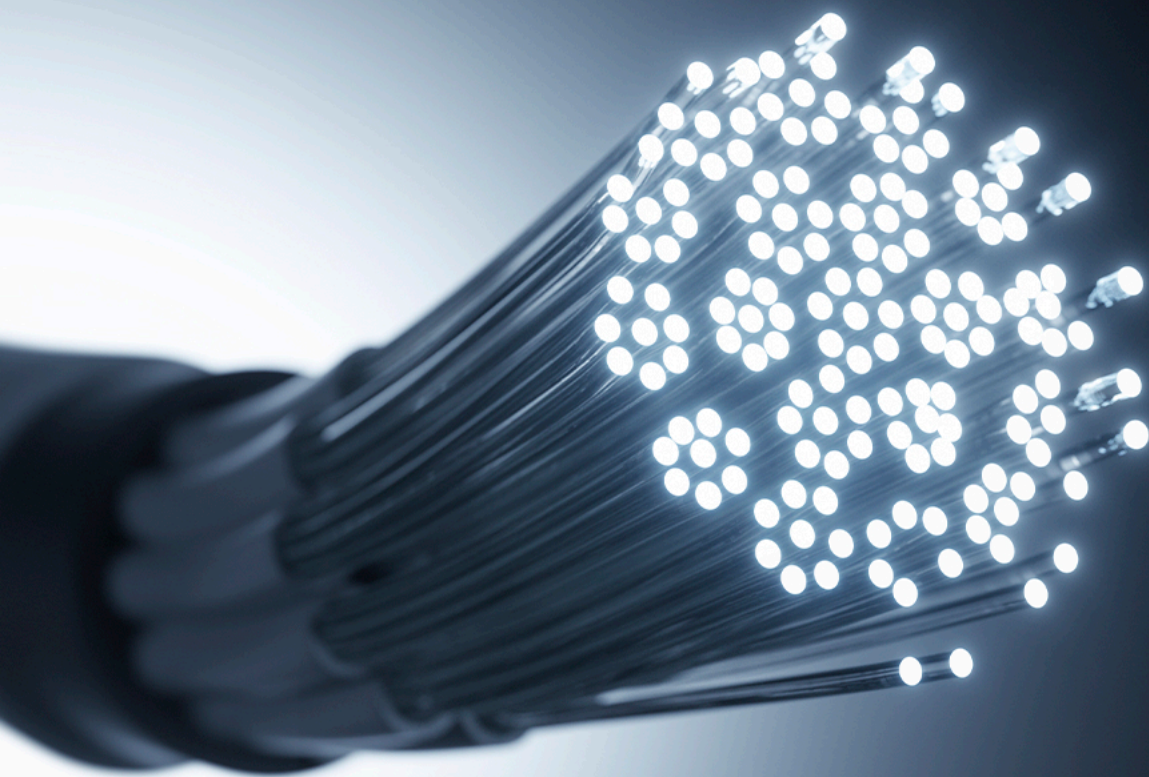


COLEÇÃO
DESAFIOS
DAS
ENGENHARIAS:

ENGENHARIA ELÉTRICA

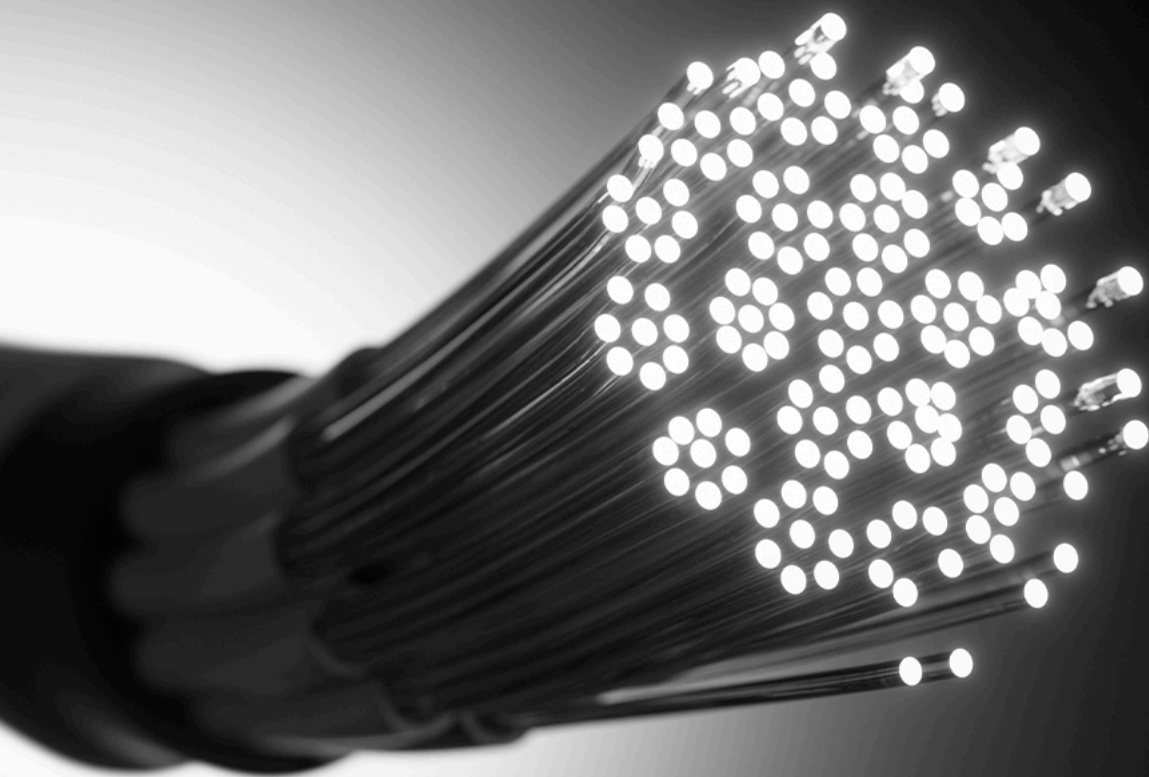


LILIAN COELHO DE FREITAS
(ORGANIZADORA)

Atena
Editora
Ano 2021

COLEÇÃO **DESAFIOS** DAS **ENGENHARIAS:**

ENGENHARIA ELÉTRICA



LILIAN COELHO DE FREITAS
(ORGANIZADORA)

Atena
Editora
Ano 2021

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes editoriais

Natalia Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 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 Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná

