MMQR.

## MÉTODO DO GRADIENTE DE ADAPTAÇÃO PARAMÉTRICA

Desenvolvido no *Draper Laboratory* do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (do inglês “*Massachusetts Institute of Technology*” - MIT), o Método do Gradiente (MG) é um dos métodos de estimação paramétrica em projeto de MRAC, devido sua origem, encontra-se em algumas bibliografias como a Regra do MIT (do inglês “*MIT Rule*”).

O mecanismo de adaptação utiliza o MG e tem como objetivo minimizar a função custo  $J(\hat{\theta})$ , da forma:

$$J(\hat{\theta}) = \frac{1}{2} \tilde{y}(t) \tag{3}$$

Dessa forma, para que  $J$  seja mínimo, modifica-se o vetor de parâmetros  $\hat{\theta}$  na direção a um gradiente negativo de  $J$ , de tal forma que a variação dos parâmetros  $\hat{\theta}$  equivale a uma derivada parcial de  $J$  em função de  $\hat{\theta}$ , da forma:

$$\frac{d \hat{\theta}}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \hat{\theta}} \tag{4}$$

sendo  $\gamma$  um fator de ganho arbitrário para o projeto.

Assim, ao substituir a derivada parcial de  $J$  na Eq. (4), obtém-se:

$$\frac{d\hat{\theta}}{dt} = -\gamma\tilde{y} \frac{\partial\tilde{y}}{\partial\hat{\theta}} \quad (5)$$

Portanto a Eq. (5) representa a lei adaptativa do MG.

Considerou-se a função de transferência de uma planta  $P(s)$  de ordem  $n$ , escrita como:

$$P(s) = k_p \frac{Num_p(s)}{Den_p(s)} \quad (6)$$

Segundo Åström e Wittenmark (1995) para o projeto de MRAC, o conhecimento dos polinômios do processo  $P(s)$  não são necessários para a estimação dos parâmetros do controlador  $\hat{\theta}$ , dessa forma, estabeleceu-se um modelo de referência estável, da forma:

$$F(s) = k_m \frac{Num_m(s)}{Den_m(s)} \quad (7)$$

A diferença entre o número de raízes do polinômio do numerador e do polinômio do denominador indica o grau relativo  $n^*$  da planta.

Assim, para processos de ordem  $n$  e  $n^*=1$ , usou-se o vetor de regressores  $\omega$  para realizar a estimação dos parâmetros  $\hat{\theta}$ .

$$\frac{d\hat{\theta}}{dt} = -\gamma\tilde{y}(t)\omega(t) \quad (8)$$

com  $\omega = [\omega_1^T; \omega_2^T; y; r]^T$ , sendo  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $y$ ,  $r$  os regressores dos parâmetros da lei de controle.

Utilizou-se um filtro auxiliar  $\phi(t)$ , o qual executa a filtragem do vetor de regressores  $\omega(t)$  pelo modelo de referência  $F_m(s)$ , expressado por:

$$\phi(t) = F_m(s)\mathbf{I}\omega(t) \quad (9)$$

E substituiu-se o valor de erro da Eq. (1) pelo erro de estimação na forma:

$$E_1(t) = \tilde{y}(t) + \hat{\theta}^T(t)\phi(t) - F_m(s)u(t) \quad (10)$$

Portanto, de forma mais abrangente, seja para processos de ordem  $n$  e grau relativo  $n \geq 1$ , a lei adaptativa do MG pode ser reescrita da forma (IOANNOU; SUN, 1996)

$$\frac{d\hat{\theta}}{dt} = -\gamma \frac{\phi(t)E_1(t)}{1 + \phi(t)\phi^T(t)} \quad (11)$$

## MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS RECURSIVO DE ADAPTAÇÃO PARAMÉTRICA

A lei de estimação de parâmetros MMQR é caracterizada por possui uma matriz de covariância  $\mathbf{P}$ , essa determina a velocidade de adaptação dos parâmetros em função do tempo ou amostras. Assim, torna-se possível acelerar o processo de estimação no período

transitório ao inicializar a matriz  $\mathbf{P}$  com um valor suficientemente alto (IOANNOU; SUN, 1996).

O MMQR tem como o objetivo minimizar a função de custo do erro quadrático, expressada por:

$$J(\hat{\theta}) = \frac{1}{2} \int_0^t E_1^2(\tau) d\tau \quad (12)$$

Segundo Aguirre (2007), um modelo de lei adaptativa MMQR pode ser definida como:

$$\frac{d\hat{\theta}}{dt} = -\mathbf{P}(t) \frac{\phi(t)E_1(t)}{1 + \phi(t)\phi^T(t)} \quad (13)$$

sendo  $\phi(t)$  expresso pela Eq. (9),  $E_1(t)$  expresso pela Eq. (10) e a matriz de covariância  $\mathbf{P}(t)$  é atualizada a partir das equações diferenciais matriciais:

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = -\frac{\mathbf{P}(t)\phi(t)\phi^T(t)\mathbf{P}(t)}{1 + \phi(t)\phi^T(t)} \quad (14)$$

sendo  $[1 + \phi(t)\phi^T(t)]$  um sinal de normalização, cuja função é garantir que a derivada seja sempre negativa.

## DISCRETIZAÇÃO

Para a implementação digital das leis adaptativas descritas na seção anterior, usam-se métodos numéricos para discretizar as derivadas paramétricas. O método escolhido para discretização das equações de tempo contínuo foi o Método de Euler. Este método propõe a substituição da derivada instantânea no tempo contínuo por uma aproximação em tempo discreto, descrita como:

$$\frac{dx(t)}{dt} \cong \frac{x(k+1) - x(k)}{T} \quad (15)$$

sendo  $x(t)$  um sinal com amostragem  $T$  para  $k$  amostras.

A derivada deste sinal no tempo representa a variação do mesmo entre uma amostra seguinte e a atual, dividido pelo tempo amostrado.

Ao aplicar a Transformada de Laplace em ambos os lados da Eq. (15), obtém-se a seguinte representação no domínio da frequência:

$$sY(s) = Y(s) \left[ \frac{e^{sT} - 1}{T} \right] \quad (16)$$

sendo  $z = e^{sT}$ , torna-se possível obter uma relação de  $s$  no domínio da Transformada Z que define o Método de Euler, descrito por:

$$s = \frac{z - 1}{T} \quad (17)$$

## METODOLOGIA

A implementação digital das leis adaptativas do MG e do MMQR foi realizada com o uso do Método de Euler descrito na subseção anterior. Dessa forma, utilizou-se a Eq. (17) como método de discretização para se obter as leis adaptativas do MG e do MMQR no tempo discreto. A Eq. (11) do MG foi discretizada e expressada como:

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) - \gamma \frac{T\phi(k)E_1(k)}{1 + \phi(k)\phi^T(k)} \quad (18)$$

Da mesma forma foi aplicado o Método de Euler para discretizar as derivadas do MMQR, a forma discreta da Eq. (13) da forma:

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) - \mathbf{P}(k) \frac{T\phi(k)E_1(k)}{1 + \phi(k)\phi^T(k)} \quad (19)$$

sendo que a matriz de covariância no tempo discreto  $\mathbf{P}(k)$  discretizada e reescrita por:

$$\mathbf{P}(k+1) = \mathbf{P}(k) - \frac{\mathbf{P}(k)\phi(k)\phi^T(k)\mathbf{P}(k)}{1 + \phi(k)\phi^T(k)} \quad (20)$$

## MODELO DE MOTOR CC

Para validar os algoritmos estudados no decorrer desse artigo, foi escolhida uma planta de segunda ordem de um servomotor de corrente contínua. O motor de corrente contínua é constituído de uma armadura e enrolamentos de campo. Para modelar o motor CC foi feita a aproximação segundo um circuito equivalente, que descreve os componentes de armadura do motor. Esse circuito equivalente é representado na Figura 2.

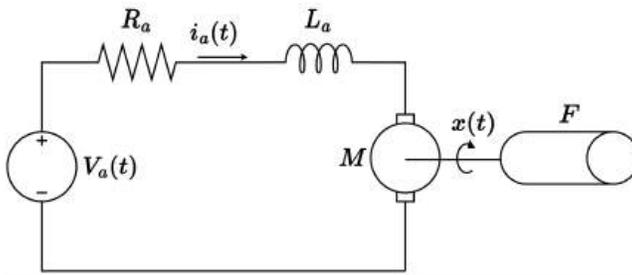


Figura 2 - Circuito Equivalente do Modelo do Motor CC

Fonte: Adaptado de (CANAL; VALDIERO; REIMBOLD, 2017).

A planta foi modelada com base nos parâmetros elétricos resistência, tensão, corrente e indutância de armadura,  $R_a$ ,  $V_a(t)$ ,  $i_a(t)$  e  $L_a$  respectivamente, e parâmetros mecânicos e eletromecânicos, como o motor CC  $M$  e os valores de energia mecânica  $F$  e a

velocidade angular  $x(t)$  (CANAL; VALDIERO; REIMBOLD, 2017).

O modelo representado na Figura 2 foi descrito a partir da equação do movimento, da forma:

$$F \frac{dx}{dt} = -bx(t) + T_F \quad (21)$$

sendo  $T_F = k_f \cdot i_a$ , com  $k_f$  representado como a constante de proporcionalidade de força, e  $b$  o torque em  $N \cdot m$ , reescreveu-se a Eq. (21) como:

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{b}{F}x(t) + \frac{k_f}{F}i_a \quad (22)$$

Assim, analisou-se o circuito elétrico através do somatório das tensões da Figura 2, dessa forma obteve-se a seguinte equação de malha:

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + V_M - V_a = 0 \quad (23)$$

sendo  $V_M = k_e \cdot x(t)$ , que corresponde a tensão eletromotriz do motor CC.

A Eq. (23) foi reescrita em função da derivada da corrente de armadura do motor, na forma:

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R_a}{L_a}i_a(t) - \frac{k_e}{L_a}x(t) + \frac{1}{L_a}V_a \quad (24)$$

Portanto, o modelo utilizado em espaço de estados das Eq. (22) e (24), pode ser reescrito da forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{i}_a(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -b/F & k_f/F \\ -k_e/L_a & -R_a/L_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/L_a \end{bmatrix} \cdot V_a \quad (25)$$

sendo  $k_f = k_e = k$ .

Para o modelo, projetaram-se duas versões de um controlador MRAC, um que utiliza o MG e o outro MMQR, como leis de adaptação.

## RESULTADOS

Com o modelo de servomotor CC descrito em espaços de estados pela Eq. (25), adotaram-se os seguintes parâmetros variantes no tempo para validação dos algoritmos de adaptação paramétrica, conforme a Tabela 1:

tempo [s]	$F [Kg \cdot m^2/s^2]$	$b [N \cdot m]$	$k$	$R_a [\Omega]$	$L_a [H]$	$V_a [V]$
$0 < t < 400$	0,01	0,1	0,01	1	0,5	12
$t \geq 400$	0,01	0,1	0,01	1	1	9

Tabela 1 - Parâmetros Variantes no Modelo de Motor CC

Fonte: Autoria Própria (2022).

Realizou-se a implementação de ambos os modelos no ambiente MATLAB®, com a finalidade de se controlar a velocidade angular  $x(t)$  do motor CC.

Os modelos foram convertidos em uma função de transferência e em seguida discretizados para simulação. Para o projeto de um MRAC não é necessário o conhecimento dos parâmetros da planta, sendo estes utilizados apenas com a finalidade de gerar a simulação.

Para o modelo de referência  $F_m(s)$  foi adotado uma função de transferência de segunda ordem de forma que seja possível obter uma saída com 7% de percentual de sobressinal e 3 segundos de tempo de subida, dessa forma o modelo de referência no domínio  $s$ :

$$F_m(s) = \frac{1,882}{s^2 + 1,773s + 1,882} \quad (26)$$

## SIMULAÇÃO DO MRAC-MG

Para o MRAC com a lei adaptativa do MG representada no tempo discreto pela Eq. (18). Foi escolhido um fator de ganho adaptativo  $\gamma=25$  e uma taxa de amostragem de  $T=0,01$  s, valor este selecionado através de uma bateria de testes em busca de um fator de ganho suficiente para que a saída se aproxime rapidamente do modelo de referência adotado.

Na Figura 3, ilustra-se em (a) a relação entre o sinal de referência  $r(t)$  e o modelo de referência  $y_m(t)$  da Eq. (26), (b) a evolução dos parâmetros  $\hat{\theta}(t)$  do controlador no tempo e (c) a saída controlada da planta  $y(t)$  em malha fechada com o MRAC-MG.

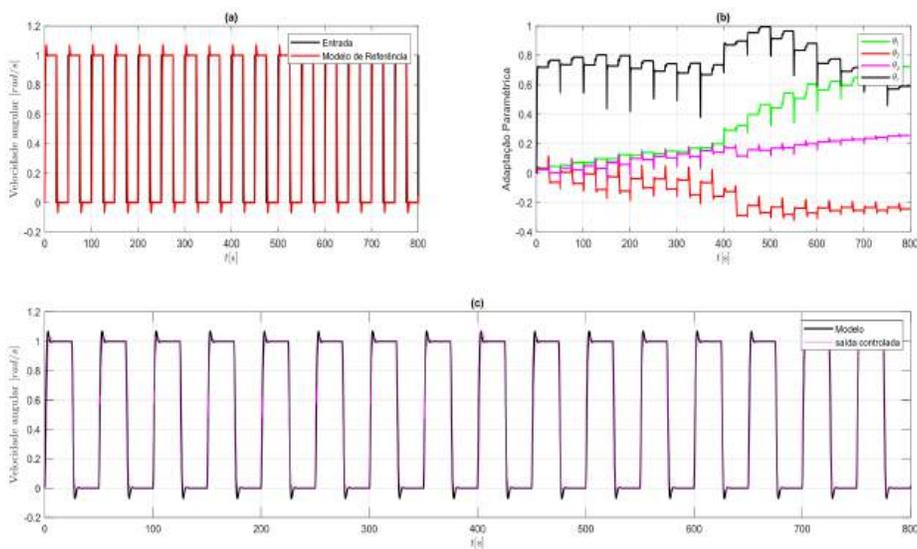


Figura 3 - Desempenho conforme a Lei Adaptativa do Gradiente

Fonte: Autoria Própria (2022).

Foi analisado o custo computacional na execução do laço recursivo na simulação de ambos os controladores, para um total de 500.000 pontos, a execução da simulação do MRAC com a lei adaptativa do MG demorou cerca de 1,6056 segundos.

## SIMULAÇÃO DO MRAC-MMQR

Para o projeto do MRAC baseado na lei adaptativa do MMQR, representado na forma discreta pela Eq. (19) e a matriz de covariância  $\mathbf{P}$ , implementou-se no tempo discreto conforme a Eq. (20), com inicialização da forma  $\mathbf{P}(0)=P_0\mathbf{I}$  com  $P_0=100$ . O valor de  $P_0$  define a velocidade em que os parâmetros do controlador serão ajustados e foi escolhido com base em uma bateria de testes de desempenho.

Na Figura 4, ilustrou-se em (a) a relação entre o sinal de referência  $r(t)$  e o modelo de referência  $y_m(t)$  da Eq. (26), (b) a evolução dos parâmetros  $\hat{\theta}(t)$  do controlador no tempo e (c) a saída controlada da planta  $y(t)$  em malha fechada com o MRAC-MQR.

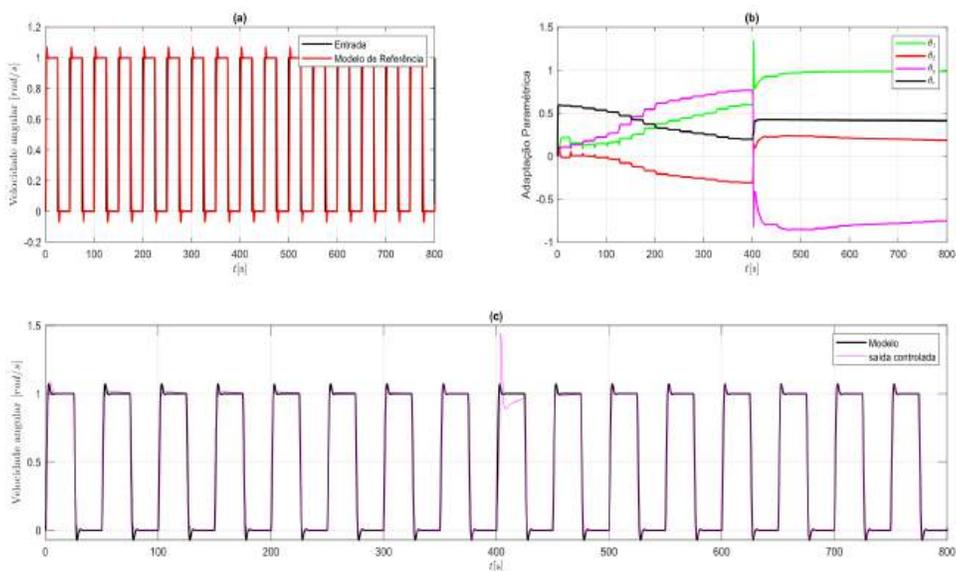


Figura 4 - Desempenho conforme a lei adaptativa MQR

Fonte: Autoria Própria (2022).