Prof. Dr. Américo Junior Nunes da Silva – Universidade do Estado da Bahia

Profª Drª Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília

Prof. Dr. Arnaldo Oliveira Souza Júnior – Universidade Federal do Piauí
 Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense
 Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense
 Prof^a Dr^a Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
 Prof. Dr. Daniel Richard Sant'Ana – Universidade de Brasília
 Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
 Prof^a Dr^a Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo
 Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá
 Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará
 Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
 Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros
 Prof. Dr. Humberto Costa – Universidade Federal do Paraná
 Prof^a Dr^a Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice
 Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador
 Prof. Dr. José Luis Montesillo-Cedillo – Universidad Autónoma del Estado de México
 Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
 Prof^a Dr^a Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
 Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
 Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
 Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
 Prof^a Dr^a Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
 Prof. Dr. Miguel Rodrigues Netto – Universidade do Estado de Mato Grosso
 Prof. Dr. Pablo Ricardo de Lima Falcão – Universidade de Pernambuco
 Prof^a Dr^a Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Prof^a Dr^a Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
 Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares – Universidade Federal do Piauí
 Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
 Prof^a Dr^a Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
 Prof^a Dr^a Vanessa Ribeiro Simon Cavalcanti – Universidade Católica do Salvador
 Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
 Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
 Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
 Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
 Prof^a Dr^a Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
 Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof^a Dr^a Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
 Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
 Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
 Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
 Prof^a Dr^a Gírlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
 Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
 Prof. Dr. Jayme Augusto Peres – Universidade Estadual do Centro-Oeste
 Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
 Prof^a Dr^a Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
 Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
 Prof^a Dr^a Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
 Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
 Prof^a Dr^a Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Fernanda Miguel de Andrade – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Vanessa da Fontoura Custódio Monteiro – Universidade do Vale do Sapucaí
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Welma Emidio da Silva – Universidade Federal Rural de Pernambuco

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie
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
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
 Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
 Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
 Profª Drª 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
 Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
 Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
 Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
 Prof. Dr. Sidney Gonçalves de Lima – Universidade Federal do Piauí
 Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Linguística, Letras e Artes

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
 Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro
 Profª Drª Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
 Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará
 Profª Drª Edna Alencar da Silva Rivera – Instituto Federal de São Paulo
 Profª Drª Fernanda Tonelli – Instituto Federal de São Paulo,
 Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
 Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
 Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
 Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
 Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
 Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Coleção desafios das engenharias: engenharia elétrica

Diagramação: Maria Alice Pinheiro
Correção: Flávia Roberta Barão
Revisão: Os autores
Organizadora: Lilian Coelho de Freitas

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
C691	<p>Coleção desafios das engenharias: engenharia elétrica / Organizadora Lilian Coelho de Freitas. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-5983-260-6 DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.606212207</p> <p>1. Engenharia elétrica. I. Freitas, Lilian Coelho de (Organizadora). II. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD 621.3</p>
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

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

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

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

DECLARAÇÃO DA EDITORA

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

APRESENTAÇÃO

A Engenharia Elétrica é um dos ramos mais abrangentes da Engenharia, pois envolve praticamente tudo o que fazemos em nosso dia a dia. Engloba desde sistemas de potência, geração de energia, conversão eletromecânica de energia, eletrônica, telecomunicações, até engenharia biomédica, sistemas digitais e computadores, controle, automação e robótica. É considerada uma área transdisciplinar e versátil, a qual passa por constantes desafios, conforme cresce a demanda por sistemas mais econômicos e eficientes.

Nesse contexto, o e-book “*Coleção Desafios das Engenharias: Engenharia Elétrica*” apresenta uma seleção de 12 artigos que discutem trabalhos e pesquisas desenvolvidos por professores e acadêmicos de várias regiões do Brasil, tendo como base uma teoria bem fundamentada nos resultados práticos nesta área tão promissora.

Este volume aborda temas envolvendo inteligência computacional, para projeto de controladores e manutenção preditiva de máquinas elétricas; fluxo de carga em sistemas elétricos de potência; sistemas fotovoltaicos; fontes de energia alternativas renováveis; segurança de instalações elétricas; tratamento térmico de resíduos, entre outras. Dessa forma, esta obra contribuirá para aprimoramento do conhecimento de seus leitores e servirá de base referencial para futuras investigações.

A todos, uma ótima leitura!

Lilian Coelho de Freitas

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

A MANUTENÇÃO PREDITIVA NA ANÁLISE DE AVARIAS EM ROLAMENTOS, UTILIZANDO ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Fábio Muniz Mazzoni

André da Silva Barcelos

Antonio J. Marques Cardoso

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122071>

CAPÍTULO 2..... 15

MÉTODOS MATEMÁTICOS DE MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO: LÓGICA FUZZY

Joelson Lopes da Paixão

Alzenira da Rosa Abaide


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122072>

CAPÍTULO 3..... 39

UM ESTUDO SOBRE A ANÁLISE E PROJETO DE CONTROLADORES FUZZY

Géferson Rodrigo Sabino Silva

Wallysonn Alves de Souza

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122073>

CAPÍTULO 4..... 47


FLUXO DE CARGA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA – UM ESTUDO DE CASO USANDO A LINGUAGEM AMPL

Hugo Andrés Ruiz Flórez

Diogo Marujo

Gloria Patricia Lopez Sepulveda

Alexander Molina Cabrera

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122074>

CAPÍTULO 5..... 62

ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DE BRIQUETES DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS SUBMETIDOS A PIRÓLISE

Victória Oliveira Diaz de Lima

Matheus de Paula Gonçalves

Débora Hungaro Micheletti

Fernanda Bach Gasparin

Amanda de Araújo Drago

Aline Bavaresco dos Santos

Adriana Ferla de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122075>

CAPÍTULO 6..... 73

ESTUDO DE IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA NO CAMPUS UFRPE - UACSA

Reinel Beltrán Aguedo

Paula de Tarsia Borba de França

Ania Lussón Cervantes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122076>

CAPÍTULO 7..... 86


INTEGRAÇÃO DE FONTES ALTERNATIVAS RENOVÁVEIS DE ENERGIA COM RESTABELECIMENTO OTIMIZADO PARA O AGRONEGÓCIO

Eloi Rufato Junior

Bruno Dias Camargo

Elison de Souza Moreira

Felipe de Souza Kalume

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122077>

CAPÍTULO 8..... 116

MEDIDOR DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Bruno Tiago Carneiro Moraes

Felipe Cléber Silveira


Averton da Silva Portigo

Daniel Soares de Souza

Rafael José Fonseca Barbosa

Franciani Diniz Branco

Marcus Vinícius O. Braga

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122078>

CAPÍTULO 9..... 120

FILTRO DE MICROFITA DE BANDA LARGA COM GEOMETRIA ELÍTICA

Paulo Fernandes da Silva Júnior

Ewaldo Eder Carvalho Santana

Paulo Henrique Bezerra de Carvalho


Danilo Diniz Meireles

Francarll Oliveira Moreno

Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira

Pedro Carlos de Assis Júnior

Raimundo Carlos Silvério Freire

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.6062122079>

CAPÍTULO 10..... 135

TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS DE PODA URBANA


Eveline Trindade

Maristela Furman

Aline Bavaresco dos Santos

Dilcemara Cristina Zenatti

Adriana Ferla de Oliveira


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.60621220710>

CAPÍTULO 11 143

SEGURANÇA DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS EM EMPRESAS TERCEIRIZADAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Anderson Francisco Kaiser