A simulação do MRAC com a lei adaptativa do MMQR teve um tempo de execução de cerca de 7,6615 segundos.

## CONCLUSÃO

No presente trabalho foram (i) implementados os algoritmos matemáticos do MG e do MMQR como mecanismo de adaptação do MRAC, e (ii) comparados com o uso do ambiente MATLAB®. A validação dos códigos ocorreu com a (iii) modelagem de um

servomotor CC, que foi utilizado como planta de parâmetros variantes para demonstrar o desempenho dos controladores projetados.

Com base nos resultados obtidos, notou-se que o MRAC-MG possui menor custo computacional, conseqüentemente menor tempo de execução, no entanto, o controlador demorou mais tempo para alcançar o modelo de referência estabelecido, em que esse apresentou uma adaptação de parâmetros com oscilação.

A lei adaptativa do MMQR, por outro lado, demandou maior tempo de execução, mas possui um desempenho menos oscilatório, quando comparado ao MRAC-MG. A inicialização da matriz de covariância com um número elevado implicou em uma maior velocidade de adaptação paramétrica. Dessa forma, essa lei adaptativa alcançou um resultado mais preciso em relação ao modelo de referência, com maior velocidade de adaptação e uma curva de adaptação de parâmetros mais suave.

Ambos os controladores projetados obtiveram bom desempenho quanto a alteração nos parâmetros da planta, dessa forma, constatou-se a eficácia do controle adaptativo ao ser submetido a processos variantes no tempo.

Em trabalhos futuros espera-se que seja possível implementar os algoritmos, nestes apresentados e simulados, em um microcontrolador ou sistema embarcado e implementados em uma planta real com parâmetros variantes reais.

## AGRADECIMENTOS

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela estrutura e licenças de *software* que permitiu a devida execução do presente artigo.

Ao Prof. Dr. Flávio Luiz Rossini pela orientação na presente pesquisa e pelo conhecimento compartilhado.

Ao Prof. Dr. Leandro Castilho Brolin pelo apoio e compreensão durante a execução desta pesquisa.

## CONFLITO DE INTERESSE

Não há conflito de interesse.

## REFERÊNCIAS

AGUIRRE, L. A. **Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares**. [S.l.]: Editora UFMG – 3ª Edição, 2007.

ÅSTRÖM, K. J., WITTENMARK, B. **Adaptive Control**, Second Edition. Addison-Wesley, 1995.

CANAL, I. P., VALDIERO, A. C., REIMBOLD, M. M. P.; **Modelagem Matemática de Motor de Corrente Contínua e Análise Dinâmica**. Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics, Vol. 5, N. 1. 2017.

GARCIA, C.; **Controle de Processos Industriais: Estratégias Modernas** (Volume 2). Blucher; 1ª edição. 1 de dezembro 2019. 245-276.

GREGORY, P.; **Self adaptive flight control**. Flight Control Symposium. 1959.

IOANNOU, P. A.; SUN, J. **Robust Adaptive Control**. Editado por PTR Prentice-Hall. 1996.

LANDAU, I. D.; LOZANO, R.; MŠSAAD, M.; KARIMI, A. **Adaptive control: algorithms, analysis and applications**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011.

ROSSINI, Flávio Luiz. **Métodos de Filtragem, Estimação e Controle Adaptativo Indireto Aplicados a Sistemas de Teleoperação Bilateral**. pt. PhD thesis. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação—Universidade Estadual de Campinas, 2020.

WHITAKER, H. P., YAMRON, J., KEZER, A.; **Design of model-reference adaptive control systems for aircraft**. Massachusetts Institute of Technology, Instrumentation Laboratory. 1958.

# A INFLUÊNCIA DA TENSÃO ELÉTRICA NA QUALIDADE DA SOLDA A ARCO SUBMERSO EM CHAPAS FINAS

*Data de submissão: 08/09/2022*

*Data de aceite: 01/11/2022*

### **Júlio Cezar Pedrosa da Silva**

IFG / Goiânia

<http://lattes.cnpq.br/7453077878804679>

### **Gustavo de Castro Lopes**

IFG / Goiânia

<http://lattes.cnpq.br/2398384294256166>

### **Matheus Abrão Abdala**

IFG / Goiânia

<http://lattes.cnpq.br/3136667891323073>

### **Aldemi Coelho de Lima**

IFG / Goiânia

<http://lattes.cnpq.br/7292226429014604>

### **Ildeu Lúcio Siqueira**

IFG / Goiânia

<http://lattes.cnpq.br/4582663864916718>

**RESUMO:** Este trabalho consiste na análise da qualidade da solda entre chapas finas, realizada pelo processo de soldagem a arco submerso, com a utilização de diferentes parâmetros elétricos, com o objetivo de observar a influência desses parâmetros durante o processo, que é utilizado em larga escala na fabricação e manutenção de peças, equipamentos e estruturas. Para isso, foram feitas soldas em chapas finas de

6 mm utilizando-se cinco diferentes faixas de corrente elétrica pré-estabelecidas; além disso, as peças soldadas foram examinadas em ensaio não-destrutivo pelo método de partícula magnética para que fosse possível verificar os defeitos na região da solda. Foi observada uma forte relação entre a faixa de corrente elétrica de trabalho, a qualidade superficial da solda e a facilidade de manuseio do equipamento; correntes mais baixas (até 300 A) possibilitaram um melhor manuseio, acarretando também uma melhor qualidade superficial da peça; já as correntes mais intensas (400 A ou mais) apresentaram difícil manuseio, alta penetração e, portanto, apresentaram defeitos de solda mais nítidos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Arco submerso, Chapas finas, Qualidade da Solda, partícula magnética

### THE INFLUENCE OF ELECTRICAL VOLTAGE ON THE QUALITY OF SUBMERGED ARC WELDING IN THIN SHEETS

**ABSTRACT:** This work aims to analyze the quality of the weld between thin plates, by

the submerged arc welding process, using different electrical parameters, in order to observe the influence of these parameters during the process, which is used in large scale in the manufacture and maintenance of equipments and structures. For this purpose, the welds were made on thin 6 mm plates using five different electrical current ranges pre-established; in addition, the welded parts were examined in a non-destructive test by the magnetic particle method so that it was possible to check for possible defects in the weld region. A strong relationship was observed between the electric current working range, the surface quality of the weld and the ease of handling the equipment; lower currents (until 300 A) enabled better handling, also leading to better quality surface of the piece; the more intense currents (400 A or more) were difficult to handle, high penetration and therefore showed clearer weld defects.

**KEYWORDS:** Submerged Arc Welding , Thin Sheets, Weld Quality, Magnetic Particle

## INTRODUÇÃO

O presente projeto tem como finalidade o desenvolvimento de pesquisa voltada para a área de soldagem a arco submerso, tendo em vista a vasta aplicação do processo e a pouca produção científica do mesmo. Existem alguns processos de soldagem como eletrodo revestido, MIG (Metal Inert Gas), TIG (Tungsten Inert Gas), mas pouco se abordam, tanto nas literaturas quanto em artigos, sobre o processo de arco submerso, apesar de o mesmo apresentar maior taxa de deposição de metal que as demais e seus cordões de solda apresentam melhor qualidade superficial. Dos poucos trabalhos relacionados a esse processo, destacam-se [Jorge et al. 2015] que realizou um estudo das propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas de aço carbono obtidas pelo processo a arco submerso, visando o aumento da produtividade na fabricação de tubulações para equipamentos de ancoragem. Pode-se destacar também o trabalho de [Pardal et al. 2011], que apresentou os resultados da caracterização e avaliação da resistência à corrosão de uma junta soldada correspondente a uma tubulação de aço inoxidável duplex (AID) UNS S31803 de 35 mm de espessura de parede soldada pelos processos de soldagem TIG (GTAW) na raiz e arco submerso (SAW) no enchimento e acabamento.

O processo de soldagem a arco submerso é vastamente utilizado em peças de elevada espessura, como por exemplo na construção naval, possuindo um cordão de solda com excelente qualidade superficial [Borba et al. 2015]. Esse fator torna o arco submerso um processo bastante versátil e interessante. Assim, torna-se bastante útil o conhecimento dos parâmetros que afetam a qualidade do cordão de solda, analisando diferentes tensões e correntes de trabalho, ocorrendo uma possível formação de defeitos. Desta forma, foram realizados cordões de solda, utilizando o processo a arco submerso, variando esses parâmetros e posteriormente foi avaliada a qualidade da solda através de ensaio não-destrutivo.

Esse processo é vastamente utilizado em peças de elevada espessura e possui um cordão de solda com excelente qualidade superficial. Esse fator torna o arco submerso um processo bastante versátil e interessante.

Assim, torna-se bastante útil o conhecimento dos parâmetros que afetam a qualidade

do cordão de solda, analisando diferentes tensões e correntes de trabalho, ocorrendo uma possível formação de defeitos. Desta forma, foram realizados cordões de solda, utilizando o processo a arco submerso, variando esses parâmetros e posteriormente foi avaliada a qualidade da solda através de ensaios não-destrutivos.

## **OBJETIVO GERAL**

Analisar a qualidade da solda a arco submerso em diferentes tensões, aplicado em chapas finas, utilizando ensaios não-destrutivos.

### **Objetivos específicos**

- Realizar um estudo bibliográfico;
- efetuar o corte das chapas para fazer a soldagem;
- executar a soldagem variando corrente elétrica;
- inspecionar a qualidade de solda utilizando o ensaio por partículas magnéticas.

## **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

No processo de soldagem por arco submerso, o calor necessário para a fusão do material é gerado por um arco elétrico que é formado entre a peça de trabalho e o final do consumível, no qual ambos estão cobertos por uma camada de fluxo granular. Portanto, o arco fica coberto e escondido, não produzindo radiação visível (Fortes, 2004).

Durante a soldagem, o calor produzido pelo arco elétrico funde uma parte do fluxo juntamente com a ponta do eletrodo. A zona de soldagem fica sempre envolta e protegida pelo fluxo escorificante, sobrepondo-se ainda por uma camada de fluxo não fundido. O eletrodo permanece um pouco acima do metal-base e o arco elétrico se desenvolve nesta posição. Com o deslocamento do eletrodo ao longo da junta, o fluxo fundido separa-se do metal de solda líquida na forma de escória. O metal de solda possui um ponto de fusão mais elevado que a escória e então solidifica-se enquanto esta ainda permanece fundida, protegendo o metal de solda recém solidificado, que é muito reativo com oxigênio e nitrogênio da atmosfera. Com o resfriamento posterior remove-se o fluxo não fundido, e a escória rapidamente se destaca do metal de solda (BRANDI; WAINER; MELLO, 1992). O esquema básico do funcionamento está ilustrado na Figura 1.

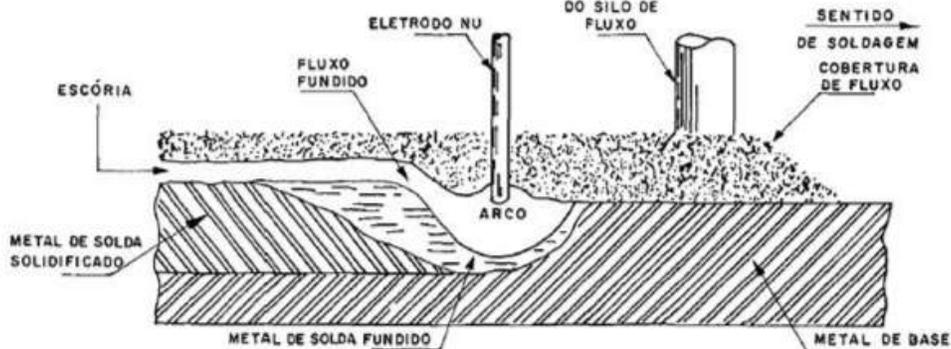


Figura 1 – Funcionamento do processo de soldagem com arco submerso

Os eletrodos utilizados no arco submerso são normalmente revestidos de cobre, visando evitar oxidações superficiais durante seu armazenamento. Eles são fabricados em faixas de composição química especificadas e trefiladas até os diâmetros desejados. É um processo que fornece elevado rendimento, pois não há perdas de metal por projeção. Soldas feitas por arco submerso apresentam boa ductilidade e tenacidade ao impacto, além de boa uniformidade e acabamento na aparência dos cordões de solda. As propriedades mecânicas na solda são compatíveis as do metal de base utilizado, além disso o processo possui elevada taxa de deposição.

A soldagem a arco submerso possui como vantagens a elevada velocidade de soldagem; alta taxa de deposição; boa integridade do metal de solda; processo de fácil manuseio sem emissão de faíscas, respingos e fumos; melhor ambiente de trabalho e maior segurança para o soldador; produção de uma boa escória, que protege de impurezas e de fácil retirada. Entretanto possui limitações como a posição de soldagem, possível somente para posição plana e horizontal, e limitação em relação ao tipo de junta, sendo possível trabalhar somente com juntas em linha. A Figura 2 apresenta os componentes básicos do equipamento de soldagem com arco submerso.

Para realizar a inspeção da qualidade da solda obtida, realiza-se ensaios não-destrutivos. Dentre esses métodos não destrutivos pode-se destacar dois: partícula magnética e líquido penetrante.

Para realizar a inspeção da qualidade da solda obtida, realizou-se o ensaio não-destrutivo por partícula magnética. Esse ensaio consiste em submeter a peça a um campo magnético. As discontinuidades existentes na peça, isto é, os defeitos, irão causar um campo de fuga do fluxo magnético existente na peça. As partículas magnéticas serão atraídas, devido ao surgimento de polos magnéticos e ficarão aglomeradas na região que houver uma discontinuidade. A aglomeração indicará o contorno do campo de fuga, fornecendo a visualização do formato e da extensão do defeito presente [Andreucci 2009].

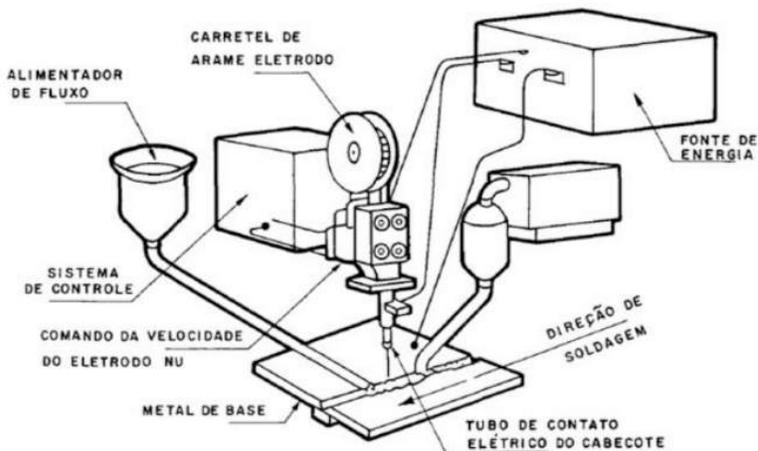


Figura 2 – Equipamentos de Soldagem Arco Submerso

## METODOLOGIA

Para a realização desse trabalho, foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- Chapa de aço com espessura de 6 mm;
- equipamento de soldagem a arco submerso;
- equipamento para o ensaio de partícula magnética;
- equipamento para o ensaio de líquido penetrante

Primeiramente realizou-se uma sequência de testes na máquina de soldagem a arco submerso (Figura 3) para definição exata dos parâmetros (corrente elétrica e tensão). Em seguida, foram selecionadas algumas chapas de espessura de 6 mm e depois utilizou-se uma serra alternativa para cortá-las pela metade, obtendo chapas de comprimento menores, conforme Figura 4. Posteriormente, partiu-se para a soldagem a arco submerso.

O processo de soldagem foi realizado utilizando um único carretel de arame como eletrodo, entretanto variou-se a corrente de trabalho na faixa de 200 ampères a 600 ampères. O avanço da mesa foi feito de forma manual através da manivela, contudo a velocidade de avanço foi mantida constante para todos os cordões de solda. Em seguida, os cordões de solda foram analisados por ensaios não-destrutivos de partícula magnética e líquido penetrante.

Para realizar o ensaio de partícula magnética, selecionaram-se o equipamento e as peças com os cordões de solda. Em seguida, para cada chapa, aplicou-se o fluido com as partículas magnéticas no cordão de solda e então utilizou-se o um aparelho para magnetizar a chapa. Por fim, utilizou-se uma luz negra para visualizar as descontinuidades presentes em cada peça e então registrou-se por foto o resultado realizado em cada peça.



Figura 3 – Máquina de soldagem a arco submerso



Figura 4 – Chapas de 6 mm para realizar a soldagem

## RESULTADOS

A partir da sequência de testes realizada na máquina de soldagem a arco submerso, foi possível obter um melhor controle nos parâmetros elétricos do equipamento, conforme Tabela 1.