Marcos Hister Pereira Gomes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.60621220711>

CAPÍTULO 12 158

REDUCTION OF THE ECOLOGICAL IMPACT OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS WHEN USING SILICONE LIQUID IN THE PROVINCE OF ICA - 2013

Primitivo Bacilio Hernández Hernández


Omar Michael Hernández García

Aníbal Bacilio Hernández García

Jessenia Leonor Loayza Gutiérrez

Walter Merma Cruz

Edward Paul Sueros Ticona

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.60621220712>

SOBRE A ORGANIZADORA 170

ÍNDICE REMISSIVO 171

FLUXO DE CARGA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA – UM ESTUDO DE CASO USANDO A LINGUAGEM AMPL

Data de aceite: 01/07/2021

Data da submissão: 03/06/2021

Hugo Andrés Ruiz Flórez

Universidade Tecnológica Federal do Paraná -
UTFPR
Medianeira – PR
<http://lattes.cnpq.br/1231733785708599>

Diogo Marujo

Universidade Tecnológica Federal do Paraná -
UTFPR
Medianeira – PR
<http://lattes.cnpq.br/0507143597634871>

Gloria Patricia Lopez Sepulveda

Faculdade de Ensino Superior de São Miguel
do Iguaçu - Uniguaçu
São Miguel do Iguaçu – PR
<http://lattes.cnpq.br/8402032745107959>

Alexander Molina Cabrera

Universidad Tecnológica de Pereira - UTP
Pereira – Colômbia
<https://orcid.org/0000-0003-2448-2174>

RESUMO: As análises de fluxo de carga podem ser executadas através da implementação computacional do método de Newton-Raphson usando uma linguagem de programação específica ou por meio de softwares comerciais ou gratuitos desenvolvidos exclusivamente para realizar estudos em Sistemas Elétricos de Potência. Contudo, existe uma importante alternativa de solução que tem sido raramente

explorada e consiste em representar o problema de fluxo de carga como sendo um modelo de otimização matemática. Esta alternativa de solução não só permite resolver o problema de fluxo de carga através de um software de modelagem algébrica, como também, facilita a resolução de outros problemas de maior complexidade matemática com certa facilidade ao realizar adaptações no modelo matemático. Assim sendo, neste trabalho será usada a linguagem AMPL junto com o solver Knitro para resolver o problema de fluxo de carga em Sistemas de Potência. Para isto, será considerado um estudo de caso que consiste na determinação do ponto de operação de um sistema-teste. Nos resultados são apresentados detalhadamente os principais aspectos que devem ser considerados para poder usar a linguagem AMPL como solução do problema de fluxo de carga. Os resultados obtidos indicam primeiramente que, podem ser realizados estudos de fluxo de carga ao representar o problema mediante o uso de modelagem matemática e, em segundo lugar, que é possível solucionar satisfatoriamente o problema usando um dos principais softwares de otimização matemática, como é o caso do AMPL.

PALAVRAS - CHAVE: Fluxo de Carga, Sistemas Elétricos de Potência, Otimização Matemática, AMPL, Solver Knitro.

ELECTRICAL POWER SYSTEM LOAD FLOW – A CASE STUDY USING THE AMPL LANGUAGE

ABSTRACT: Load flow studies can be executed by the computational implementation of the

Newton-Raphson method developed for a specific programming language or by commercial and free software developed to perform electrical power system analysis. Nevertheless, there is an alternative solution that solves the load flow problem as a mathematical optimization problem. This alternative approach allows to solve the load flow problem using a mathematical optimization software, and enables the solution of other more complex mathematical problems with relative ease by modifying the mathematical model. Thereby, we use the AMPL language and Knitro solver to model and solve the Power System Load Flow problem. Thus, a case study that consists in determining the operating point of a test-system is considered. The main factors that must be considered for using the AMPL language as a solution to the load flow problem are presented in detail. The results obtained highlight that the load flow analysis can be performed using mathematical modeling, and, it is possible to successfully solve the load flow problem using one of the main mathematical optimization software, such as, the AMPL language.

KEYWORDS: Load flow, Eletrical Power Systems, Mathematical Optimization, AMPL Language, Knitro Solver.

1 | INTRODUCCIÓN

O cálculo do ponto de operação de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) em regime permanente é uma tarefa fundamental que deve ser realizada pelos centros de controle de energia dos SEP com o intuito de verificar que o mesmo opere dentro dos limites operativos estabelecidos. Assim, uma vez conhecida a topologia do SEP, seus componentes e para uma condição operativa específica, o ponto de operação pode ser estimado mediante o cálculo das variáveis de estado (módulos e os ângulos das tensões nas barras).

Tradicionalmente, o problema de fluxo de carga tem sido resolvido através do método Newton-Raphson (MONTICELLI, 1983). Este método caracteriza-se por calcular de maneira satisfatória o ponto de operação de um SEP usando um procedimento iterativo para resolver um conjunto de equações não-lineares.

De forma geral, existem duas alternativas para resolver o problema de fluxo de carga em SEP. A primeira delas consiste na implementação computacional do método de Newton-Raphson usando uma linguagem de programação específica (Matlab, C++, Python, entre outras). E a segunda alternativa consiste em fazer uso de softwares privativos ou gratuitos, tais como, ANAREDE, PowerWorld, MATPOWER, DigSilent, PSAT, entre outros (TAMASHIRO, 2016). No entanto, existe uma alternativa de solução que consiste em representar o problema de fluxo de carga como sendo um modelo de otimização matemática. A principal vantagem desta alternativa de solução consiste em, além de resolver o problema de fluxo de carga, poder realizar com certa facilidade algumas adaptações no modelo matemático, de tal forma que, seja possível resolver outros problemas da área dos SEP. Além disso, esses modelos de otimização matemática podem ser resolvidos por softwares de modelagem algébrica amplamente usados em SEP (GAMS, Lingo, Pyomo, AMPL, entre outros).

Neste trabalho, será usada a linguagem AMPL junto com o solver Knitro para realizar estudos convencionais de fluxo de carga em SEP. Para essa finalidade, será considerado um modelo matemático adaptado das análises de fluxo de carga ótimo (MADANI, 2015) e será realizado um estudo de caso que compreende a determinação do ponto de operação de um sistema-teste disponível em Glover (2011). Os resultados obtidos através do AMPL são comparados com os resultados entregues pelo software PowerWorld.

Em síntese, os resultados obtidos mostram que a linguagem AMPL pode ser usada para realizar estudos convencionais de fluxo de carga em SEP.

2 | LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO AMPL

AMPL é uma linguagem de modelagem algébrica de alto nível usada para solucionar problemas complexos de programação matemática e de grande escala (FAVERO, 2013). Esta importante ferramenta matemática foi desenvolvida por Fourier et al. (1985) e surgiu como uma necessidade computacional de expressar de uma forma mais simples os modelos de otimização matemática, de modo que, estes possam ser interpretados pela maioria dos softwares matemáticos, conhecidos como *solvers*. Basicamente, o AMPL é uma interface simples que facilita a comunicação entre o usuário e o solver (FAVERO, 2013).

Uma das grandes vantagens da linguagem AMPL consiste em expressar de uma forma simples os modelos de otimização matemática através de uma sintaxe computacional bem próxima à usada na linguagem matemática (OLSZAK, 2018). Consequentemente, esta condição permite que os modeladores possam investir mais o tempo melhorando os modelos matemáticos do que lidando com a sua sintaxe e solução (HOLMES, 1992).

Atualmente, existem várias versões disponíveis do AMPL que podem ser executadas em diferentes plataformas como Windows, Linus e macOS. A primeira delas é a versão demo que se encontra disponível junto com alguns solvers (Knitro, CPLEX, entre outros) de forma gratuita no site <https://ampl.com/> e permite resolver problemas com até 300 variáveis e 300 restrições para problemas de Programação Linear e 500 variáveis e 500 restrições para problemas de Programação Não Linear. Por sua vez, a versão privativa não possui limites de variáveis nem restrições e disponibiliza uma maior quantidade de solvers.

Certamente, estas características justificam os motivos pelos quais o AMPL vem sendo usado recentemente na resolução de diversos problemas na Engenharia. Nesse contexto, a seguir serão apresentados os principais aspectos que devem ser seguidos para poder resolver um problema de otimização matemática usando a ferramenta AMPL.

2.1 Resolução de modelos matemático no AMPL

Existem diferentes formas que podem ser usadas para obter a solução de um modelo matemático usando o AMPL. Uma das mais usadas consiste em criar três arquivos de texto com extensões **.mod**, **.dat** e **.run**, os quais contêm a definição do modelo matemático, os dados de entrada e o arquivo principal com os comandos a serem executados,

respectivamente. Entretanto, é possível usar os arquivos **.dat** e **.run** para resolver os modelos matemáticos. No caso deste último arquivo, pode ser usado como referência o layout mostrado na Figura 1.

```
reset;
model;
# *****
# Declaração dos Conjuntos (set nome_conjunto;)

# *****
# Declaração dos Parâmetros (param nome_parâmetro;)

# *****
# Dados de Entrada (data nome_arquivo;)

# *****
# Declaração das Variáveis (var nome_variável;)

# *****
# Definição da Função objetivo (minimize nome_função:)

# *****
# Definição das Restrições (subject to nome_restrição:)

# *****
# Solução do modelo matemático (option solver nome_solver;)

# *****
# Saída dos resultados
```

Figura 1 – Layout do arquivo **.run** usado como referência

Fonte: Autoria própria

Conforme a Figura 1, destaca-se que os comandos **reset** e **model** são usados para apagar da memória as informações de modelos anteriores e para ativar o modo modelo, respectivamente. Além disso, por simplicidade, o modelo matemático pode ser dividido em várias etapas e definido de forma sequencial.

Nas próximas seções será mostrado em detalhe como pode ser modificado o layout anterior, de tal forma que, seja possível representado o modelo matemático do problema de fluxo de carga.

3 | MÉTODO DE NEWTON RAPHSON

De uma forma geral, o método de Newton-Raphson determina os valores das tensões complexas (V , θ) que satisfazem as equações de balanço de potências nas barras

do SEP:

$$P_i^G - P_i^D - P_i(V, \theta) = 0 \quad (1)$$

$$Q_i^G - Q_i^D - Q_i(V, \theta) = 0 \quad (2)$$

Sendo que P_i^G , Q_i^G são as potências ativas e reativas geradas; P_i^D , Q_i^D são as demandas de potência ativa e reativa; $P_i(V, \theta)$, $Q_i(V, \theta)$ são as injeções de potência ativa e reativa na barra i .

De acordo com o anterior, o método de Newton-Raphson permite estimar os valores das tensões complexas (V , θ), a partir dos dados das potências ativas e reativas (geração e demanda) das diferentes barras provenientes de um ponto de operação específico do SEP. Logo, o sistema de equações apresentado em (1) e (2) é solucionado de forma aproximada, de tal forma que através de um processo iterativo na iteração k tem-se:

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^G - P_i^D - P_i^{(k)}(V^{(k)}, \theta^{(k)}) \approx 0 \quad (3)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^G - Q_i^D - Q_i^{(k)}(V^{(k)}, \theta^{(k)}) \approx 0 \quad (4)$$

Destacando que o número de equações necessário para resolver o sistema de equações anterior dependerá do tipo de barra do SEP: Barra de referência (V , θ), barra de tensão controlada (PV) e barra de carga (PQ). Consequentemente, para determinar os valores das tensões do SEP deve ser usada a seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} \theta^{(k+1)} \\ V^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^{(k)} \\ V^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \theta^{(k)} \\ \Delta V^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^{(k)} \\ V^{(k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H(V^{(k)}, \theta^{(k)}) & N(V^{(k)}, \theta^{(k)}) \\ M(V^{(k)}, \theta^{(k)}) & L(V^{(k)}, \theta^{(k)}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Onde H , N , M e L pertencem a matriz Jacobiana do sistema. Por último, o processo iterativo continua até satisfazer a convergência.

4 | MODELO MATEMÁTICO DO PROBLEMA DE FLUXO DE CARGA

Com base nos modelos matemáticos usados para solucionar o problema de Fluxo de Potencia Ótimo apresentados em MADANI, (2015) e o equacionamento do método de Newton-Raphson é possível usar o seguinte modelo de otimização não-linear para solucionar o problema de fluxo de carga:

$$\min P_L = \sum_{(i,j) \in \Omega L} g_{ij} (t_{ij}^2 V_i^2 + V_j^2 - 2t_{ij} V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij})) \quad (6)$$

s. a.

$$P_i^G - P_i^D - \sum_{(i,j) \in \Omega L} P_{ij} = 0, \quad \forall i \in \Omega B \quad (7)$$

$$Q_i^G - Q_i^D + Q_i^{sh} - \sum_{(i,j) \in \Omega L} Q_{ij} = 0 \quad \forall i \in \Omega B \quad (8)$$

$$\underline{Q_i^G} \leq Q_i^G \leq \overline{Q_i^G} \quad \forall i \in \Omega B \quad (9)$$

Sendo que:

- A função objetivo mostrada em (6) representa as perdas de potência ativa do SEP.
- As restrições (7) e (8) representam o balanço de potência ativa e reativa, onde os fluxos de potência ativa e reativa são calculados da seguinte forma:

$$P_{ij} = (t_{ij}V_i)^2 g_{ij} - t_{ij}V_iV_j (g_{ij}\cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) + b_{ij}\sin(\theta_{ij} + \varphi_{ij})) \quad (10)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2(t_{ij}^2 b_{ij} + b_{ij}^{sh}) + t_{ij}V_iV_j (b_{ij}\cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) - g_{ij}\sin(\theta_{ij} + \varphi_{ij})) \quad (11)$$

$$P_{ji} = V_j^2 g_{ij} - t_{ij}V_iV_j (g_{ij}\cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) - b_{ij}\sin(\theta_{ij} + \varphi_{ij})) \quad (12)$$

$$Q_{ji} = -V_j^2(b_{ij} + b_{ij}^{sh}) + t_{ij}V_iV_j (b_{ij}\cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) + g_{ij}\sin(\theta_{ij} + \varphi_{ij})) \quad (13)$$

- A restrição (9) corresponde os limites de geração de potencia reativa nas barras do SEP.