Potenciômetro [%]	Corrente [A]	Tensão [V]
26	200	40
40	300	38
52	400	34
70	500	32
>80	600	32

Tabela 1: Relação dos parâmetros da máquina de soldagem a arco submerso

De acordo com a metodologia aplicada, foi possível realizar o processo de soldagem na faixa de corrente desejada, conforme ilustram as Figuras 5 a 9. Na Figura 5, pode se observar que houve uma soldagem contínua; no entanto, nem toda a peça apresentou penetração completa, se manifestando apenas no final da peça. Esse perfil de solda pode apresentar alguns problemas quando a peça for submetida a ensaios de tração ou outro esforço mecânico. Em síntese, pode ser inferido que, mesmo para essa pequena espessura, é inviável a utilização da soldagem a arco submerso nessas condições.



Figura 5 – Soldagem na chapa 200 A –

A Figura 6 mostra a soldagem realizada com uma corrente de 300 A. Não houve uma penetração total nas amostras realizadas a essas condições, no entanto, o cordão apresentou um aspecto visual extremamente interessante: é possível verificar que não existem bolhas superficiais na peça; ter uma escória cheia de bolhas, mas exibindo um cordão perfeitamente executado, sem nenhum defeito nítido, proporciona um aspecto visual muito positivo e uniforme. Esse cordão apresenta uma melhora com relação ao anterior, em termos de continuidade e de homogeneidade, seja visual, superficial ou mesmo de penetração nas amostras.

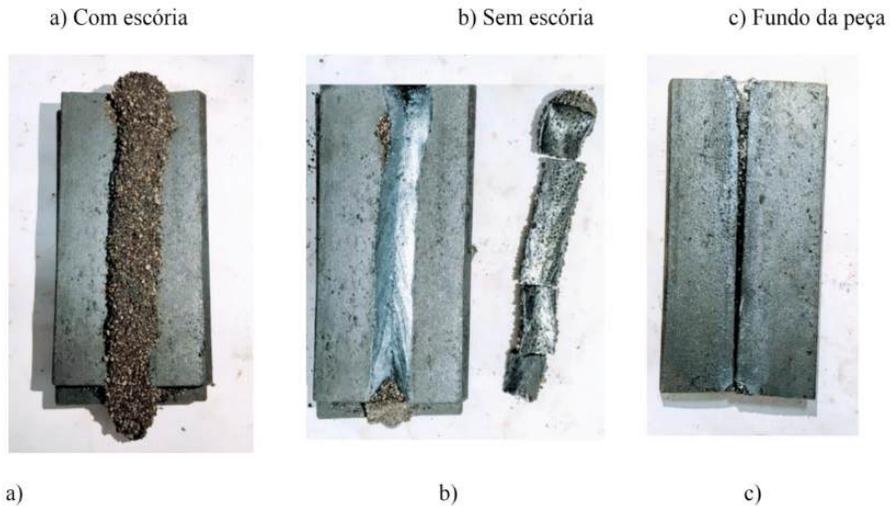


Figura 6 – Soldagem na chapa 300 A –

A Figura 7 apresenta a soldagem realizada com corrente de 400 A. Nesta etapa, observou-se uma descontinuidade mais nítida do cordão. Apesar de ter-se obtido uma penetração quase completa, o aspecto do cordão é visivelmente descontínuo, deslocado, até malfeito; essa descontinuidade se deu, em parte, pois a peça se moveu um pouco sobre a mesa, em função da alta taxa de energia envolvida no processo. Contudo, verificou-se uma peça mais heterogênea que as anteriores, mas com defeitos superficiais e de penetração.

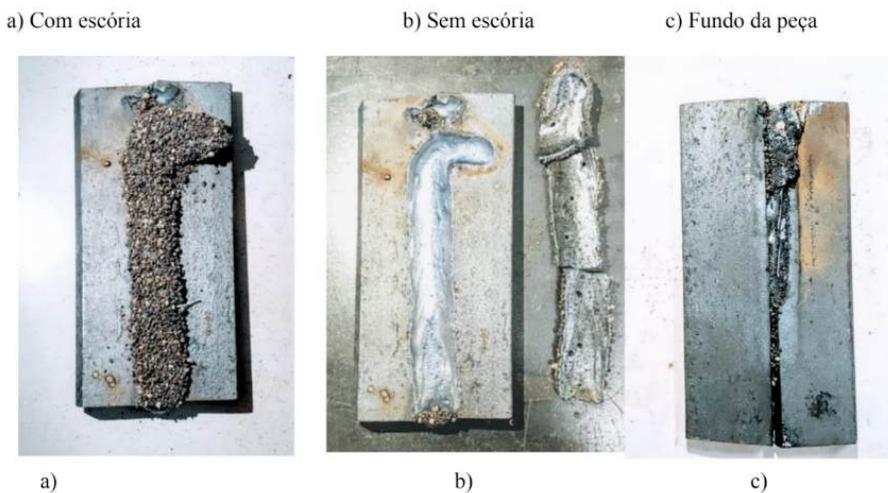


Figura 7 – Soldagem na chapa 400 A –

A Figura 8 exibe a soldagem realizada com corrente de 500 A. Essa etapa apre-

sentou a pior qualidade de solda entre todas as realizadas. É visível que em todos os testes realizados nessas condições há uma grande descontinuidade no processo, o que vai contra qualquer definição de soldagem, assim como qualquer possível aplicação de uma peça nessas condições, sejam elas ornamentais ou estruturais. Portanto, conclui-se que, nessas condições, a soldagem de uma chapa fina se torna completamente inviável e indesejável; houve uma completa penetração visual, mas esta não compensa a falta de homogeneidade apresentada ao longo do cordão de solda.

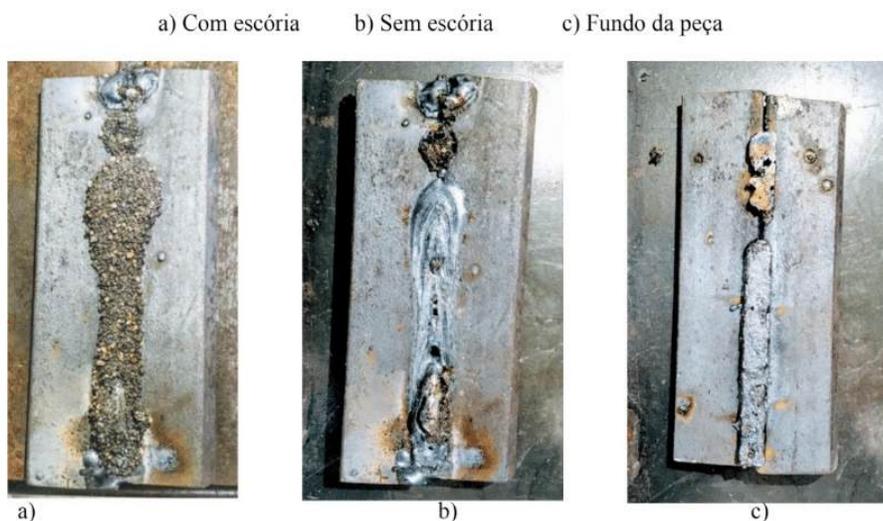


Figura 8 – Soldagem na chapa 500 A –

A Figura 9 apresenta uma das amostras para condição de corrente de 600 A. Embora a peça se apresente visualmente melhor que a anterior, a peça também apresenta heterogeneidade visual muito acentuada, com presença de grandes bolhas na parte inferior da peça, uma grande descontinuidade do cordão sendo interrompido nas extremidades de forma natural porém desordeira, uma penetração completa porém que não parece acrescentar muito a peça além de deformações.



Figura 9 – Soldagem na chapa 600 A –

Após a análise visual, percebe-se que os cordões realizados a 300 A apresentam maior qualidade que os demais; no entanto, para uma verificação mais completa, foi realizado um ensaio não-destrutivo em cada uma das peças, que visa exibir os defeitos internos ao cordão de solda. Os resultados obtidos são mostrados em seguida, a partir do ensaio de partícula magnética, conforme as Figuras 10 a 14.

Na Figura 10 vemos que foi formada uma pequena região de mordedura, um defeito que costuma ser ocasionado pela alta energia utilizada em uma peça de espessura muito pequena. Algumas bolhas podem ser vistas, assim como uma trinca na parte inferior, bem discreta. Com o ensaio de partícula magnética pode-se observar que, apesar dos citados, não há grandes defeitos na peça, superficiais ou subsuperficiais.



Figura 10 – Ensaio por partícula magnética na chapa 200 A

Na Figura 11 percebe-se o aumento das mordeduras nas laterais dos cordões de solda, além do aumento considerável da zona termicamente afetada; ambos ocorridos já

eram esperados, devido ao aumento da corrente, e, conseqüentemente, da energia de soldagem. A peça da direita apresenta uma região central mais funda e com menos reforço que o restante da peça, além da presença de uma trinca. A solda feita a 400 A, exibida abaixo na Figura 12, apresentou poucos defeitos, sendo bem superior às demais. Conforme esperado, a peça apresentou mais mordeduras que as anteriores e um aumento da zona termicamente afetada. Também foi observada uma série de bolhas que, apesar de pouco expressivas, são uma falha em larga escala, além de observar-se reforço reduzido no final do cordão de solda. A peça apresenta heterogeneidade visual, porém não apresenta trinca visual certa, como nos casos anteriores.

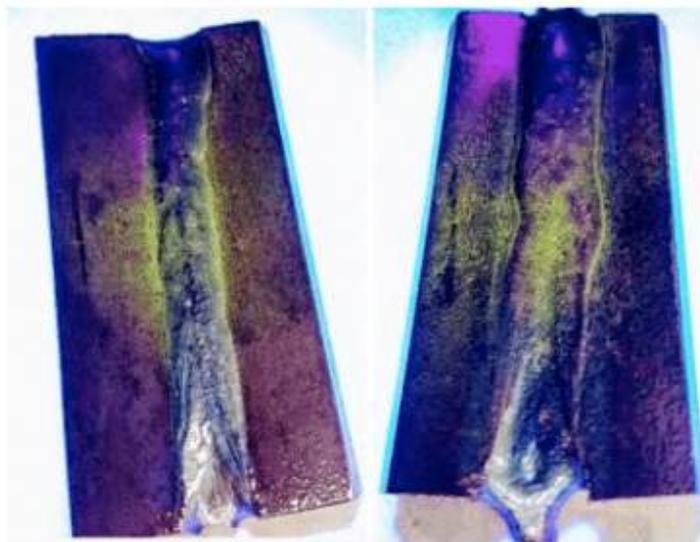


Figura 11 – Ensaio por partícula magnética na chapa 300 A



Figura 12 – Ensaio por partícula magnética na chapa 400 A

As Figuras 13 e 14 apresentam os resultados para as soldagens de 500 A e 600 A, respectivamente; estas etapas apresentaram condições bem parecidas de soldagem, e

isso se refletiu nos resultados, também bem semelhantes.

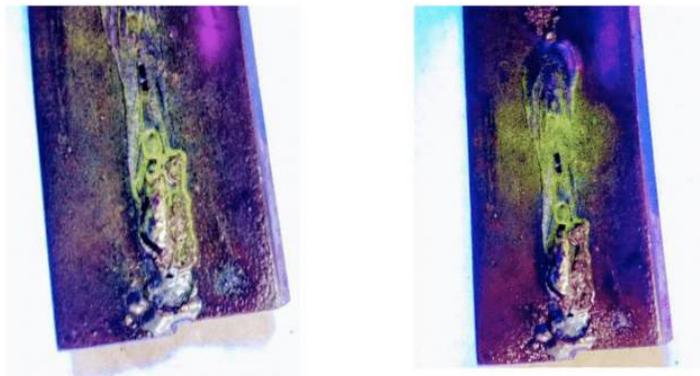


Figura 13 – Ensaio por partícula magnética na chapa 500 A



Figura 14 – Ensaio por partícula magnética na chapa 600 A

Como pode ser visto nas Figuras 13 e 14, as duas condições de soldagem geraram peças com grandes defeitos estruturais, como misturas bastante significativas e zonas termicamente afetadas que englobam quase toda a peça. Ambas apresentaram também poros bastante consideráveis, assim como trincas ao longo da peça.

Essas últimas condições apresentam descontinuidades sérias para a soldagem, o que as torna, indesejáveis e completamente inviáveis, além de proporcionarem uma perfuração na chapa, que só não foi mais contínua e acentuada devido a existência de cobrejunta, que permitiu continuidade sem perfuração da peça. No entanto, deve-se salientar que, a partir de 400 A, mostrou-se uma grande dificuldade de realizar a solda, grudando-se a peça na cobre-junta, que só saiu com aplicação de esforço manual bem ríspido e agressivo, auxiliada por ferramentas.

## CONCLUSÃO

Observou-se que na soldagem a arco submerso a qualidade superficial do cordão de solda depende da faixa de corrente de trabalho. As soldas realizadas com corrente elétrica até 300 A resultaram em melhor facilidade de operação do processo, além de qualidade superficial superior em relação às correntes maiores (400 A - 600 A). Ademais, não houve penetração total nos procedimentos realizados com as correntes de 200 A e 300 A.

O processo de soldagem foi mais difícil em correntes a partir de 400 A, as chapas sofriam um impacto inicial da abertura do arco e deslocavam-se durante a soldagem, prejudicando a continuidade do processo, a qualidade superficial do cordão de solda e comprometendo a posição do cordão de solda. Além disso, iniciou-se, nessa faixa de corrente, a penetração total da solda em partes do cordão, chegando em alguns casos a perfurar parte da chapa, como ocorreu no procedimento realizado a 600 A.

## REFERÊNCIAS

Andreucci, R. (2009). Ensaio por partículas magnéticas. Editora Associação Brasileira De Ensaaios Não Destrutivos e Inspeção. São Paulo.

Borba, T. M. D., Flores, W. D., Turani, L. d. O., and Cardoso Junior, R. (2015). Avaliação da soldabilidade do aço naval eh36 tmcp soldado por arco submerso com elevado aporte de calor. *Soldagem & Inspeção*, 20(1):92–104.

Fortes, C. (2004). ESAB - Processos de Soldagem: Arco Submerso. Disponível em: <<https://www.esab.com.br>>

Jorge, J. C. F., Souza, L. F. G. d., Marouco, E. d. S., Santos Filho, O. R. d., and Diniz, J. L. C. (2015). Propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas pelo processo a arco submerso com elevado aporte térmico. *Soldagem & Inspeção*, 20(3):347–358.

Pardal, J. M., Souza, G. C. d., Tavares, S. S. M., Fonseca, M. d. P. C., Ferreira, M. L. R., Martins, L. M., and Samra Filho, O. A. (2011). Caracterização e avaliação da resistência à corrosão na soldagem de tubulação de aço inoxidável duplex uns s31803 pelo processo a arco submerso. *Soldagem & Inspeção*, 16(4):310–321.

Wainer, E., Brandi, S. D., and de Mello, F. D. H. (1992). *Soldagem: processos e metalurgia*. Editora Blucher.

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

*Data de aceite: 01/11/2022*

### **Berthiê de Castro Furtado**

Instituto Federal de Educação Ciência e  
Tecnologia de Goiás  
Goiânia, Brasil

### **Aylton José Alves**

Instituto Federal de Educação Ciência e  
Tecnologia de Goiás  
Goiânia, Brasil

### **André Mendes Martins**

Centro Universitário Araguaia Goiânia,  
Brasil

### **José Luis Domingos**

Instituto Federal de Educação Ciência e  
Tecnologia de Goiás  
Goiânia, Brasil

**RESUMO:** Este trabalho apresenta a análise da qualidade de energia elétrica antes e após a eficiência de um sistema de iluminação. Neste estudo de caso é utilizado o método para análise dos parâmetros de qualidade de energia em consonância com os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST) e a Norma IEC 61.000-4-30. Para realizar as medições utilizou-se um analisador de energia, instalado no

primário dos transformadores, na coleta de dados antes da eficiência do sistema de iluminação. Após o *retrofit* da iluminação o instrumento foi instalado no secundário dos transformadores. Nas medições realizadas antes da implantação do projeto de eficiência energética, os parâmetros de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) mostraram-se dentro dos limites estabelecidos. Nas medições realizadas após a eficiência do sistema de iluminação, observa-se que o comportamento do nível da tensão em regime permanente apresenta algumas oscilações, porém os valores mantiveram dentro da faixa de tensão adequada. Com relação ao fator de potência, identifica-se que os resultados estão dentro dos limites estabelecidos. Todavia, nota-se que algumas amostras apresentam valores abaixo do estabelecidos, porém não comprometendo. Quanto à frequência, identifica-se pouca variação durante o período da medição, porém com valores sempre na faixa permitida para as condições normais de operação. As amostras das distorções harmônicas total e individuais de tensão apresentam valores dentro dos limites estabelecidos e quanto

ao desequilíbrio de tensão, as medições apresentam abaixo do limite máximo permitido, que é igual a 3%. Portanto constata-se que os resultados atendem aos critérios estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST e a Norma IEC 61.000-4-30, e serve de referência para outros estudos que avaliam os efeitos da inserção de cargas não lineares nas instalações elétricas, em consumidores com características similares ao IFG.

**PALAVRAS-CHAVE:** Qualidade de energia. Retrofit de iluminação. Distorções harmônicas.

## 1 | INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um produto primordial para o desenvolvimento socioeconômico de um país e sua demanda é crescente e acelerada em todo o mundo. Esse crescimento é provocado principalmente pelo aumento populacional e pela dependência de tecnologias que necessitam de energia elétrica. Essa dependência gera uma necessidade cada vez maior por energia disponível, sobretudo a partir de fontes renováveis.

A necessidade de diminuir a dependência de combustíveis fósseis e a preferência por fontes de energia que não poluem têm levado à busca de novas fontes de energia para a geração de eletricidade [1].

Por outro lado, os sistemas de energias renováveis, como sistema fotovoltaico (SFV) e geração eólica, além de sistemas de iluminação através de lâmpadas fluorescentes compactas (CFL) e de lâmpadas com tecnologia de diodos emissores de luz (LED), dentre outras cargas, utilizam muitos dispositivos eletrônicos, que caracterizam por injetarem uma quantidade elevada de harmônicos na rede elétrica. Estes aspectos têm sido uma grande preocupação para consumidores e as concessionárias de energia elétrica, com relação à qualidade de energia [2] e [3].

Nesse contexto, é notória a preocupação com os aspectos da qualidade de energia elétrica, pois é um assunto importante no cenário energético nacional e internacional. Desse modo, motivado em identificar e mitigar os problemas causados pela má qualidade de energia, vários estudos mostram que os principais fenômenos que afetam a qualidade no sistema elétrico são: distorções harmônicas, desequilíbrio de cargas, baixo fator de potência, variação de frequência, dentre outros [4], [5] e [6].

Diante do exposto, esse estudo propõe realizar análise de qualidade de energia elétrica no IFG – Campus Goiânia, antes e após a eficiência do sistema de iluminação, o qual contempla a primeira fase do projeto de eficiência energética. Tais análises visam verificar se os resultados atendem aos critérios estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST e a Norma IEC 61.000-4-30.

## 2 | PARÂMETROS ELÉTRICOS PARA ANÁLISE

Para a análise da qualidade de energia serão observados os parâmetros elétricos descritos a seguir.

## A. Tensão em regime permanente

Cargas operando em uma tensão fora de limites aceitáveis, poderão afetar o seu funcionamento, reduzir a vida útil, dentre outros aspectos. Por esses motivos, a tensão deve ser mantida dentro dos limites aceitáveis e desta forma não comprometer o funcionamento correto dessas cargas [7].

Os valores de tensão obtidos por medições devem ser comparados a tensão de referência, a qual deve ser a tensão nominal ou a contratada, de acordo com o nível de tensão do ponto de conexão [8].

Para análise da tensão de atendimento em relação a faixa de tensão adequada, precária e crítica, utiliza-se a Tabela 1, onde estabelece os pontos de conexão em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV e a Tabela 2 para pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220 V).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Adequada	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Tabela 1 – Pontos de conexão em tensão nom. sup. a 1 kV e infer. a 69 kV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura TL (Volts)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399) / (202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350$ ou $399 < TL \leq 403)$ $(191 \leq TL < 202$ ou $231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331$ ou $TL > 403) / (TL < 191$ ou $TL > 233)$

Tabela 2 – Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220 V)

## B. Fator de Potência

O fator de potência pode ser definido como um indicador determinado pela relação entre a potência ativa e a potência aparente, consumidas por um equipamento, máquina, dentre outras cargas, desde que as formas de ondas de tensão e corrente sejam periódicas. Para a maioria dos sistemas elétricos, onde há presença de harmônicos, o fator de potência é expresso através da Equação (1), conforme segue [9] e [10]:

$$FP = \frac{\cos\phi_1}{\sqrt{1 + TDH_1^2}} \quad (1)$$

onde

FP é o fator de potência;

$\cos\phi_1$  é a relação entre potência ativa e a potência aparente da harmônica fundamental;

$TDH_1$  é a taxa de distorção harmônica de corrente.

O valor do fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo, para conexão entre distribuidora ou unidade consumidora que apresente tensão inferior a 230 kV [8].

### C. Distorção harmônica de tensão

As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental e a qualidade de energia pode ser afetada quando o sistema elétrico apresenta as referidas deformações [8].

O gerenciamento de harmônicos em um sistema de energia é considerado uma responsabilidade conjunta envolvendo tanto os usuários finais quanto os proprietários ou operadores do sistema e os limites harmônicos são recomendados para ambas as tensões e correntes [11].

Na análise da distorção harmônica de tensão são utilizados para quantificar a qualidade dos sinais: a distorção harmônica individual (DITh) e a distorção total de tensão (DTT). A distorção harmônica individual de tensão é obtida através da Equação (2) e utilizando a Equação (3) obtêm-se a distorção harmônica total de tensão [8], [11] e [12]:

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100 \quad (2)$$

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{m\acute{a}x}} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (3)$$

onde

$h$  é a ordem harmônica individual;

$h_{max}$  é a ordem harmônica máxima;

$V_h$  é a tensão harmônica de ordem  $h$ ;

$V_1$  é a tensão fundamental medida

Os limites das distorções harmônicas de tensão, são apresentados na Tabela 3, onde é especificado o percentil de conformidade de 95%, isto é, admite-se que os limites sejam ultrapassados em 5% das 1008 amostras coletadas ou 95% das amostras estão em conformidade.

Indicador	Tensão nominal (kV)		
	$V_N \leq 1$	$1 < V_N < 69$	$69 \leq V_N < 230$
Distorção harmônica total de tensão (DTT <sub>95%</sub> )	10,0%	8,0%	5,0%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 (DTT <sub>p95%</sub> )	2,5%	2,0%	1,0%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 (DTT <sub>i95%</sub> )	7,5%	6,0%	4,0%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 (DTT <sub>395%</sub> )	6,5%	5,0%	3,0%

Tabela 3 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

#### D. Desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico trifásico define-se como uma condição na qual as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo ou defasagem angular entre fases diferente de 120° elétricos ou, ainda, as duas condições [8].

O desequilíbrio de tensão é obtido através das Equações (4) e (5):

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (4)$$

sendo

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (5)$$

onde

FD é o fator de desequilíbrio de tensão;

$V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$  são as magnitudes das tensões eficazes de linha – frequência fundamental.

A Tabela 4 apresenta os limites para os desequilíbrios de tensão.

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n \leq 1,0$ kV	$1$ kV $< V_n < 230$ kV
FD <sub>95%</sub>	3,0 %	2,0 %

Tabela 4 – Limites para os desequilíbrios de tensão

## E. Variação de Frequência

A variação de frequência é justificada pelos frequentes desequilíbrios temporários que ocorre entre a geração e a demanda, implicando assim nas variações da velocidade de geradores e turbinas, que por princípio funcionam em sincronismo [9].

Em condições normais de operação e em regime permanente, as instalações de geração conectadas junto ao sistema de distribuição devem apresentar valores de frequência entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Com relação a questão da presença de distúrbio no sistema de distribuição, o tempo tolerável para que a geração retorne para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz deverá ser 30 (trinta) segundos [8].

## 3 | METODOLOGIA

Para a realização desse estudo foi escolhido o IFG Campus Goiânia haja vista ser um consumidor contemplado no Programa de Eficiência Energética - PEE da ENEL DISTRIBUIÇÃO GOIÁS. Em consonância com as Leis nº 9.991/2000, nº 13.203/2015 e nº 13.280/2016, esse programa é realizado anualmente e determina que as concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica devem aplicar, anualmente, a partir de abril 2016, o valor equivalente a 0,4% de sua receita operacional líquida anual no desenvolvimento de programas para o incremento da eficiência energética no uso final de energia elétrica, através de projetos executados em instalações de clientes e consumidores [13].

A primeira fase desse projeto contemplou parte do sistema de iluminação do IFG – Campus Goiânia, onde a antiga iluminação, composta por mais de 90% de lâmpadas fluorescentes tubulares, foram substituídas por lâmpadas LED tubulares. Para a realização da eficientização da iluminação, foi necessário instalar 5575 lâmpadas LED, conforme apresentado na Tabela 5 [14].

Descrição	Quantidade
Lâmpada LED tubular T8, 18 W	5258
Lâmpada LED tubular T8, 9 W	166
Lâmpada Bulbo, 10 W	107
Lâmpadas LED (3000 K) Dicroica 6 W	44
Total	5575

Tabela 5 – Descrição das lâmpadas instaladas.

Para analisar o comportamento dos indicadores de qualidade de energia nas instalações em qualquer ambiente em estudo, é necessário definir alguns parâmetros, conforme apresentados nas subseções A e B.

## A. Fenômenos da qualidade do produto analisados e pontos monitorados

Os fenômenos da qualidade do produto analisados são: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão e variação de frequência.

Os pontos de monitoramento selecionados são os secundários dos transformadores, que por sua vez, alimentam os quadros de distribuição das cargas. Recomenda-se também pontos de monitoramento no primário dos transformadores, especificamente do lado dos secundários do transformador de corrente – TC e transformador de potencial – TP, pois a alimentação no primário dos transformadores apresenta uma tensão de 13,8 kV ou 34,5 kV, inviabilizando a conexão do instrumento.

## B. Instrumentos e critério de medição

Nas medições são utilizados instrumentos e critério de medição em conformidade com as recomendações do Módulo 8 do PRODIST e a Norma IEC 61000-4-30, descritos a seguir [8] e [15]:

- os instrumentos devem operar de acordo com o princípio da amostragem digital;
- na medição de todos os fenômenos da qualidade do produto, utilizar um único instrumento;
- o conjunto de medições para gerar os indicadores da qualidade do produto deve apresentar um total de 1008 (mil e oito) leituras válidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada. As leituras eventualmente expurgadas são substituídas;
- o método de medição utilizado é de Classe A ou S, conforme norma vigente da IEC 61000-4-30.

A Figura 1 apresenta a instalação do instrumento de medição no secundário do transformador, com topologia de medição em estrela com neutro aterrado, abrangendo medições entre todas as fases, o neutro e o aterramento (proteção) fornecidos no ponto de conexão [8] e [16].

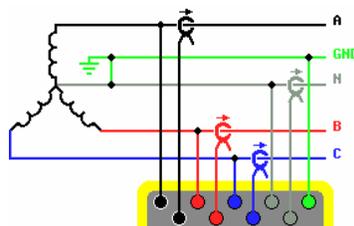


Figura 1 – Topologia de medição em estrela com neutro aterrado

Além da topologia em estrela com neutro aterrado, outras configurações poderão ser adotadas, conforme disposição do circuito.

## 4 | RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados das medições realizadas nos transformadores 1 e 2, com potência de 500 kVA e 225 kVA respectivamente, antes e após a efficientização do sistema de iluminação do IFG Campus Goiânia.

Antes da implementação do projeto de eficiência energética foi realizada a medição no PAC (Ponto de Acoplamento Comum) dos transformadores, isto é, no primário, especificamente junto a medição de faturamento, onde o analisador de energia foi conectado junto ao Transformador de Corrente – TC e ao Transformador de Potencial – TP.

As medições após a efficientização do sistema de iluminação foram realizadas nos secundários dos transformadores 1 e 2. Estava previsto a instalação do analisador de energia no ponto comum que alimenta os transformadores, junto a medição de faturamento, porém o local proposto apresentava lacre. Solicitou-se junto a ENEL DISTRIBUIÇÃO GOIÁS a liberação para efetuar as medições, entretanto o pedido foi negado, impossibilitando assim o monitoramento nesse ponto.

### A. Tensão em regime permanente

A partir das medições realizadas foram avaliados os níveis de tensão em regime permanente das tensões entre fase e fase ( $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  e  $V_{ca}$ ) no primário dos transformadores 1 e 2. Observa-se na Figura 2, que os valores de tensão durante o período de medição atingiram picos de até 14,159 kV e decréscimo de tensão igual a 13,520 kV, porém esses valores variaram dentro da faixa de tensão adequada, isto é, entre 12,834 kV a 14,490 kV, conforme a Tabela 1.

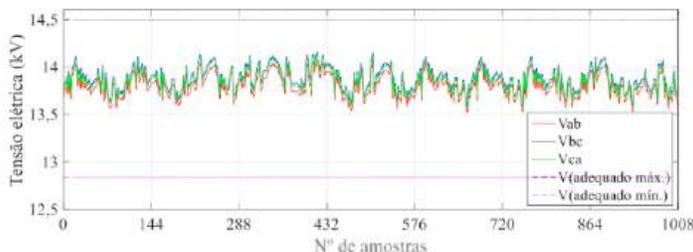


Fig. 2 – Tensão em regime permanente (transformadores 1 e 2)

As Figuras 3 e 4 mostram as medições realizadas após a efficientização do sistema de iluminação. Observa-se na Figura 3, que os valores de tensão durante o período de medição no transformador 1, atingiram picos de até 389,46 V e decréscimo de tensão

igual a 369,60 V, porém esses valores variaram dentro da faixa de tensão adequada estabelecidos na Tabela 2, isto é, entre 350 V a 399 V.

Na Figura 4, são exibidos os resultados obtidos do transformador 2 e constata-se que os valores variaram dentro da faixa de tensão adequada, mesmo apresentando valor máximo de 390,06 V e valor mínimo de 370,80 V. Nenhuma amostra apresentou valor dentro da faixa precária e crítica.

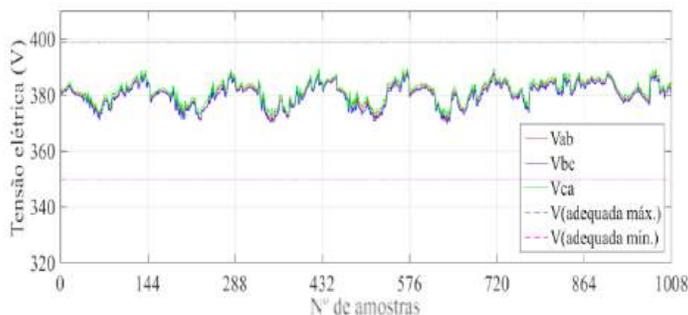


Fig. 3 – Tensão em regime permanente (transformador 1)

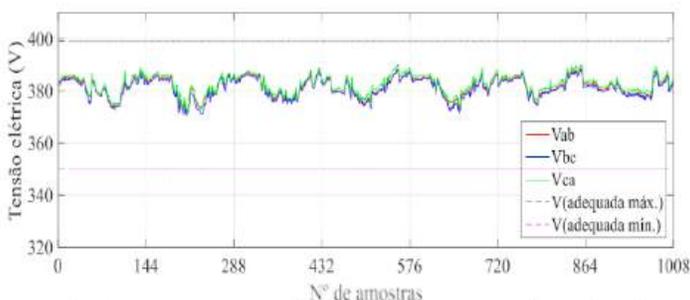


Fig. 4 – Tensão em regime permanente (transformador 2).

## B. Fator de potência

A Tabela 6 apresenta os resultados referente as medições de fator de potência antes e após o *retrofit* da iluminação. Observa-se que os resultados antes, apresenta valores dentro dos limites estabelecidos, inclusive nenhuma amostra menor que 0,92.

Quanto aos resultados após o *retrofit* de iluminação, constata-se no transformador 1 que os resultados estão dentro dos limites estabelecidos, compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo. Todavia, nota-se que a partir das medições na fase C, mesmo apresentando o valor médio do fator de potência igual a 0,96, apresenta um índice de 5,75% das amostras com valores abaixo de 0,92, em um total de 1008 amostras válidas. Tais resultados foram oriundos de um final de semana, onde ocorreu um consumo mínimo de energia elétrica.

No transformador 2 constatou-se que dentre as 1008 amostras válidas, apenas

3,27% das amostras apresentaram valores abaixo de 0,92 com relação ao fator de potência total. Na fase A observou-se um índice igual a 0,09%, na fase B igual a 0,00% e na fase C igual a 0,39%.

<b>Transformadores 1 e 2 (antes do retrofit da iluminação)</b>		
<b>Fases</b>	<b>Fator de potência</b>	
	Valor médio	Número de amostras menores que 0,92 (%)
Total	0,98	0,00
<b>Transformador 1 (após o retrofit da iluminação)</b>		
<b>Fases</b>	<b>Fator de potência</b>	
	Valor médio	Número de amostras menores que 0,92 (%)
A	0,99	0,00
B	0,98	0,00
C	0,96	5,75
Total	0,97	0,00
<b>Transformador 2 (após o retrofit da iluminação)</b>		
<b>Fases</b>	<b>Fator de potência</b>	
	Valor médio	Número de amostras menores que 0,92 (%)
A	0,98	0,09
B	0,99	0,00
C	0,99	0,39
Total	0,97	3,27

Tabela 6 – Valores dos indicadores do fator de potência (transf. 1 e 2).

### C. Distorção harmônica de tensão

As distorções harmônicas totais de tensões (DTT) nas fases A, B e C, dos transformadores 1 e 2 antes do *retrofit* da iluminação, é apresentada na Figura 5 e pode ser verificado que o número de medições encontram-se com valor máximo igual a 1,55%. Assim está em consonância com os limites estabelecidos na Tabela 3, que permite taxa de distorção de até 8%. Nesse monitoramento não foram realizadas medições referente as distorções harmônicas individuais das tensões.