Importante salientar que na função objetivo do modelo matemático proposto pode ser usada a equação (14), que corresponde às perdas de potência reativa, sem que isto afete os resultados finais.

$$Q_L = - \sum_{(i,j) \in \Omega L} b_{ij} (t_{ij}^2 V_i^2 + V_j^2 - 2t_{ij}V_iV_j \cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij})) \quad (14)$$

Em síntese, embora o modelo matemático anterior seja usado para realizar estudos convencionais de fluxo de carga, o mesmo poderá sofrer alterações em função das especificidades dos estudos a serem realizados.

5 | ESTUDO DE CASO PROPOSTO

O procedimento que deve ser realizado para determinar o ponto de operação de um SEP através da linguagem AMPL será explicado através do sistema-teste disponível em (GLOVER, 2011), cujos resultados da análise de fluxo de carga obtidos com o software PowerWorld são apresentados na Figura 1.

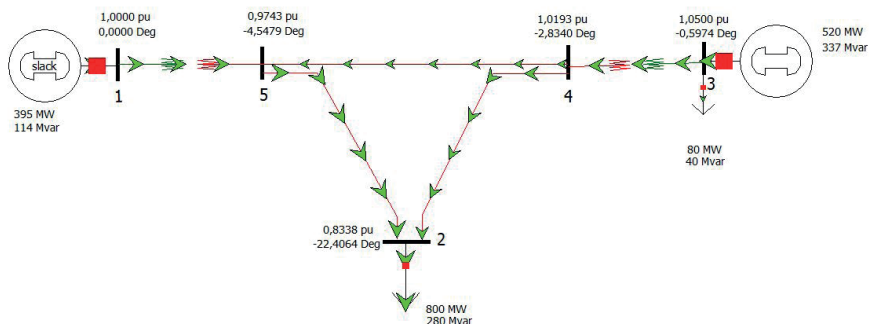


Figura 1 – Resultados do fluxo de carga usando o software PowerWorld

Fonte: Autoria própria

Os dados de entrada do sistema-teste necessários para realizar uma análise convencional de fluxo de carga são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

i	$Tipo$	P_i^{Gesp}	Q_i^{Gesp}	P_i^{Desp}	Q_i^{Desp}	V_i^{esp}	θ_i^{esp}	Q_i^{Gmin}	Q_i^{Gmax}	B_i^{sh}
1	$V\theta$	--	--	0,00	0,00	1,00	0,00	--	--	0,00
2	PQ	0,00	0,00	8,00	2,80	--	--	--	--	0,00
3	PV	5,20	--	0,80	0,40	1,05	--	-2,80	4,00	0,00
4	PQ	0,00	0,00	0,00	0,00	--	--	--	--	0,00
5	PQ	0,00	0,00	0,00	0,00	--	--	--	--	0,00

Tabela 1 – Dados de entrada referente às barras do sistema-teste
Fonte: Modificado de Glover, 2011

i	j	r_{ij}	x_{ij}	b_{ij}	t_{ij}
1	5	0,00150	0,0200	0,0000	1,0000
3	4	0,00075	0,0100	0,0000	1,0000
2	4	0,00900	0,1000	1,7200	1,0000
2	5	1,00450	0,0500	0,8800	1,0000
4	5	0,00225	0,0250	0,4400	1,0000

Tabela 2 – Dados de entrada referente às LT e transformadores do sistema-teste
Fonte: Modificado de Glover, 2011

Com base nos dados anteriores e considerando o equacionamento do modelo de otimização matemática do problema de fluxo de carga apresentado na Seção 4, são descritos a seguir os principais aspectos para obter a solução do problema usando a linguagem de programação matemática AMPL.

5.2 Dados de entrada

As informações do sistema-teste apresentadas nas Tabelas 1 e 2 podem ser inseridas em um arquivo de texto como mostrado na Figura 2.

```

param:  OB: TB  PG_esp  QG_esp  PD_esp  QD_esp  V_esp      Th_esp  Qmin  Qmax  Bsh:=
        1  1  0        0        0        0        1        0      -999  999   0
        2  0  0        0        8        2.8      1        0        0    0    0
        3  2  5.2      0        0.8      0.4      1.05      0      -2.8  4.0   0
        4  0  0        0        0        0        1        0        0    0    0
        5  0  0        0        0        0        1        0        0    0    0
;

param:  OL: r          x          b          t:=
        1  5  0.00150    0.0200    0.0000    1.0000
        3  4  0.00075    0.0100    0.0000    1.0000
        2  4  0.00900    0.1000    1.7200    1.0000
        2  5  0.00450    0.0500    0.8800    1.0000
        4  5  0.00225    0.0250    0.4400    1.0000
;

```

Figura 2 – Dados entrada do sistema-teste

Fonte: Autoria própria

Cabe salientar que, os dados numéricos que não foram especificados na Tabela 1 correspondem às incógnitas do problema de fluxo de carga (exceto os valores de Q_i^{Gmin} e Q_i^{Gmax} do barramento $V\theta$). Portanto, estes valores podem ser definidos conforme apresentados anteriormente na Figura 2.

5.3 Definição de conjuntos e parâmetros

Pode-se apreciar na base de dados do sistema-teste que alguns parâmetros fazem referência aos barramentos do sistema-teste, enquanto que, outros parâmetros fazem referência às linhas de transmissão. Por tal motivo, faz-se necessário definir os conjuntos e parâmetros mostrados na Figura 3.