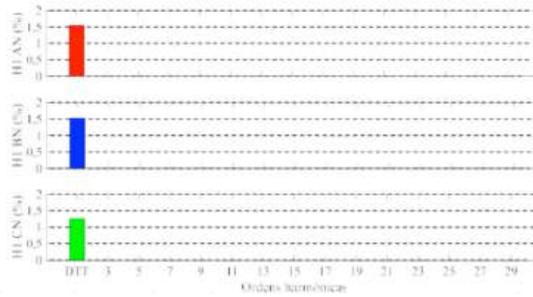


Fig. 5 – Distorções harm. das tensões nas fases A, B e C (transf. 1 e 2)

Quanto aos resultados após o *retrofit*, pode ser verificado nas Figuras 6 e 7 que as distorções harmônicas totais de tensões (DTT) encontram-se com valores máximos de até 2,0%. Assim está em consonância com os limites estabelecidos na Tabela 3, que permite taxa de distorção de até 10%.

Com relação aos perfis das distorções harmônicas individuais das tensões nas fases A, B e C nos transformadores 1 e 2, as Figuras 6 e 7 mostram, que os resultados estão em conformidade com a Tabela 3. Os limites estabelecidos para as componentes ímpares não múltiplas de 3 e as componentes múltiplas de 3, isto é, as DTT<sub>i</sub> e DTT<sub>3</sub> são iguais a 7,50% e 6,50% respectivamente. Todavia as medições apresentaram valores inferiores a 2,0%.

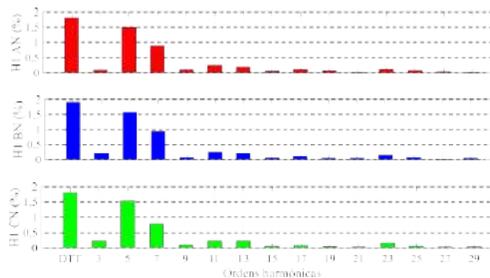


Fig. 6 – Distorções harmônicas das tensões nas fases A, B e C (transf. 1)

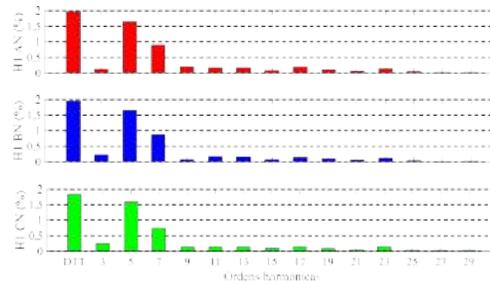


Fig. 7 – Distorções harmônicas das tensões nas fases A, B e C (transf. 2)

## D. Desequilíbrio de tensão

O comportamento do desequilíbrio de tensão nos transformadores 1 e 2, antes do *retrofit* da iluminação é mostrado na Figura 8 e constata-se que as medições apresentam valores dentro do intervalo de 0,2% a 0,6%, quanto o limite máximo permitido é igual a 2%.

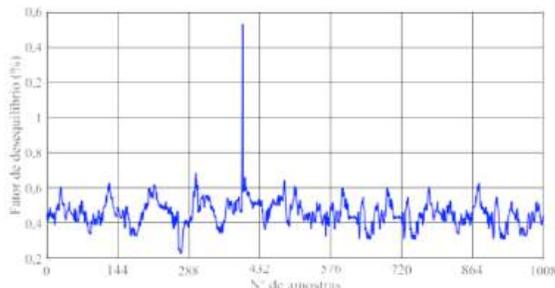


Fig. 8 – Desequilíbrio de tensão (transformadores 1 e 2)

Com relação a curva do desequilíbrio de tensão nos transformadores 1 e 2, a Figura 9 mostra que as medições apresentam valores dentro do intervalo de 0,0% a 0,4%. Esses valores atendem os limites estabelecidos na Tabela 4, que permite até 3% de desequilíbrio de tensão em relação a 5% das 1008 amostras válidas, ou seja, valores que podem ser ultrapassados por 5% de um total de 1008 leituras válidas.

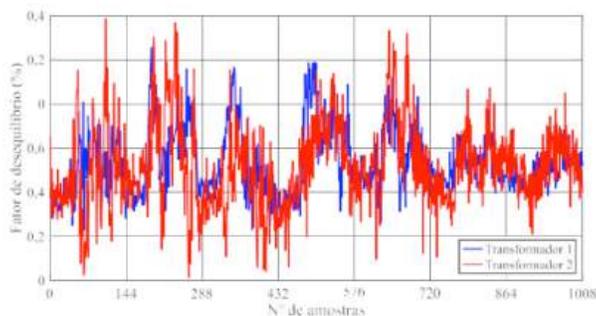


Fig. 9 – Desequilíbrio de tensão (transformadores 1 e 2)

## E. Variação de frequência

O comportamento da variação da frequência nos transformadores 1 e 2, antes do *retrofit* da iluminação é mostrado na Figura 10 e observa-se que os valores medidos encontram-se no intervalo de 59,9 a 60,1 Hz para as condições normais de operação.

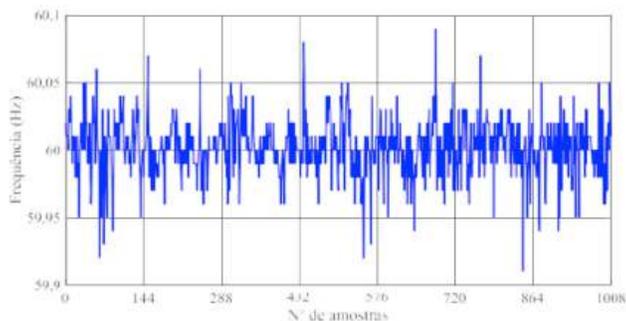


Fig. 10 – Variação de frequência (transformadores 1 e 2)

A Figura 11 apresenta a variação de frequência registrada nos transformadores 1 e 2 após o *retrofit* da iluminação. Consta-se que os valores medidos no período encontram-se no intervalo de 59,9 a 60,1 Hz para as condições normais de operação, desta forma apresentando um comportamento estável.

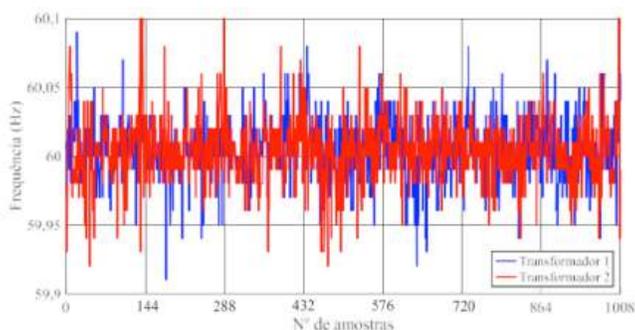


Fig. 11 – Variação de frequência (transformadores 1 e 2)

## 51 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou os resultados das medições de parâmetros de qualidade de energia realizadas nas instalações do IFG Campus Goiânia antes e após a eficiência do sistema de iluminação.

Na eficiência do sistema de iluminação, onde substituiu as lâmpadas incandescentes, fluorescentes compactas, fluorescentes tubulares, mista e vapor de mercúrio por lâmpadas com diodo emissor de luz (LED), os resultados indicam que não ocorreram transgressões com relação aos indicadores de qualidade de energia. Da mesma forma, que os parâmetros de QEE mostraram-se dentro dos limites estabelecidos, nas medições realizadas antes da implantação do projeto de eficiência energética.

A análise realizada é importante neste momento, pois os resultados atendem aos critérios estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST e a Norma IEC 61.000-4-30, e serve de

referência para outros estudos, que apresentam características similares ao IFG – Campus Goiânia.

Ainda que o presente trabalho permita uma boa avaliação com relação aos indicadores de QEE, vislumbra-se para trabalho futuro a continuação desse estudo, onde será realizada análise após a adição de sistema fotovoltaico no IFG – Campus Goiânia, que faz parte da segunda fase do projeto e terá como objetivo possibilitar a autossuficiência energética do Campus.

## REFERÊNCIAS

- [1] VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações - Sistemas isolados e conectados à rede**. 1ª. ed. São Paulo: Érica, 2012.
- [2] WANG, Y.; YAZDANPANAHI, H.; XU, W. **Harmonic impact of LED lamps and PV panels**. In: CANADIAN CONFERENCE OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (CCECE), IEEE 26º, 2013, Canadá. **Anais...**Regina, SK: IEEE Canadá, 2013. p.1-4.
- [3] N. INDRA, D. ISMAIL, M. SYAFRUDIN, R. CHAN BAHAUDIN, H. SURYA. **Harmonic Monitoring at UniMAP Distributed Campus**. In: The 5th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2011), Shah Alam, Selangor, Malaysia : 6-7 June 2011
- [4] IRFAN I. MUJAWAR, KOMAL S. DUBAS, SUCHITRA V. ITTAM, SNEHA N. NAVGIRE, ISAK I. MUJAWAR. **Power Quality Audit of NKO CET-A Case Study**. In: IEEE International Conference on Energy Systems and Applications (ICESA 2015), Pune, India 30 Oct - 01 Nov, 2015.
- [5] ABDULLAHI L. AMOO ; USMAN O. ALIYU ; GANIYU A. BAKARE ; DALILA M. SAID ; MOHAMMAD Y. HASSAN. **Harmonic Measurements and Analyses in Distribution Infrastructure Feeding Selected Institutions in Malaysia and Nigeria**. In: IEEE, Clemson University Power Systems Conference (PSC), Clemson, SC, USA, 2015.
- [6] BOGILA, A; PINTO, J.R.; FRANCHI, T.P.; GONÇALVES, M.R. **Análise harmônica nos inversores fotovoltaicos de uma microgeração fotovoltaica**. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar , 2018, Gramado, Brasil, p.1-10.
- [7] ROCHA, J. E. **Qualidade da energia elétrica. 2016**. Paraná, UTFPR, 2016. Disp.em<[http://paginapessoal.utfpr.edu.br/joaquimrocha/qualidadedaenergiaeletrica/Qualidade%20da%20Energia%20Elétrica%20\\_%20Apostila.pdf/view](http://paginapessoal.utfpr.edu.br/joaquimrocha/qualidadedaenergiaeletrica/Qualidade%20da%20Energia%20Elétrica%20_%20Apostila.pdf/view)> Acesso em: 28 de fev. 2021.
- [8] ANEEL – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST- **Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**, 2018, Revisão 10. Resolução Normativa nº 794/2017.
- [9] DECKMANN, S. M., POMILIO, J. A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. 2018. UNICAMP/FEEC/DSE. Disponível em <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/it012.html> > Acesso em: 28 de fev. de 2021.
- [10] DUGAN, R.C.; MCGRANAGHAN, M.F.; SANTOSO,S.; BEATY,H.W. **Electrical Power Systems Quality**. 2ª edição, EUA: Editora McGraw-Hill, 2004.

- [11] IEEE Std. 519 – **Recommend Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**, 2014.
- [12] LEÃO, R. P. S.; SAMPAIO, R. F.; ANTUNES, F. L. M. **Harmônicos em sistemas elétricos**. 1<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- [13] ENEL. **CHAMADA PÚBLICA DE PROJETOS DA ENEL DISTRIBUIÇÃO GOIÁS CPP 002/2019**. Versão 4.1, Goiânia, 2019. Disponível em < <https://enel-go.chamadapublica.com.br/> > Acesso em: 01 de mar. 2021.
- [14] TECNIA. **Relatório 3 - Projeto executivo – Ações de Eficiência Energética IFG**. Goiânia, p. 49. 2016.
- [15] IEC. Internacional Standard IEC 61.000-4-30, **Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods**, 2015.
- [16] FLUKE. **Fluke 434-II/435-II/437-II Analisadores de Qualidade de Potência e Energia Trifásicos**. Manual do Usuário. 180p. 2012. Disponível em < [https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/F430- II\\_umpor0100.pdf](https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/F430-II_umpor0100.pdf) > Acesso em: 05 de mar. 2021.

# DESCUBRIENDO LAS CÓNICAS A PARTIR DE SU ECUACIÓN GENERAL

*Data de aceite: 01/11/2022*

**Esperanza Georgina Valdés y Medina**

Facultad de Estudios Superiores Acatlán,  
UNAM

**Miguel Ángel Chávez García**

Facultad de Estudios Superiores Acatlán,  
UNAM

**Leilani Medina Valdés**

Facultad de Estudios Superiores Acatlán,  
UNAM

**RESUMO:** Este trabajo tiene como objetivo presentar un applet generado con Geogebra, que se produce como herramienta para que los alumnos de 15 a 16 años de edad descubran que, variando los valores de los coeficientes de la ecuación general, obtienen las diferentes gráficas de las secciones cónicas.

**PALAVRAS-CHAVE:** GeoGebra, Secciones Cónicas, Interpretación.

## 1 | LA MANIPULACIÓN DE LOS OBJETOS PARA EL APRENDIZAJE SIGNIFICATIVO

En los procesos de aprendizaje, el alumno puede no comprender algunos

temas que son fundamentales para niveles posteriores del aprendizaje disciplinar, dos son las principales variables para esta problemática, el primero, y más sencillo de visualizar obedece a que los elementos son completamente nuevos, entonces, la falta de familiaridad es un factor en contra de los procesos cognitivos. El segundo se refiere al nivel de madurez, ya que los tópicos básicos asociados a los fundamentos disciplinares, se presentan con un alto grado de abstracción lo que descontextualiza el contenido y requiere del crecimiento del alumno.

“Para lograr un mejor desarrollo infantil es necesario que el niño tenga experiencias de manipulación directa de los objetos. Piaget sugiere que, durante el desarrollo infantil, estas experiencias permiten a los estudiantes ser capaces de demostrar ciertas habilidades. Desgraciadamente no todos han tenido la oportunidad de desarrollarla (Eggen, 1992). Muchos de ellos carecen de experiencias previas con las cuales relacionar los conocimientos abstractos típico de la educación media y media superior...” (Escamilla, 2000, p54)

La manipulación en algunos temas de dinámica pueden ser sencilla y es altamente kinestésica, mientras que en los tópicos de álgebra tiene un nivel mayor de dificultad debido a los procesos de abstracción.

## 2 | DESCRIPCIÓN DE LAS SECCIONES CÓNICAS

“El geómetra y astrónomo griego Apolonio de Pérgamo que vivió del año 262 a.C. al 180 a.C. en su obra Las Cónicas describió las curvas que se obtienen al seccionar un cono con un plano” (Palencia, 2012)

La gráfica de una ecuación de 2do grado en 3 variables  $x, y, z$  se llama una superficie cuadrática. Las secciones planas de una superficie cuadrática son las secciones cónicas o simplemente cónicas. Variando únicamente la posición de un plano cortante se obtiene: un círculo, una elipse, una parábola o una hipérbola. [véase Figura 1]

La ecuación general de las secciones cónicas es:

$$Ax^2 + By^2 + Cxy + Dx + Ey + F = 0$$

siendo todos los coeficientes constantes y al menos  $A, B$  o  $C$  diferente de cero.

Dependiendo de los valores asignados a los coeficientes en esta ecuación se obtienen las gráficas de las diferentes cónicas.

Esto que parece obvio para un educando del nivel superior debido a su nivel de madurez y los conocimientos antecedentes que tiene, suficientes para construir un andamiaje del conocimiento sólido, pero no lo es tanto para el discente de nivel elemental quién está adquiriendo los rudimentos de geometría analítica.

Por lo anterior se desarrolló un applet en GeoGebra cuyo objetivo se centra en evidenciar algunos de los conceptos de las secciones cónicas [véase Figura 1], de tal manera que los aprendientes hagan suyo el conocimiento por descubrimiento, a través de la observación, manipulación y reflexión.

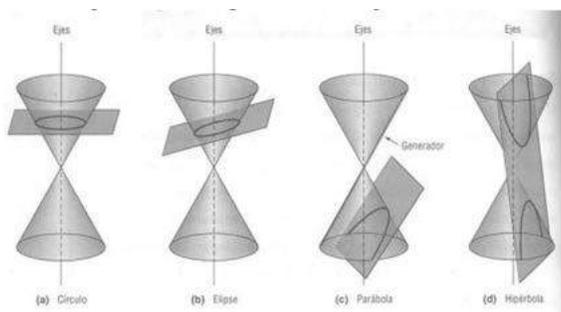


Figura 1: Descripción de las figuras cónicas

Extraído el 28 de abril de 2016 de: [http://matematica-2.bligoo.com/media/users/15/754232/images/public/145115/conicas2\\_1\\_.jpg?v=13173123396](http://matematica-2.bligoo.com/media/users/15/754232/images/public/145115/conicas2_1_.jpg?v=13173123396) 79

GeoGebra permite el trazado dinámico de construcciones geométricas de todo tipo, así como la representación gráfica, el tratamiento algebraico y el *cálculo* de funciones reales de variable real, razón por la que es el software idóneo para resolver esta problemática educativa.

### 3 I RELACIÓN DE LA ECUACIÓN DE UNA CÓNICA CON SU GRÁFICA

El applet desarrollado permite que el alumno interprete la expresión algebraica de una sección cónica, considerando que los cambios en los coeficientes implican cambios en la gráfica.

Asimismo el que encuentre las condiciones suficientes y necesarias para obtener la cónica esperada, tal manipulación ayuda al alumno a obtener la madurez necesaria para su interpretación.

El applet tiene seis deslizadores ordenados conforme a la fórmula general, la cual se observa en el visor algebraico [Véase figura 2].

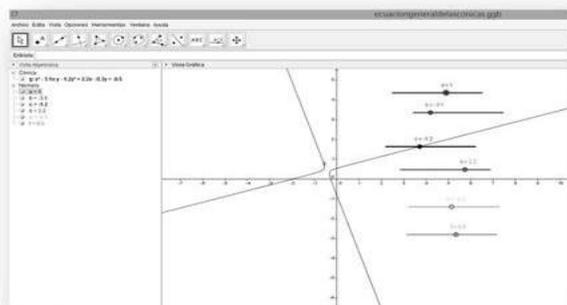


Figura 2: Los deslizadores

Capturado el 28 de abril de 2016 de GeoGebra 4.4.45.0 (Java 1.7.0\_40-32 bit, 247MB Inicializando CAS) 17 Septie 2014

La manipulación de los deslizadores cambia la gráfica de la función que se proyecta conforme a los nuevos valores y la fórmula refleja el cambio.

Para que el conocimiento sea adquirido de manera significativa por el alumno, es pertinente que el facilitador o docente explique los conceptos teóricos asociados al tópico de secciones cónicas previos a la exposición digital. Y se sugiere algún tipo de evaluación para elucidar el nivel de aprendizaje *adquirido* por el discente.

El uso de GeoGebra como alternativa para generar el material didáctico [véase figura 4], radica en el hecho de ser gratuito y por ende libre de aranceles comerciales, los cuales no generan gastos a las instituciones que deseen emplearlo.

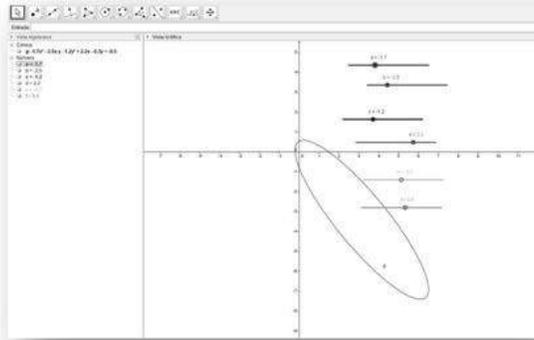


Figura 4 : El Uso de GeoGebra

Capturado el 28 de abril de 2016 de GeoGebra 4.4.45.0 (Java 1.7.0\_40-32 bit, 247MB Inicializando CAS) 17 Septiembre 2014

El dinamismo que ofrece *este* producto digital, hace que el estudiante tenga un mejor acercamiento en esta era del touch, con lo cual hace más ameno la enseñanza de las matemáticas; sin perder el rigor y formalidad que intrínsecamente emanan de ellas.

#### 4 I CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por medio del uso de las nuevas tecnologías, podemos ofrecer a los educandos una nueva forma o herramienta de apoyo para el aprendizaje de conceptos que relacionan el álgebra con la geometría. Esta idea de hacerlo de manera interactiva hace que los usuarios interactúen con el applet y moviendo cada uno de los deslizadores puede llegar a establecer una regla o norma para la obtención de diferentes cónicas, en particular, encontrar las condiciones necesarias y suficientes para garantizar la existencia de alguna cónica.

#### REFERÊNCIAS

- ESCAMILLA J. Selección y uso de tecnología educativa: Trillas, 2000. LEITHOLD L. El Cálculo: Oxford, 2013.
- CHAVEZ M. Geometría Analítica: Trillas, 2010.
- PALENCIA V. Elementos de Geometría Analítica Plana: Acatlán, 2012

# APLICAÇÃO DO MÉTODO DO GRADIENTE E DO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS RECURSIVO PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DO CONTROLE ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA

*Data de aceite: 01/11/2022*

### **Diego Carrião Canhan**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil

### **Leandro Castilho Brolin**

Docente no Curso de Engenharia Eletrônica/DAELN. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil  
ID Lattes: 71186655172023189

### **Flávio Luiz Rossini**

Docente no Curso de Engenharia Eletrônica/DAELN. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil  
ID Lattes: 8616413126997528

**RESUMO:** O presente trabalho realizou a comparação de desempenho entre dois algoritmos de estimação paramétrica, o Método do Gradiente (MG) e o Método dos Mínimos Quadrados Recursivo (MMQR), ambos aplicados ao sistema de Controle Adaptativo por Modelo de Referência (CAMR). O estudo de técnicas de análise e projeto de controle, assim como a comparação dos métodos aqui apresentados, potencializam a capacidade

do projetista em lidar com problemas práticos de forma eficaz. A principal contribuição do artigo foi reproduzir e esclarecer as vantagens dos métodos abordados. Assim, os objetivos específicos foram: (i) Identificar a planta a controlar; (ii) discretizar a planta; (iii) Construir a lei de controle; (iv) Implementar o algoritmo de identificação; e (v) Validar os resultados. A partir de simulações numéricas, analisou-se o desempenho de cada algoritmo e suas características. O MMQR possui ótimo regime transitório, mas um custo computacional elevado. O MG possui o tempo de acomodação mais lento, quando comparado ao MMQR, contudo tem baixa demanda computacional. Ao levar em consideração as características de cada algoritmo, ter conhecimento prévio sobre a planta que se deseja controlar, auxilia na escolha do algoritmo que mais se adequa as necessidades, assim potencializa melhor desempenho do sistema de controle.

**PALAVRAS-CHAVE:** Método dos Mínimos Quadrados Recursivo (MMQR). Método do Gradiente (MG). Controle Adaptativo por Modelo de Referência (CAMR). Comparação de Desempenho.

**ABSTRACT:** The present work carried out a performance comparison between two parametric estimation algorithms, the Recursive Least Squares Method (RLSM) and the Gradient Method (GM), both applied to the Model Reference Adaptive Control (MRAC). The study of analysis techniques and control design, as well as the comparison of the methods presented here, enhance the designer's ability to deal with practical problems effectively. The main contribution of the article was to reproduce and clarify the advantages of the methods discussed. Thus, the specific objectives were: (i) Identify the plant to control; (ii) discretize the plant; (iii) Build the control law; (iv) Implement the identification algorithm; and (v) Validate the results. From numerical simulations, the performance of each algorithm and its characteristics were analyzed. The RLSM has an excellent transient regime, but a high computational cost. The GM has the slower accommodation time when compared to the RLSM, however it has low computational demand. By taking into account the characteristics of each algorithm, having prior knowledge about the plant to be controlled helps in choosing the algorithm that best suits the needs, thus enhancing the performance of the control system.

**KEYWORDS:** Comparison of parametric methods. Model Reference Adaptive Control (MRAC). Gradient Method (GM). Recursive Least Squares Method (RLSM).

## INTRODUÇÃO

O controle adaptativo surgiu na década de 50, na área de processos de automação e na aviação. Ao longo das últimas décadas, esse tipo de estratégia de controle tem ganhado espaço em aplicações de modelos variantes no tempo. O motivo para o avanço do controle adaptativo foi para desenvolver sistemas de controle que pudessem se adaptar às mudanças na dinâmica do processo (ÅSTRÖM; WITTENMARK, 2008).

Uma classe de controladores adaptativos faz uso de métodos de estimação paramétrica e em tempo real. Assim, a partir dos parâmetros estimados, esses são usados na lei de controle para ajustar os ganhos do controlador ou regulador, cuja finalidade é atender aos critérios de desempenho (LANDAU *et al.*, 2011).

Os esquemas de CAMR podem ser caracterizados como indiretos ou diretos e com leis adaptativas normalizadas ou não normalizadas. No CAMR indiretos os parâmetros da planta são estimados em tempo real e a partir dessa estimativa os ganhos do controlador são calculados. No CAMR direto, o qual é abordado neste trabalho, os ganhos do controlador são estimados sem que haja cálculo intermediários. As leis adaptativas utilizadas no presente trabalho foram o MG e o MMQR (IANNOU, 1996).

Aplicou-se a estratégia de CAMR com estrutura direta a uma planta de segunda ordem com grau relativo igual a um. Para o sistema de CAMR, torna-se necessário projetar um controlador, em que seus ganhos sejam atualizados a cada mudança da planta ou de modo periódico. A partir do sinal de saída gerado, comparam-se os respectivos sinais da planta real e do modelo de referência, isso produz um sinal de erro. Assim, os novos ganhos do controlador são calculados a partir desse erro. O objetivo do CAMR é fazer com que os parâmetros convirjam para valores que conduzam a resposta da planta a tornar-se igual a resposta do modelo de referência (JACOMÉ, 2013; PAULO, 2015).

O artigo se encontra organizado da seguinte maneira: Seção de Materiais e Métodos tratou de demonstrar o conceito do CAMR por meio de diagrama de blocos, descreveu-se sobre a lei de controle e apresentaram-se os métodos de estimação paramétrica; na Seção Resultados e Discussões, apresentaram-se as respostas gerada de cada algoritmo, bem como um comparativo entre os dois métodos de estimação; e a Seção Conclusão, relataram-se as características observadas no sistema de controle em malha fechada.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O Controle Adaptativo por Modelo de Referência (CAMR) é uma das principais abordagens no campo do controle adaptativo. Na Figura 1, ilustrou-se o esquema de CAMR, onde o modelo de referência é escolhido para gerar uma trajetória,  $y_m$ , que a saída da planta  $y_p$  deve seguir, para um dado sinal de referência  $r$ , expressado por:

$$e_1 = y_p - y_m \quad (1)$$

O sinal de erro,  $e_1$ , mostrado na Equação (1) representa o quanto a planta desviou da trajetória desejada.

Com base nesse erro, Equação (1), os ganhos do controlador são alterados com o auxílio de estimador de parâmetros. Assim, deseja-se que o erro seja nulo ou o mais próximo de zero possível (IANNOU,1996).

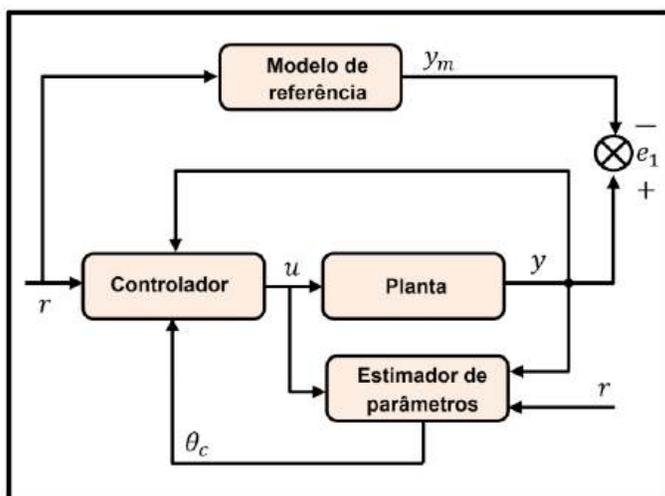


Figura 1 - Estrutura básica de um MRAC Direto

FONTE: Adaptado de Iannou (1996).

## PLANTA DE ORDEM $n$ COM GRAU RELATIVO $n^*=1$

Iannou (1996) descreveu uma planta SISO (do inglês, *Single Input Single Output* - SISO), linear invariante no tempo - LIT (do inglês, *Linear Time Invariant*), representada

pelas equações de estado e de saída, expressadas respectivamente como:

$$\begin{aligned}\dot{x}_p &= A_p x_p + B_p u_p \\ y_p &= C_p^T x_p\end{aligned}\quad (2)$$

sendo  $x_p$  é o vetor de estados da planta,  $y_p$  o vetor de saída da planta e  $u_p$  o sinal de entrada da planta, e estes contêm  $n$  elementos para um sistema SISO de  $n$ -ésima ordem, além das matrizes  $A_p$  de transição de estados do sistema de tamanho  $n \times n$ ,  $B_p$  matriz de entrada de tamanho  $n \times 1$ ,  $C_p^T$  é a saída do sistema de tamanho  $1 \times n$  (FRANKLIN, 2013).

Iannou (1996) mostrou que a função de transferência da planta é dada por:

$$y_p = G_p(s)u_p \quad (3)$$

sendo  $G_p(s)$  a função de transferência, a qual pode ser expandida da forma:

$$G_p(s) = k_p \frac{Z_p(s)}{D_p(s)} \quad (4)$$

sendo  $Z_p$  e  $D_p$  são polinômios mônicos da entrada e saída, respectivamente, e  $K_p$  é o ganho da função de transferência. A planta deve possuir grau relativo igual a um,  $n^*=1$ , expressado por  $n^* = n_p - m_p$ , sendo  $n_p$  ordem do denominador da planta e  $m_p$  ordem do numerador da planta.

Iannou (1996), mostrou que modelo de referência possui as mesmas características da planta e representado por equações de estados:

$$\begin{aligned}\dot{x}_m &= A_m x_m + B_m r \\ y_m &= C_m^T x_m\end{aligned}\quad (5)$$

sendo  $x_m$  é o vetor de estados do modelo,  $y_m$  o vetor de saída do modelo e  $r$  o sinal de referência da planta, e estes contêm  $n$  elementos para um sistema SISO de  $n$ -ésima ordem, além das matrizes:  $A_m$  a matriz de transição de estados do sistema de tamanho  $n \times n$ ,  $B_m$  a matriz de entrada de tamanho  $n \times 1$ ,  $C_m^T$  é a saída do sistema de tamanho  $1 \times n$  (FRANKLIN, 2013).

De acordo com Iannou (1996) o modelo de referência também deve possuir grau relativo  $n^*=1$ . A função de transferência do modelo é dada por:

$$y_m = W_m(s)r \quad (6)$$

$W_m(s)$  é expresso na forma:

$$Q_m(s) = k_m \frac{Z_m(s)}{D_m(s)} \quad (7)$$

## DISCRETIZAÇÃO

As discretizações da planta e do modelo de referência foram feitas com o segurador de ordem zero (do inglês, *Zero Order Hold – ZOH*).

A conversão analógica-digital (A/D), é um processo de dois passos. Em um conversor A/D o sinal analógico é convertido em um sinal amostrado e, em seguida, convertido em uma sequência binária, o sinal digital. A taxa de amostragem deve ser ao menos o dobro da faixa de passagem do sinal. Essa frequência mínima de amostragem é denominada de *taxa de amostragem de Nyquist*. Para modelar sistemas digitais, deve-se obter uma representação matemática do processo do amostrador e segurador (NISE, 2013).

O modelo matemático para o amostrador é dado por:

$$f_{Tw}^*(t) = f(t)s(t)$$

$$f_{Tw}^*(t) = T_w \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(kT)\delta(t - kT) \quad (8)$$

A amostragem pode ser considerada o produto da forma de onda no domínio do tempo a ser amostrada,  $f(t)$ , com uma função de amostragem,  $s(t)$ . Se  $s(t)$  é uma sequência de pulsos de largura  $T_w$ , amplitude constante e taxa uniforme, a saída amostrada,  $f_{Tw}^*(t)$ , consistirá de uma sequência de parte de  $f(t)$  em intervalos regulares. Na Equação (8), o termo  $\delta(t-kT)$  constitui em funções delta de Dirac. Com isso, o resultado da amostragem com pulsos retangulares pode ser considerado como uma série de funções delta em que suas áreas são o produto da largura do pulso retangular com a amplitude da forma de onda amostrada, ou  $T_w f(kT)$  (NISE, 2013).

Para Nise (2013), o segurador de ordem zero produz uma aproximação em degraus para  $f(t)$ . Assim, a saída do segurador é uma sequência de funções degrau cuja amplitude é  $f(t)$  no instante de amostragem,  $f(kT)$ . Como um único impulso a partir do amostrador produz um degrau durante o intervalo de amostragem, a transformada de Laplace deste degrau,  $G_h(s)$ , que é a resposta ao impulso do segurador de ordem zero, é a função de transferência do segurador de ordem zero. Ao utilizar um impulso no instante zero, a transformada do degrau resultante que começa em  $t=0$  e termina em  $t=T$ , expressada por:

$$G_h(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \quad (9)$$

Em um sistema físico, as amostras da forma de onda de entrada em função do tempo,  $f(kT)$ , são seguradas durante o intervalo de amostragem. Pode-se verificar a partir da Equação (9), que o circuito segurador integra a entrada e mantém seu valor durante todo o intervalo de amostragem. Como a área da função delta que vem do amostrador é  $f(kT)$  ao integrar a forma de onda amostrada ideal e obter o mesmo resultado que para o sistema físico (NISE, 2013).

## LEI DE CONTROLE

Silveira (2018) descreveu ao considerar que uma planta  $G_p(s)$  de ordem  $n$  e grau relativo  $n^*=1$ , uma lei de controle descrita como:

$$u_p = \theta^T \varphi \quad (10)$$

sendo  $\varphi=[\varphi_1^T, \varphi_2^T, y_p, r]^T$  e  $\theta=[\theta_1^T, \theta_2^T, \theta_3, c_0]^T$ , em que  $\varphi_1^T$  e  $\varphi_2^T$  vetores que compõem os filtros de reconstituição de estado,  $y_p$  o sinal de saída da planta e  $r$  o sinal de referência;  $\theta_1^T, \theta_2^T, \theta_3, c_0$  vetores de ganho.