Adicionalmente, de acordo com a formulação do modelo matemático proposto, faz-se necessário definir e calcular os valores das condutâncias e as susceptâncias das LT. Esse procedimento pode ser realizado depois de importar os dados da base de dados conforme é mostrado na Figura 4.

```

# ****
# Declaração dos Conjuntos (set nome_conjunto;)
# ****
set OB;           #Conjunto de Barras do sistema
set OL within {OB,OB}; #Conjunto de linhas do sistema
# ****
# Declaração dos Parâmetros (param nome_parâmetro;)
# ****
# Parâmetros das barras com valores definidos na base de dados
param TB{OB};      #Tipo de barra (1 slack; 0 PQ; 2 PV)
param PG_esp{OB};  #Potência ativa gerada especificada
param QG_esp{OB};  #Potência reativa gerada especificada
param PD_esp{OB};  #Potência ativa demanda especificada
param QD_esp{OB};  #Potência reativa demandada especificada
param V_esp{OB};   #Módulo da tensão especificada
param Th_esp{OB};  #Ângulo da tensão especificada
param Qmin{OB};    #Valor mínimo da potência reativa gerada
param Qmax{OB};    #Valor máximo da potência reativa gerada
param Bsh{OB};     #Susceptância shunt

# Parâmetros das linhas com valores definidos na base de dados
param r{OL};       #Resistência da LT
param x{OL};       #Reatância da LT
param bsh{OL};     #Susceptância da LT
param t{OL};       #Tap do transformador

```

Figura 3 – Declaração de conjuntos e parâmetros no AMPL

Fonte: Autoria própria

```

# ****
# Dados de Entrada (data nome_arquivo;)
# ****

data STEE5b.dat;

# ****
# Cálculo da conductância g e susceptância das LT
# ****

# Parâmetros condutância e susceptância das linhas
param g{OL};
param b{OL};

let {(i,j) in OL} g[i,j]:= r[i,j]/(r[i,j]^2 + x[i,j]^2);
let {(i,j) in OL} b[i,j]:= -x[i,j]/(r[i,j]^2 + x[i,j]^2);

```

Figura 4 – Cálculo das condutâncias e susceptâncias das LT

Fonte: Autoria própria

5.4 Definição das variáveis

De uma forma geral, as incógnitas do problema do modelo matemático proposto podem ser definidas como mostrado na Figura 5:

```
# *****  
# Declaração das Variáveis (var nome_variável;)  
# *****  
  
# Variáveis das barras  
var V{OB}; # Módulo das tensões nodais  
var Th{OB}; # Ângulo das tensões nodais  
var PG{OB}; # Potência ativa gerada  
var QG{OB}; # Potência reativa gerada  
var PD{OB}; # Potência ativa demandada  
var QD{OB}; # Potência reativa demandada  
  
# Variáveis das linhas  
var PL{OB,OB}; # Fluxo de potência ativa  
var QL{OB,OB}; # Fluxo de potência reativa
```

Figura 5 – Declaração das variáveis do problema

Fonte: Autoria própria

No entanto, cabe destacar que algumas destas variáveis são conhecidas em função do tipo de barramento. Portanto, na Figura 6 mostra-se como podem ser atribuídos os valores às variáveis cujos valores foram especificados inicialmente na base de dados do problema.

```
# *****  
# Variáveis com valores conhecidos  
# *****  
  
# Na barra de referência  
fix {i in OB : TB[i]==1} V[i]:= V_esp[i];  
fix {i in OB : TB[i]==1} Th[i]:= Th_esp[i];  
fix {i in OB : TB[i]==1} PD[i]:= PD_esp[i];  
fix {i in OB : TB[i]==1} QD[i]:= QD_esp[i];  
  
# Nas barras de tensão controlada  
fix {i in OB : TB[i]==2} V[i]:= V_esp[i];  
fix {i in OB : TB[i]==2} PG[i]:= PG_esp[i];  
fix {i in OB : TB[i]==2} PD[i]:= PD_esp[i];  
fix {i in OB : TB[i]==2} QD[i]:= QD_esp[i];  
  
# Nas barras de carga  
fix {i in OB : TB[i]==0} PG[i]:= PG_esp[i];  
fix {i in OB : TB[i]==0} QG[i]:= QG_esp[i];  
fix {i in OB : TB[i]==0} PD[i]:= PD_esp[i];  
fix {i in OB : TB[i]==0} QD[i]:= QD_esp[i];
```

Figura 6 – Variáveis do problema com valores especificados

Fonte: Autoria própria

5.5 Inicialização das variáveis de decisão

As tensões nodais podem ser inicializadas a partir dos dados de entrada como ilustrado na Figura 7.

```
# *****  
# Inicialização dos módulos e ângulos das tensões  
# *****  
  
let {i in OB} V[i]:= V_esp[i];  
let {i in OB} Th[i]:= Th_esp[i];
```

Figura 7 – Variáveis do problema com valores especificados

Fonte: Autoria própria

5.6 Definição do modelo matemático

O modelo matemático de otimização do problema de fluxo de carga proposto pode ser expresso através da função objetivo e as restrições apresentadas na Figura 8.

```
# *****  
# Definição da Função objetivo (minimize nome_função:)  
# *****  
  
minimize Perdas: sum{(i,j) in OL} g[i,j]*(t[i,j]^2*V[i]^2+V[j]^2-  
2*t[i,j]*V[i]*V[j]*cos(Th[i]-Th[j]));  
  
# *****  
# Definição das Restrições (subject to nome_restrrição)  
# *****  
  
subject to r1{i in OB}: PG[i]-PD[i]-sum{(i,j) in OL} PL[i,j]-  
sum{(j,i) in OL} PL[i,j]=0;  
  
subject to r2{i in OB}: QG[i]-QD[i]+Bsh[i]*V[i]^2-  
sum{(i,j) in OL} QL[i,j]-sum{(j,i) in OL} QL[i,j] = 0;  
  
subject to r3{(i,j) in OL}: PL[i,j]=(t[i,j]*V[i])^2*g[i,j]-t[i,j]*V[i]*V[j]*  
(g[i,j]*cos(Th[i]-Th[j])+b[i,j]*sin(Th[i]-Th[j]));  
  
subject to r4{(i,j) in OL}: QL[i,j]=-V[i]^2*(t[i,j]^2*b[i,j]+bsh[i,j])+t[i,j]*V[i]*V[j]*  
(b[i,j]*cos(Th[i]-Th[j])-g[i,j]*sin(Th[i]-Th[j]));  
  
subject to r5{(i,j) in OL}: PL[j,i]=V[j]^2*g[i,j]-t[i,j]*V[j]*V[i]*  
(g[i,j]*cos(Th[i]-Th[j])-b[i,j]*sin(Th[i]-Th[j]));  
  
subject to r6{(i,j) in OL}: QL[j,i]=-V[j]^2*(b[i,j]+bsh[i,j])+t[i,j]*V[j]*V[i]*  
(b[i,j]*cos(Th[i]-Th[j])+g[i,j]*sin(Th[i]-Th[j]));  
  
subject to r7{i in OB : TB[i]==1 || TB[i]==2}: Qmin[i] <= QG[i] <= Qmax[i];
```

Figura 8 – Definição da função objetivo e restrições

Fonte: Autoria própria

5.7 Solução do modelo matemático

Em virtude das características da formulação do problema de fluxo de carga deve ser escolhido um solver apropriado para resolver problemas de otimização não-linear. Neste caso, o solver Knitro pode ser usado para solucionar o modelo matemático do problema de fluxo de carga proposto. Assim sendo, em primeiro lugar deve ser escrita a instrução que indica o tipo de solver a ser usado e posteriormente, o nome da função objetivo que deve ser resolvida, tal como apreciado na Figura 9.

```
# *****  
# Solução do modelo matemático  
# *****  
  
option solver knitroampl;  
solve Perdas;
```

Figura 9 – Definição da função objetivo e restrições

Fonte: Autoria própria

5.8 Dados de saída

Na ferramenta AMPL é possível usar a função printf para imprimir os resultados seja no prompt de um sistema operativo ou em um arquivo de texto. Desta forma, na Figura 10 é apresentado o código usado para poder imprimir os resultados no prompt do Windows .

```
printf"*****  
printf"***** Resultados do fluxo de carga (p.u) *****  
printf"*****  
printf"\n";  
printf "%5s %7s %5s %9s %9s %9s %8s %9s %9s %11s \n",'i','TB','PGi','QGi',  
'PDi','QDi','Pi','Qi','Vi','Thi';  
for {i in OB}{  
    printf "%5d %6d %9.4f %9.4f %9.4f %9.4f %9.4f %9.4f %9.4f %10.4f \n",  
    i,TB[i],PG[i],QG[i],PD[i],QD[i],PG[i]-PD[i],QG[i]-QD[i],V[i],Th[i]*180/3.141592;  
}  
  
printf"\n";  
printf"\n";  
  
printf "%5s %6s %6s %9s %9s %9s %10s %9s \n",'i','j','Pij','Qij','Pji','Qji','PLij','QLij';  
for {(i,j) in OL}  
{  
    printf "%5d %6d %9.4f %9.4f %9.4f %9.4f %9.4f %9.4f \n",i,j,PL[i,j],QL[i,j],  
    PL[j,i],QL[j,i],PL[i,j]+PL[j,i],QL[i,j]+QL[j,i]+bsh[i,j]*(V[i]^2 + V[j]^2);  
}  
  
printf"\n";  
printf"\n";  
printf "Perdas do sistema (Soma das perdas nos trechos): Floss= %3.4f Qloss= %3.4f \n",  
    sum{(i,j) in OL} (PL[i,j]+PL[j,i]),sum{(i,j) in OL} (QL[i,j]+QL[j,i]+bsh[i,j]*  
    (V[i]^2 + V[j]^2));  
printf "Perdas do sistema (PG menos PD do sistema): Floss= %3.4f Qloss= %3.4f \n",  
    sum{(i in OB) (PG[i]-PD[i]),sum{(i in OB) (QG[i]+Bsh[i]*V[i]^2-QD[i]+  
    sum{(i,j) in OL} (bsh[i,j]*(V[i]^2+V[j]^2))};
```

Figura 10 – Código usado para apresentar os resultados

Fonte: Autoria própria

O código anterior permite obter os resultados das variáveis que pertencem aos conjuntos ΩB e ΩL , assim como, as perdas de potência do sistema. Cabe destacar que as perdas de potência foram calculadas de duas formas diferentes com o intuito de verificar que o ponto de operação do sistema tenha sido corretamente calculado.

5.9 Resolução do modelo matemático e apresentação dos resultados

Levando em consideração o exposto anteriormente, deve-se verificar que os arquivos necessários para poder realizar a simulação estejam contidos na mesma pasta de acordo com a Figura 11.






Nome	Tipo
 AMPL	Aplicativo
 cmd	Atalho
 knitroampl	Aplicativo
 STEE5b	Arquivo DAT
 FC_polar	Arquivo RUN

Figura 11 – Arquivos necessários para a resolução do modelo matemático

Fonte: Autoria própria

Onde os arquivos *AMPL* e *knitroampl* correspondem aos aplicativos que permitem executar o ambiente AMPL e o solver que será usado para resolver o problema, respectivamente. O arquivo *cmd* corresponde ao prompt do Windows. Por fim, os arquivos de texto *FC_polar.run* e *STEE5b.dat* correspondem ao arquivo principal e o arquivo com os dados do sistema-teste, respectivamente.

Por outro lado, para poder obter os resultados do modelo matemático proposto faz-se necessário escrever no prompt: *AMPL.exe FC_polar.run*. Dessa maneira, o AMPL retornará um resumo da resolução do modelo matemático proposto usando o Knitro (ver figura 12).

```

Problem Characteristics
=====
Objective goal: Minimize
Number of variables:      29
    bounded below:        0
    bounded above:        0
    bounded below and above: 2
    fixed:                0
    free:                 27
Number of constraints:    29
    linear equalities:     9
    nonlinear equalities:  20
    linear inequalities:    0
    nonlinear inequalities: 0
    range:                 0
Number of nonzeros in Jacobian: 109
Number of nonzeros in Hessian: 24

    Iter      Objective      FeasError      OptError      !!Step!!      CGIts
-----
    0      1.864512e-002      8.0000e+000      8.987e-009      5.529e-010      0
    6      3.483876e-001      1.044e-014      8.987e-009      5.529e-010      0

EXIT: Locally optimal solution found.

Final Statistics
=====
Final objective value      = 3.48387578413607e-001
Final feasibility error <abs / rel> = 1.04e-014 / 1.30e-015
Final optimality error <abs / rel> = 8.99e-009 / 6.43e-009
# of iterations            = 6
# of CG iterations         = 0
# of function evaluations  = 7
# of gradient evaluations  = 7
# of Hessian evaluations   = 6
Total program time (secs)  = 0.010 < 0.000 CPU time>
Time spent in evaluations (secs) = 0.000

```

Figura 12 – Informações da resolução do modelo matemático usando o solver Knitro

Fonte: Autoria própria

Como visto na Figura 12 aparecem algumas informações relacionadas com a resolução do modelo matemático, tais como, número de iterações, valor da função objetivo, tempo de cômputo, entre outras. Por outro lado, outras informações fornecidas pelo solver Knitro são mostradas na Figura 13.

```

Locally optimal solution.
objective 0.3483875784; feasibility error 1.04e-14
6 iterations; 7 function evaluations
=====
***** Resultados do fluxo de carga (p.u) *****
=====

i      TB      PGi      QGi      PDi      QDi      Pi      Qi      Ui      Thi
1      1      3.9484      1.1428      0.0000      0.0000      3.9484      1.1428      1.0000      0.0000
2      0      0.0000      0.0000      0.0000      2.8000      -8.0000      -2.8000      0.8338      -22.4064
3      2      5.2000      3.3748      0.8000      0.4000      4.4000      2.9748      1.0500      -0.5973
4      0      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      1.0193      -2.8340
5      0      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.0000      0.9743      -4.5479

i      j      Pij      Qij      Pji      Qji      PLij      QLij
1      5      3.9484      1.1428      -3.9230      -0.8049      0.0253      0.3379
3      4      4.4000      2.9748      -4.3808      -2.7189      0.0192      0.2559
2      4      -2.9184      -1.3911      3.0368      1.2154      0.1184      1.3157
2      5      -5.0816      -1.4089      5.2566      2.6302      0.1750      1.9448
4      5      1.3440      1.5035      -1.3336      -1.8253      0.0104      0.1157

Perdas do sistema (Soma das perdas nos trechos): Ploss= 0.3484      Qloss= 3.9699
Perdas do sistema (PG menos PD do sistema):      Ploss= 0.3484      Qloss= 3.9699

```

Figura 13 – Valores das grandezas do sistema-teste

Fonte: Autoria própria

Na Figura 13 são apresentados os resultados de todas as variáveis definidas no modelo matemático, assim como, as perdas de potência ativa do sistema-teste. Note que é possível realizar uma rápida validação dos resultados obtidos ao comparar o valor da função objetivo com os valores das perdas de potência ativa.