Os filtros de reconstituição de estado podem ser representados no domínio do tempo discreto como:

$$\varphi_1(k) = (I + \bar{F}T)\varphi_1(k-1) + gTu_p(k-1) \quad (11)$$

$$\varphi_2(k) = (I + \bar{F}T)\varphi_2(k-1) + gTu_p(k-1) \quad (12)$$

## NORMALIZAÇÃO DE LEIS ADAPTATIVAS

De acordo com Silveira (2018) para resolver o problema da divergência das leis adaptativas quando o sinal de referência é excessivamente elevado, deve-se utilizar a técnica de normalização. A normalização divide a lei de adaptação por uma função quadrática  $m^2$ . Este sinal  $m^2$  age como um freio que evita a divergência dos parâmetros estimados. A solução frequentemente, dada por:

$$m^2 = 1 + \varphi^T \varphi \quad (13)$$

O uso de sinal de normalização, além de contribuir com a convergência da lei adaptativa, também melhora a robustez do controlador frente às incertezas da planta.

## MÉTODO DO GRADIENTE – MG

Iannou (1996) descreveu um modelo paramétrico no tempo discreto:

$$z(k) = \theta^{*T} \psi(k) \quad (14)$$

sendo  $\theta^*$  um vetor de parâmetros desconhecidos de ordem  $n$  e  $z \in \mathbb{R}^n$  é conhecido para cada instantes de  $k=1,2,3\dots$ . A estimação do erro  $e(k)$  é obtida por:

$$\hat{z} = \theta^T(k-1) \psi(k)$$

$$e(k) = \frac{z(k) - \hat{z}(k)}{m^2(k)} \quad (15)$$

a estimação do erro  $e(k)$  no tempo  $k$  depende da estimativa anterior de  $\theta^*$ , ou seja, no tempo  $\theta(k-1)$ , pois  $\theta(k)$  é gerado em seguida a partir de  $e(k)$ .

A lei adaptativa é dada por:

$$\theta(k) = \theta(k-1) - \Gamma \psi(k-1) e(k-1) \text{sgn}(p^*) \quad (16)$$

sendo  $\Gamma$  é um ganho fixo,  $\psi$  é um vetor regressor,  $e(k)$  o erro entre a resposta estimada e a resposta real e o valor absoluto  $\text{sgn}(p^*) = \text{sgn}(K_p/K_m)$ .

## MÉTODOS DOS MÍNIMOS QUADRADOS RECURSIVO – MMQR

De acordo com Åström (2008) neste método, os parâmetros desconhecidos de um modelo matemático devem ser escolhidos de tal forma que a soma dos quadrados de suas diferenças, deve ser mínima. O algoritmo normalizado apresentado por Iannosun (1996) é formado por uma matriz de covariância, expressada por:

$$\dot{P} = \frac{-P\zeta\zeta^T P}{m^2} \quad (17)$$

A Equação (17) pode ser implementada na forma digital como:

$$P(k) = P(k-1) - T \frac{P(k-1)\zeta(k-1)\zeta(k-1)^T P(k-1)}{m^2(k-1)} \quad (18)$$

e a estimativa dos parâmetros:

$$\theta(k) = \theta(k-1) - \frac{P(k-1)\text{sgn}(p^*)\zeta(k-1)e(k-1)}{m^2(k-1)} \quad (19)$$

sendo  $\zeta(k)$  um vetor regressor e  $e(k)$  é o erro entre a resposta estimada e a resposta real e o valor absoluto  $\text{sgn}(p^*) = \text{sgn}(K_p/K_m)$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o presente trabalho, foi desenvolvido um algoritmo do MRAC direto, onde foi comparado o desempenho do MMQR e do MG na identificação de parâmetros.

A planta utilizada para análise foi apresentada por Correa e Gualhano (2019). A função de transferência para a planta é dada por:

$$G_p(s) = \frac{s+3}{s^2-2s+1} \quad (20)$$

A forma discretizada da função de transferência da planta é dada por:

$$G_p(z) = \frac{0.01005z - 0.009752}{z^2 - 1.98z + 0.9802} \quad (21)$$

A função de transferência para o modelo de referência é:

$$W_m(s) = \frac{2(s+2)}{s^2+6s+5} \quad (22)$$

A forma discretizada do modelo de referência é dada por:

$$W_m(z) = \frac{0.01961z - 0.01922}{z^2 - 1.941z + 0.9418} \quad (23)$$

Para o desenvolvimento do algoritmo do MMQR, utilizou-se uma onda quadrada como sinal de referência. A função de transferência para a planta e para o modelo de referência são mostradas nas Equações (20) e (22), respectivamente. Esse método possui um ótimo regime transitório, devido a sua matriz de covariância  $P$  ser atualizada a cada recursão. A matriz de covariância deve ser inicializada com valores elevados, pois quanto

mais alto o valor, mais rápido será a convergência, contudo valores extremamente elevados podem levar a divergência numérica. Esse método possui um custo computacional mais alto quando comparado ao MG, devido a atualização constante da matriz de covariância  $P$ . Na Figura 2, apresentou-se a saída da planta juntamente com o modelo de referência, onde pode-se notar a robustez desse método. Na Figura 3, ilustrou-se a atualização do erro. Na Figura 4, apresentou-se o Erro Quadrático Médio (EQM), onde nota-se que o erro chega próximo de zero muito rápido, onde também pode ser notado a eficiência do algoritmo.

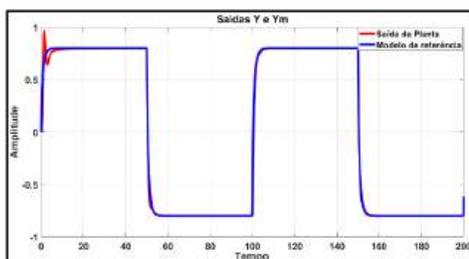


Figura 2 - Saídas Identificador MMQ.

Fonte: Autoria Própria

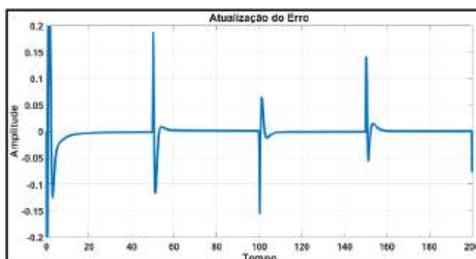


Figura 3 – Atualização do erro.

Fonte: Autoria Própria

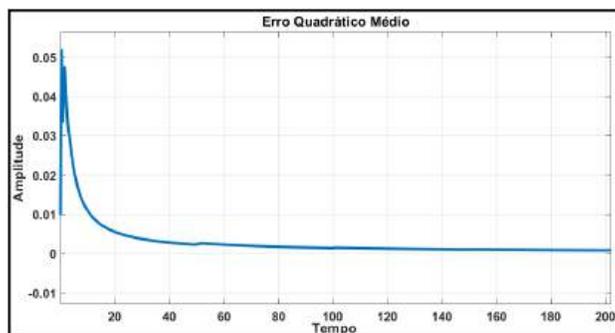


Figura 4 – Erro Quadrático Médio MMQ

Fonte: Autoria Própria

Para o desenvolvimento do algoritmo do MG, usou-se também uma onda quadrada como sinal de referência e a planta e modelo de referência apresentadas nas Equações (18) e (20), respectivamente. Esse método possui um regime transitório mais lento do que o MMQR, mas é eficiente quando os ganhos do controlador são próximos dos reais. O algoritmo diverge se possuir ganho muito elevado. Por possuir ganho fixo, e com isso, dispensa a atualização dessa constante, ele tem baixo custo computacional ao comparar com o MMQR. Na Figura 5, apresentou-se a saída da planta juntamente com o modelo de referência, assim nota-se um tempo maior para a acomodação do sinal. Na Figura 6, mostrou-se a atualização do erro. Na Figura 7, apresentou-se o Erro Quadrático Médio (EQM), este que em comparação com o algoritmo MMQR, exige um tempo maior para que o erro fique próximo a zero.

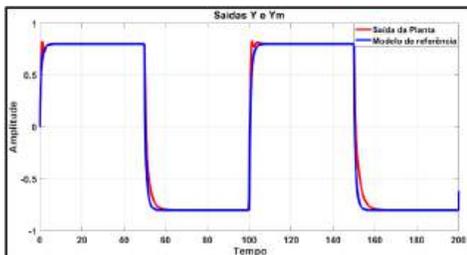


Figura 5 - Saídas Identificador Gradiente.

Fonte: Autoria Própria

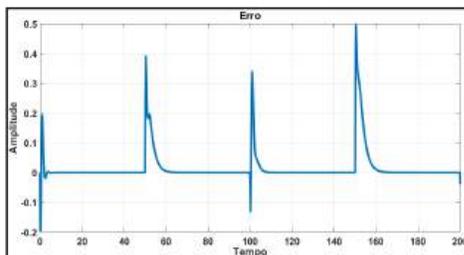


Figura 6 – Atualização do erro.

Fonte: Autoria Própria

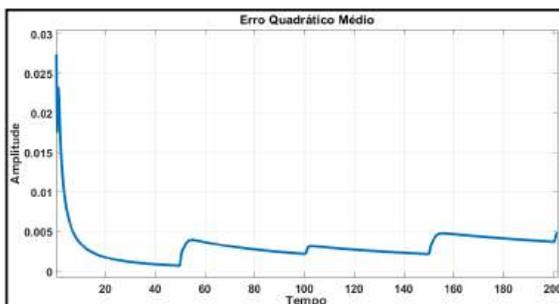


Figura 7 – Erro Quadrático Médio MG.

Fonte: Autoria Própria

## CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo entre dois métodos de estimação paramétrica aplicados ao CAMR direto, o MMQR e o MG, assim analisou-se o desempenho em malha fechada de cada algoritmo ao serem aplicados a uma mesma planta e modelo de referência.

Os resultados obtidos se mostram atrativos, visto que, cada método de estimação tem sua característica de desempenho particular. O MG possui seus ganhos próximos dos ganhos verdadeiros e baixa demanda de processamento. Já o MMQR possui maior estabilidade numérica, mas tem um custo computacional muito maior que o MG apresentado. Cabe ao projetista decidir qual a melhor opção a se usar.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço pelo apoio e por toda a ajuda ao professor Dr. Leandro Castilho Brolin e em especial ao Dr. Flávio Luiz Rossini, pelo trabalho que tem realizado como orientador.

## REFERÊNCIAS

ÅSTRÖM, Karl J.; WITTENMARK, Björn. **Adaptive control**. 2.ed. Mineola, N.Y: Dover Publications, 2008.

CORRÊA, Yago P.; GUALHANO, Mariana A. Controle Adaptativo por Modelo de Referência Direto. **VI Congresso de ensino, pesquisa e extensão**. Instituto Federal Fluminense. 2019.

DONADOM, Lázaro V. **Estudo de métodos de estimação de parâmetros aplicados ao controle adaptativo auto-sintonizado**. 1998. 154 f. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 1998.

FRANKLIN, Gene F. et al. **Sistemas de controle para engenharia**. 6.ed. tradução: Fernando de Oliveira Souza; revisão técnica: Antônio Pertence Júnior. Porto Alegre: Bookman, 2013.

IOANNOU, Petros A.; SUN, Jing. **Robust Adaptive Control**. Prentice Hall, Inc. 1996.

IOANNOU, Petros; BARIS, Fidanş. **Adaptive Control Tutorial**. Society for Industrial and Applied Mathematics: Philadelphia. 2006.

JÁCOME, Isael C. **Controle adaptativo por modelo de referência e estrutura variável discreto no tempo**. 2013. 71 f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2013.

NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. 6.ed. Tradução e revisão técnica: Jackson Paul Matsuura. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

PAULO, Thiago F. **Controle adaptativo com desacoplamento aplicado a um sistema de tanques acoplados MIMO**. 65 f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2015.

SILVEIRA, Wagner da S. **Aplicativo de projeto e análise de desempenho de controladores adaptativos por modelo de referência**. 2018. 104 f. Trabalho de Conclusão de curso.

# ANÁLISE DA GESTÃO DE RESÍDUOS EM EMPRESAS DE CONSTRUÇÃO CIVIL NO MUNICÍPIO DE SÃO LUÍS-MA

*Data de submissão: 08/09/2022*

*Data de aceite: 01/11/2022*

### **Camila Pinho Tavares Coimbra**

Universidade Federal do Maranhão  
São Luis – Maranhão  
<http://lattes.cnpq.br/3428134955973799>

### **Jessica Moraes Dos Santos**

Universidade Federal do Maranhão  
São Luis – Maranhão  
<http://lattes.cnpq.br/7866717195627758>

### **Janyeid Karla Castro Sousa**

Universidade Federal do Maranhão  
São Luis – Maranhão  
<http://lattes.cnpq.br/4625914305792472>

**RESUMO:** A indústria da construção civil possui alta relevância econômica no Brasil, ao mesmo passo que exerce grande geração de impactos ambientais pela disposição irregular de seus resíduos. Este trabalho objetiva fazer uma análise do gerenciamento de resíduos entre empresas que atuam no campo da construção civil em São Luís/MA. Os resultados apontam que as empresas ainda precisam cumprir as políticas de reaproveitamento, considerando que os principais resíduos gerados são os de classes A e B.

**PALAVRAS-CHAVE:** Impactos ambientais;

resíduos de construção civil; destinação; geração; gerenciamento.

## ANALYSIS OF WASTE MANAGEMENT IN CIVIL CONSTRUCTION COMPANIES IN THE MUNICIPALITY OF SÃO LUÍS-MA

**ABSTRACT:** The construction industry has high economic relevance in Brazil, at the same time that it generates great environmental impacts due to the irregular disposal of its waste. This work aims to analyze waste management among companies that work in the field of civil construction in São Luís/MA. The results indicate that companies still need to comply with reuse policies, considering that the main waste generated are those of classes A and B.

**KEYWORDS:** Environmental impacts; construction waste; destination; generation; management.

## 1 | INTRODUÇÃO

No Brasil, estima-se que 51% dos resíduos urbanos são gerados pela construção civil (Marques Neto, 2005). Os Resíduos de Construção Civil (RCC), popularmente chamados de entulhos, podem ser constituídos por fragmentos de materiais utilizados em obras como madeira, tijolos, blocos cerâmicos, concretos, telhas, argamassa e entre outros.

A geração dos RCC nas cidades cresceu significativamente a partir de meados da década de 90 (Pinto e Gonzales, 2005). Com a implantação de infraestrutura de habitação, saneamento e pavimentação, a construção civil protagoniza com vigor os processos de transformações contínuas a que estão sujeitas as cidades. Porém, em paralelo a esses avanços, conforme as cidades crescem, a problemática da geração de RCC requer cada vez mais atenção, principalmente porque a urbanização das cidades brasileiras em geral tem ocorrido de maneira espontânea e não ordenada devido a planejamentos e fiscalizações ineficientes por parte do poder público (Almeida, 2013).

A falta de gerenciamento dos RCC dentro das atividades construção civil (reformas, escavação, ampliações e demolições), quando descartados de forma inadequada, poluem lagoas, causam assoreamento de rios, obstruem vias e logradouros públicos além de contaminarem solos e proliferarem vetores.

Por conta disso é importante fazer o gerenciamento desses resíduos para que eles sejam destinados corretamente durante as atividades cotidianas de execução de obras, visando assim diminuir os impactos ambientais. (Nagalli, 2014).

No Brasil, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) tem a função de orientar, definir regras e regular a conduta dos diferentes agentes, no que se refere à geração e manejo dos Resíduos da Construção Civil (RCC) e dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD), com objetivo de preservar o meio ambiente e a saúde pública.

Para que isso seja possível, a Resolução define a classificação, caracterização e destinação adequada para cada tipo de resíduo gerado nas diversas fases de construção, reformas ou demolição, como apresentado na Figura 1.

Diante disso, a CONAMA define pela Resolução nº 307 que os geradores deverão ser os responsáveis pelos resíduos das atividades de construção e demolição, porém, deverão ter como objetivo prioritário a não geração de RCC e, em seguida, a redução, reciclagem, reutilização e destinação final.

Classes	Descrição	Destinação
A	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.	Deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;
B	Resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, gesso <sup>3</sup> e outros.	Deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;
C	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação.	Deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.
D	Resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.	Deverão ser armazenados, transportados, reutilizados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

Figura 1: Classe, descrição e destinação (CONAMA)

Segundo Pinto e Gonzáles (2002), os principais geradores de volumes significativos de resíduos de construção e demolição são:

- Executores de reformas, ampliações e demolições que, no conjunto, consistem na fonte principal desses resíduos;
- Construtores de edificações novas, térreas ou de múltiplos pavimentos - com áreas de construção superiores a 300 m<sup>2</sup> cujas atividades quase sempre são formalizadas
- Construtores de novas residências, tanto aquelas de maior porte, em geral formalizadas, quanto as pequenas residências de periferia, quase sempre auto-construídas e informais.

A cidade de São Luís tem demonstrado crescimento significativo em termos de construção na última década, assim como o restante do país. Portanto, o objetivo deste trabalho é fazer uma análise do gerenciamento de resíduos de empresas que atuam no campo da construção civil na cidade de São Luís-MA, identificando os principais tipos de resíduos gerados, a causa dessa geração e definindo as dificuldades encontradas no

descarte adequado dos resíduos sólidos de construção civil pelas empresas entrevistadas.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

As informações foram levantadas 60% por meio de entrevistas in loco e 40% por telefone, utilizando formulário previamente elaborado na plataforma Google Forms. No total foram entrevistadas 10 empresas privadas que se dispuseram a participar da pesquisa, das quais 6 são consideradas empresas de grande porte e 4 empresas de pequeno porte segundo a classificação do SEBRAE referente ao tamanho da empresa tendo o número funcionários como parâmetro.