6 | CONCLUSÃO

Neste trabalho os resultados obtidos indicam que a representação do problema de fluxo de carga através da modelagem matemática e, principalmente, a obtenção dos resultados através de um software de otimização matemática amplamente usado em aplicações na Engenharia, constitui-se em uma importante alternativa de solução para realizar estudos convencionais de fluxo de carga em SEP.

A linguagem AMPL e o solver Knitro se mostraram eficientes no cálculo do ponto de operação do sistema-teste. Portanto, espera-se que este trabalho possa servir como referência para realizar estudos convencionais de fluxo de carga em SEP.

Em trabalhos futuros, faz-se necessário analisar o desempenho da linguagem AMPL e testar o modelo matemático do problema de fluxo de carga para determinar o ponto de operação considerando sistemas-teste da IEEE.

REFERÊNCIAS

FAVERO, L. P.; BELFIORE, P. Pesquisa operacional para cursos de engenharia. Elsevier, 2013.

FOURIER, R.; GAY, D. M.; KERNIGHAN, B. W. AMPL: A modeling language for mathematical programming. Thomson Publisher, 2003.

GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. Power system analysis and design. Ed. Cengage Learning, 2011.

HOLMES, D. AMPL (A mathematical programming language) at the University of Michigan. Disponível em: <http://www-personal.umich.edu/~murty/510/ampl.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2021.

MADANI, R.; SOJOURI, S.; LAVAEI, J. Convex relaxation for optimal power flow problem: Mesh networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 30, n. 1, p. 199-211, 2015.

MONTICELLI, A. Fluxo de carga em rede de energia elétrica. São Paulo, SP: Ed. Edgard Blücher, 1983.

OLSZAK, A.; KARBOWSKI, A. Parampl: A simple tool for parallel and distributed execution of AMPL programs. **IEEE Access**, v. 6, p.49282-49291, 2018.

TAMASHIRO, M. A.; GUIMARÃES, G. C.; RODRIGUES, A. R.; SILVA, A. M. B.; CAIXETA, D. A.; MONTEIRO, V. A. Features of present computer tools for load flow calculation and experience acquired with the Improvement of UFUFlow program. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 4, 2016.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Agronegócio 11, 45, 86, 87, 112

AMPL 10, 47, 48, 49, 52, 53, 55, 58, 59, 61

Arduino Uno 116, 117, 118

B

Biocombustíveis Sólidos 62

Biomassa 24, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 72, 88, 89, 90, 91, 95, 100, 101, 103, 107, 108, 113, 135, 136, 137, 141, 142

C

Canteiro de Obras 143, 144, 145, 150, 151, 152, 154, 156

Carbonização 62, 64, 68, 69, 71

Construção Civil 143, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151, 154, 156

Consumo 11, 24, 63, 78, 83, 96, 98, 100, 101, 103, 108, 109, 112, 116, 117, 118

Controladores Fuzzy 10, 39, 44, 45

Cooperativa 143, 145, 148, 149, 151, 153, 156

Coproduto 135, 141

Corrente 1, 5, 12, 75, 80, 91, 97, 98, 99, 102, 104, 106, 107, 108, 116, 117, 146

D

Dielectric Fluid 159

E

Energia 9, 11, 2, 5, 8, 16, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 48, 61, 62, 63, 64, 65, 69, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 80, 81, 82, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 116, 117, 118, 119, 122, 123, 135, 136, 138, 141, 142, 150, 151

Energia Elétrica 11, 2, 24, 25, 31, 33, 34, 35, 37, 61, 73, 74, 76, 80, 84, 85, 86, 87, 89, 90, 91, 94, 95, 96, 98, 100, 102, 104, 108, 109, 111, 112, 113, 114, 116, 118, 141, 150

Environmental Management System 159

Excentricidade 120, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132

F

Filtros Planares 120, 122, 124

Fluxo de Carga 9, 10, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 57, 58, 61

Fontes Renováveis 24, 63, 87, 89, 114

Fuzzy 10, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46

G

Geometria Elíptica 120, 124, 125, 131

I

Identificação de falhas em rolamentos 1

Inteligência Artificial 10, 1, 3, 12, 13, 15, 16

L

Lógica Fuzzy 10, 15, 16, 17, 20, 23, 36, 37, 39, 40, 44, 45

M

Mamdani 18, 19, 20, 39, 40, 44

Medidor 11, 116, 117, 118, 119

Motor de indução trifásico 1

O

Otimização Matemática 47, 48, 49, 53, 61

P

Pirólise 10, 62, 68, 135, 136

R

Reconfiguração Automática 87, 89, 94, 114

Redes Inteligentes 86, 87, 88, 91

Resíduos Agroindustriais 62, 63

S

SIF 15, 16, 17, 19, 20, 21, 23, 24, 28, 31, 32, 33, 34, 35

Sistemas Elétricos de Potência 9, 10, 47

Sistemas Fotovoltaicos 9, 23, 73, 77

Solver Knitro 47

Sombreamento 73, 74, 75, 76, 77, 79, 80, 81, 82, 84, 85

Sustentabilidade 27, 63, 73, 84, 86

T

Tensão 51, 74, 87, 91, 92, 94, 95, 97, 98, 99, 102, 104, 106, 107, 108, 113, 116, 117, 150

Terceirizados 143, 144, 145, 146, 151, 156, 157

Torrefação 62, 64, 68, 69, 70, 71, 135, 136, 137, 138, 141

Transformadas no domínio tempo-frequência 1

Transformer 159

V

Viabilidade 66, 73, 74, 77, 82, 84, 85, 86, 88, 93, 108, 110, 114

COLEÇÃO **DESAFIOS** DAS **ENGENHARIAS:**

ENGENHARIA ELÉTRICA



www.atenaeditora.com.br



contato@atenaeditora.com.br



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



facebook.com/atenaeditora.com.br

COLEÇÃO **DESAFIOS** DAS **ENGENHARIAS:**

ENGENHARIA ELÉTRICA



www.atenaeditora.com.br



contato@atenaeditora.com.br



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



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