A análise foi feita de forma quantitativa, em termos percentuais através de gráficos automaticamente gerados, e qualitativas com base nas perguntas subjetivas utilizando a plataforma Google Forms. Em seguida os dados foram analisados e discutidos de acordo com a Resolução CONAMA N° 307 e interpretados conforme os objetivos desta pesquisa.

## 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o crescimento imobiliário nas cidades, conseqüentemente aumenta-se a geração de resíduos provenientes dessas obras e a necessidade de um melhor gerenciamento deles.

Dessa forma, questionou-se quais os tipos de resíduos são gerados em grande quantidade durante as obras. Para esse questionamento foram aceitas mais de uma opção entre as fornecidas no questionário. (Figura 2)



Figura 2: Percentual dos tipos de RCD produzidos em grande quantidade

Pode-se verificar que, entre as empresas entrevistadas, 90% geram em grande quantidade resíduos de classe A, 40% resíduos classe B e 20% classe C e classe D. Dentre

esses valores, já era esperado que a maioria das empresas gerassem resíduos classe A e B em quantidade significativa se tomarmos como exemplo que o PGIRS da cidade de São Paulo (São Paulo, 2014) já indicava que resíduos das classes A e B representam em torno de 80% e 18%, respectivamente, enquanto os resíduos classe C e D correspondem aos 2% restantes. O que mostra que a maior parte dos resíduos gerados dentro das obras estão entre os resíduos reaproveitáveis e recicláveis. (CONAMA 307).

Dentre as inúmeras possibilidades de reaproveitamento, várias delas são na verdade algo lucrativo para empresas. Segundo Carneiro (2001), vários estudos indicam que a reutilização de entulho, por exemplo, pode gerar baixo custo em relação ao custo dos agregados convencionais.

É esperado, portanto, que esse aspecto seja o suficiente para que as empresas priorizem as políticas que viabilizam essa prática dentro de seus canteiros. Porém, mesmo sendo a maior parte dos RCC e RCD reaproveitáveis, nem todas as empresas adotam políticas de reaproveitamento.

Quando questionadas sobre haver uma política que busca o reaproveitamento dos RCC, 40% disseram que não adotam nenhuma política de reaproveitamento (Figura 3). Apesar de essa porcentagem representar que mais da metade das empresas possuem algum tipo de política de reaproveitamento, ainda não é a ideal levando em consideração os benefícios e impacto do reaproveitamento nos canteiros de obras para toda a comunidade.

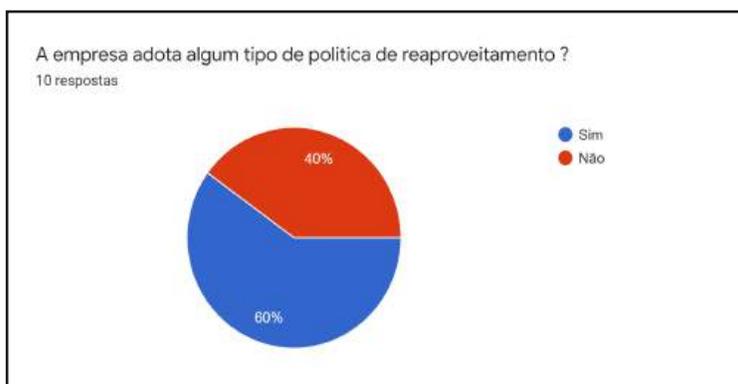


Figura 3: Percentual de empresas com política de reaproveitamento

No entanto, esse percentual se provou positivo quando comparado com a pesquisa de Mendes (2014) também com empresas privadas do setor da construção civil no município de São Luís (Figura 4). Dentre as empresas pesquisadas por Mendes (2014), 53% das empresas afirmaram aproveitar os resíduos dentro das obras, enquanto 47% declararam não realizar nenhuma prática de reaproveitamento em seus canteiros de obras. Esse aumento de 7% no intervalo de 6 anos mostra então, que há, ainda que modesto, avanço na adoção desse tipo de política no setor privado da construção civil na cidade.



Figura 4: Percentual de aproveitamento dos RCCs na própria obra (Mendes, 2014)

Entre as formas de reaproveitar resíduos na própria obra foi mencionado, por exemplo, a utilização da madeira para fazer paletes e tapumes, o uso dos resíduos de classe A como agregado com finalidades não estruturais, como por exemplo, nivelamento de terreno, além de baldes e caixas utilizados para transporte de materiais e entulho dentro da obra.

Além disso, durante a pesquisa, uma das empresas afirmou ter um programa anual que recompensa os funcionários que melhor conseguem gerenciar e reduzir a produção de RCC na execução da obra. Assim, a empresa faz a segregação dos resíduos que são destinados de acordo com o tipo: os resíduos classe A são doados para reaproveitamento, resíduos classe B são geralmente doados para reciclagem, os que não conseguem ser reaproveitados ou reciclados são coletados por uma empresa terceirizada e os metais são vendidos ao ferro velho, com esse dinheiro são recompensados os funcionários com melhor desempenho de redução de resíduos.

Entretanto, as políticas de redução são muito particulares de cada empresa e nem sempre a geração de resíduos sólidos é de fato vista como um problema. No decorrer das entrevistas algumas empresas alegaram por exemplo, que a geração de RCC é inevitável e que não há como construir sem que haja desperdício durante as diversas etapas da construção.

Porém, segundo Guerra (2009): “A redução da quantidade de resíduo gerado assume três principais objetivos. O primeiro deles é a redução de custo com material, já que com essa diminuição necessariamente diminui a quantidade de material utilizado para executar a mesma tarefa. O segundo aspecto é que quanto menos resíduos for gerado, menos trabalho será necessário para gerenciar e tratar esse passivo, o que leva ao critério relacionado ao ganho ambiental, pois diminui a quantidade de resíduos a ser depositado no meio ambiente. O terceiro aspecto, está relacionado ao menor consumo de recursos naturais, uma vez que o retrabalho necessita do emprego de mais consumo do recurso natural para a mesma tarefa.”

Com isso mais uma vez se faz necessário frisar que a melhor política de gerenciamento é a não geração de resíduos e a segunda é a redução da produção dos

RCC e RCD, pois a sua geração implicará em medidas paliativas e gerará custos à obra mesmo que a opção seja a reciclagem ou o reaproveitamento.

Já quanto aos principais motivos responsáveis pelo volume de RCC nas obras, nota-se que 60% das empresas apontaram a qualificação da mão de obra como responsável pelo volume de RCC gerado. Em segundo, com 40%, observa-se as mudanças de última hora seguidas da falta de padronização nas atividades e falta de planejamento na fase de projetos, ambas com percentual de 30%.

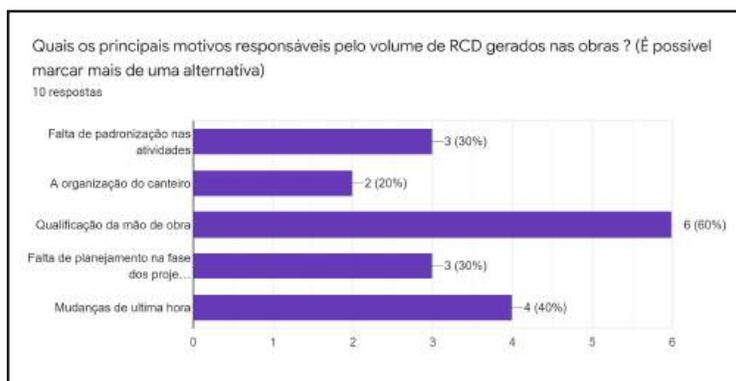


Figura 5 - Motivos Responsáveis Pelo Volume de RCD Gerados nas Obras

As empresas deram ênfase ao treinamento e capacitação dos funcionários como procedimento essencial para a redução na geração. Essa constatação corrobora com Garcia Meseguer (1991) que afirma que "(...) o desperdício em função da mão-de-obra ocorre devido baixa qualificação dos operários e principalmente pela falta de uma política de recursos humanos, onde estes erros poderiam ser combatidos com medidas adequadas do gerenciamento da qualidade com base nos componentes de fator humano, formação, informação, comunicação e motivação."

Para Corneli (2009), as ações educativas aplicadas diretamente no canteiro de obras, como explicar a classificação dos RCC, a importância da segregação, bem como suas técnicas e informar a possibilidade de reutilização dos resíduos na própria obra, podem ser tomadas para diminuir consideravelmente a geração de RCC.

Um fato interessante, também apontado como motivo da geração de grandes volumes, foi a aquisição excessiva de material, muitas vezes superestimada na fase de planejamento e projetos, que causa a falta de preocupação com o desperdício já que há mais material do que o suficiente. Segundo John (2000, p. 20) é na etapa de construção que as perdas se tornam visíveis, pois nesta fase as decisões tomadas sobre o planejamento e projeto ganham dimensão física.

Quanto ao que é feito com os resíduos gerados, todas as empresas declararam que contratam serviço terceirizado para a coleta e destinação final, em conformidade com a CONAMA. Além disso, a Figura 6 representa a porcentagem de empresas que afirmam ter

conhecimento do destino dos resíduos de suas obras.

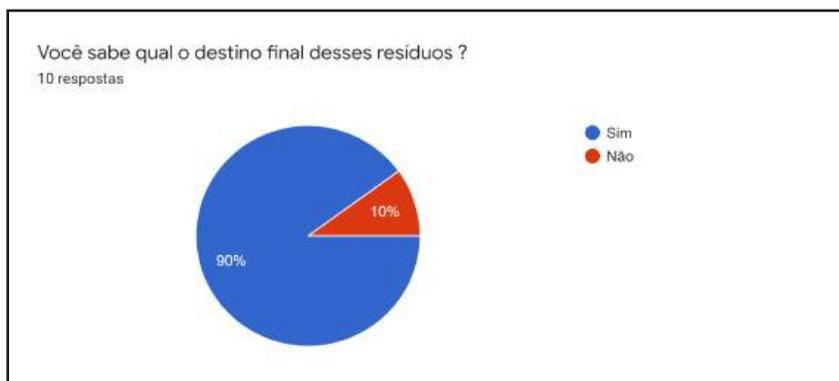


Figura 6: Percentual das empresas que conhecem o destino final dos resíduos

Pode-se então observar que 90% dos entrevistados afirmaram que as empresas têm conhecimento do destino dado aos RCC gerados nas obras, muito embora, quando perguntados sobre quais eram os destinos, a grande maioria dos entrevistados não soube apontar de forma específica qual a locação final.

Alegou-se, no entanto, que a falta de informação quanto a destinação final dos resíduos deve-se ao fato de que outros setores, como logística e qualidade, são responsáveis por esse tipo de controle, ou seja, mesmo que a grande maioria das instituições garantam ter controle do direcionamento dos RCC, essa informação não é de conhecimento de todos os funcionários das diferentes áreas envolvidas na execução de obras.

Assim, fica claro que mesmo que a disposição desses resíduos seja feita de forma correta, a ausência de políticas e divulgação das informações referentes ao gerenciamento de resíduos dentro das empresas faz com que essas informações não sejam de conhecimento de todos, restringido o conhecimento e conscientização apenas às pessoas diretamente envolvidas no processo de descarte.

Entre as opções de disposição adotadas na cidade de São Luís, pode-se identificar: o aterro sanitário Titara (localizado em bacabeira), pontos de coleta como os Ecopontos, incineração, ferro velho e até mesmo doação de resíduos classe B para reciclagem e projetos sociais.

No que se refere as dificuldades de descarte adequado, as principais dificuldades encontradas para o descarte adequado e as maiores causas para o depósito irregular de RCC apresentadas pelas empresas, foram:

- Falta de planejamento;
- Falta de informação por parte dos geradores formais e informais;
- Fiscalização ineficiente;
- Custo elevado de uma destinação adequada;

- Falta de incentivo fiscal por parte do poder público;

No entanto, apesar da maior parte das empresas entrevistadas dar um destino adequado aos RCC, no município de São Luís, ainda vemos a disposição incorreta dos resíduos em incontáveis pontos da cidade. Para Lima e Tamai (1998 apud CASSA et al., 2001), a maior parte desse resíduo é gerado pelo setor informal da construção (pequenas reformas, autoconstrução, ampliações). Estima-se que apenas um terço do entulho seja gerado pelo setor formal, ou seja, pela indústria da construção civil.

Sendo assim além da conscientização das empresas, é indispensável a conscientização popular. Essa, por sua vez, se dá através intervenção do poder público, tanto por meio do desenvolvimento de políticas para conscientizar e informar a população, quanto a partir do fornecimento de alternativas eficientes de descarte, coleta e reaproveitamento.

Por fim, independentemente dos resíduos de pequenos geradores, as empresas de construção civil não devem se abster da responsabilidade de pregar as boas práticas e reduzir os impactos causados pela geração de resíduos comprovadamente majoritária dessa categoria por meio do incentivo a sustentabilidade dentro da construção.

## 4 | CONCLUSÃO

De acordo com o trabalho realizado foi possível identificar que os principais tipos de resíduos gerados nos empreendimentos em São Luís são, em sua maior parte, resíduos derivados do concreto (classe A) e classe B (madeiras, plástico etc.) que se encaixam como resíduos reaproveitáveis ou recicláveis. Pode-se conhecer também a política de gerenciamento desses resíduos e que apesar de a maioria das empresas possuírem políticas de reaproveitamento e segregação, isso ainda não é uma regra.

Além disso, pode ser observado que a maioria das empresas investe mais em políticas de reaproveitamento e na contratação de terceirizadas para se responsabilizar com o destino final dos resíduos, do que na redução da geração de resíduos nas obras, que se mostra ainda o principal motivo da quantidade de volume obtido.

Portanto, ainda há bastante espaço para melhorias e implantações de políticas mais eficientes dentro das construtoras visando minimizar todos os impactos negativos causados pelos resíduos depois de gerados e o custo econômico e ambiental.

Quanto às dificuldades e desafios encontrados pelas empresas no descarte adequado dos RCC destacam-se o custo e a falta de incentivo fiscal por parte do poder público. Isso se mostrou ser algo unânime tanto nas empresas pequenas quanto grandes. O que nos leva a perceber que as empresas ainda encaram o descarte correto como despesa e prejuízo, não percebendo que uma política mais eficiente, com investimento em planejamento, capacitação, entre outras medidas para a redução desses resíduos, reduziria esse gasto.

Ademais, é possível observar que gerenciamento de resíduos de construção civil por empresas no município de São Luís ainda é muito tímido. Considerando a velocidade de crescimento da cidade em relação ao quantitativo e a dimensão das obras, o assunto

de gerenciamento de resíduos pede mais atenção e ações urgentes, principalmente ações por parte dos órgãos fiscalizadores, para que seja cumprido, de fato, o que é de dever dos geradores de resíduos.

## REFERÊNCIAS

1. Almeida, Priscila Couto. **Construção dos Bairros da VII Região Administrativa de São Cristóvão da Cidade do Rio de Janeiro e Seu Desenvolvimento Urbano: Uma Reflexão. Projeto de Graduação.** Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2013
2. Carneiro, A. P. **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção.** 1.ed EDUFBA. Salvador. 2001 Constru%C3%A7%C3%A3oDemoli%C3%A7%C3%A3o.pdf. Acesso 21/08/2018.
3. CASSA et al. **Diagnóstico Dos Setores Produtores De Resíduos Na Região Metropolitana De Salvador/Bahia.** Entulho Bom. Salvador. 2001.
4. CONAMA. **Resolução 307, de 05 de julho de 2002. Dispõe sobre a gestão dos resíduos da construção civil.** Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 2002. Seção 1, p. 95-96. 2002
5. Corneli, V. M. **Análise da Gestão de Resíduos da Construção e Demolição no Município de Campo Mourão/Paraná.** Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana. Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2009.
6. John, W. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2000.
7. Marques Neto. **Gestão dos Resíduos de Construção e Demolição.** São Carlos: Rima. São Carlos. 2005.
8. Mendes, Claudiceia, **Diagnóstico do Aproveitamento dos Resíduos da Construção Civil em São Luís - MA,** Universidade Federal do Maranhão. São Luís. 2014.
9. Meseguer, Alvaro Garcia. **Controle e Garantia da Qualidade na Construção.** Sindusconsp. São Bernado do Campo. 1991.
10. Nagalli, André. **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil.** Oficina de Textos. São Paulo 2014.
11. Prefeitura De São Paulo. **Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Cidade de São Paulo.** Prefeitura de São Paulo. São Paulo. 2014.

**JOÃO DALLAMUTA** - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre em engenharia elétrica pela UEL. Doutorando em Engenharia Espacial pelo INPE.

**HENRIQUE AJUZ HOLZMANN** - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

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

[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br) 

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

[www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br) 

# ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica  
e telecomunicações 2

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

[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br) 

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

[www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br) 