

LILIAN COELHO DE FREITAS
(ORGANIZADORA)

Collection:

**APPLIED COMPUTER
ENGINEERING
2**

Atena
Editora
Ano 2022

LILIAN COELHO DE FREITAS
(ORGANIZADORA)

Collection:

**APPLIED COMPUTER
ENGINEERING
2**

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Gabriel Motomu Teshima

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-Não-Derivativos 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
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 Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
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
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
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 Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Diagramação: Daphynny Pamplona
Correção: Bruno Oliveira
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizadora: Lilian Coelho de Freitas

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C697 Collection: applied computer engineering 2 / Organizadora Lilian Coelho de Freitas. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0044-8

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.448221603>

1. Computer engineering. I. Freitas, Lilian Coelho de (Organizadora). II. Título.

CDD 621.39

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 série de *e-books* intitulada “*Collection: Applied computer engineering 2*” está organizada em 10 capítulos e apresenta diversas aplicações da engenharia de computação, com foco especial à aplicação de inteligência computacional em várias áreas do conhecimento, como mercado financeiro, transporte, saúde, jogos digitais, entre outros.

Dessa forma, esta coleção permitirá aos leitores uma ampla visão das potencialidades da engenharia da computação e dos avanços da pesquisa nesta área.

Os organizadores da Atena Editora agradecem aos autores, por viabilizaram a construção deste trabalho, e desejam a todos, uma leitura proveitosa.

Lilian Coelho de Freitas

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE APRENDIZADO DE MÁQUINA APLICADAS À ANÁLISE DE RISCO DE CRÉDITO

Jane Thais Soares de Oliveira

Rogério Alves Santana

Honovan Paz Rocha

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4482216031>

CAPÍTULO 2..... 21

FLUXO DE CARGA LINEARIZADO – UM ESTUDO COMPARATIVO USANDO A LINGUAGEM AMPL

Hugo Andrés Ruiz Flórez

Gloria Patricia Lopez Sepulveda

Jose Airton Azevedo dos Santos

Cristiane Lionço de Oliveira

Leandro Antonio Pasa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4482216032>

CAPÍTULO 3..... 33

IMPLEMENTAÇÃO DE REDE NEURAL CONVOLUCIONAL PARA PREDIÇÃO DE COVID-19 ATRAVÉS DE IMAGENS DE RAIOS X

Erik Gabriel Cruz Sena

Honovan Paz Rocha

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4482216033>

CAPÍTULO 4..... 51

JOGOS DIGITAIS DE ENTRETENIMENTO E O ESTÍMULO DA INTELIGÊNCIA LÓGICO-MATEMÁTICA DE GARDNER

Carlos Alberto Paiva

Regina Melo Silveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4482216034>

CAPÍTULO 5..... 74

RASTREAMENTO DE MOUSE PARA AVALIAÇÃO DE EXPERIÊNCIA DO USUÁRIO EM PORTAIS DE NOTÍCIAS: UM ESTUDO DE CASO

Danilo Teixeira Lima

Flavio Rafael Trindade Moura

Kennedy Edson Silva de Souza

Rita de Cássia Romeiro Paulino

Marcos Cesar da Rocha Seruffo

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4482216035>

CAPÍTULO 6..... 87

ROTEAMENTO DE VEÍCULO GUIADO AUTONOMAMENTE PARA ARMAZÉNS

INTELIGENTES

Wesley Marques Lima

Honovan Paz Rocha

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4482216036>

CAPÍTULO 7..... 105

UTILIZANDO GAN E REDES NEURAIS ARTIFICIAIS MLP PARA SUPORTE AO DIAGNÓSTICO PRECOCE DA DOENÇA DE ALZHEIMER: UM ESTUDO ACERCA DO POTENCIAL DA EXPANSÃO ARTIFICIAL DOS DADOS

Jonathan da Silva Bandeira

Renan Costa Alencar

Mêuser Jorge Silva Valença

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4482216037>

CAPÍTULO 8..... 121

UTILIZAÇÃO DE UM PERCEPTRON MÚLTIPLAS CAMADAS NA APROXIMAÇÃO DE FUNÇÕES CONTÍNUAS

Dhiego Loiola de Araújo

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4482216038>

CAPÍTULO 9..... 133

COMPUTAÇÃO EVOLUTIVA APLICADA AO MERCADO FINANCEIRO: UM SISTEMA DE RECOMENDAÇÃO ESTRATÉGICO PARA OS USUÁRIOS INICIANTE

Benjamin Luiz Franklin

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4482216039>

CAPÍTULO 10..... 147

ESTUDO DA REPROVAÇÃO NO CURSO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO DA UNIMONTES NO PERÍODO DE 2014-1 A 2019-2

Marilée Patta

Reginaldo Moraes de Macedo

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.44822160310>

SOBRE A ORGANIZADORA..... 161

ÍNDICE REMISSIVO..... 162

FLUXO DE CARGA LINEARIZADO – UM ESTUDO COMPARATIVO USANDO A LINGUAGEM AMPL

Data de aceite: 01/03/2022

Data da submissão: 06/01/2022

Hugo Andrés Ruiz Flórez

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

Gloria Patricia Lopez Sepulveda

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

Jose Airton Azevedo dos Santos

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UTFPR
Medianeira – PR
<http://lattes.cnpq.br/1208427854093144>

Cristiane Lionço de Oliveira

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UTFPR
Medianeira – PR
<http://lattes.cnpq.br/0915594224998333>

Leandro Antonio Pasa

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UTFPR
Medianeira – PR
<http://lattes.cnpq.br/4095187669845473>

RESUMO: Existem diferentes formulações propostas para resolver o problema de fluxo de carga nos Sistemas Elétricos de Potência,

dentre as quais é possível destacar o fluxo de carga CA e o fluxo de carga linearizado. A formulação do fluxo de carga CA é a mais usada para determinar com exatidão o ponto de operação de um Sistema Elétrico de Potência em regime permanente. Enquanto, a formulação do fluxo de carga linearizado permite calcular o ponto de operação de uma forma mais simples e aproximada. Geralmente, para realizar análises de fluxo de carga CA ou fluxo de carga linearizado é necessário realizar a implementação computacional em uma linguagem de programação específica ou podem ser usados softwares comerciais desenvolvidos exclusivamente para realizar estudos em Sistemas Elétricos de Potência. No entanto, existe uma alternativa de solução recentemente usada que consiste em representar o problema de fluxo de carga como sendo um problema de programação matemática. Esta alternativa de solução permite resolver o problema de fluxo de carga usando softwares de modelagem matemática amplamente usados nas análises de Sistemas de Elétricos de Potência, como é o caso da linguagem AMPL. Portanto, neste trabalho será usada a linguagem AMPL junto com o solver Knitro para resolver o problema de fluxo de carga linearizado. São apresentados dois modelos de programação matemática do fluxo de carga linearizado. O primeiro desconsidera as perdas de potência ativa e o outro incorpora as perdas de potência ativa na formulação matemática. Desta forma, será considerado um estudo de caso que consiste na determinação do ponto de operação de um sistema-teste. Finalmente, será realizada uma comparação dos resultados

obtidos pelos modelos de programação matemática do fluxo de carga linearizado com os resultados obtidos através do modelo de programação matemática do fluxo de carga CA. Os resultados obtidos mostram que a linguagem de programação AMPL permite solucionar satisfatoriamente o problema de fluxo de carga em Sistemas Elétricos de Potência.

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

LINEARIZED LOAD FLOW – A COMPATATIVE STUDY USING THE AMPL LANGUAGE

ABSTRACT: There are different ways to solve the power flow problem in Electrical Power Systems, among which stand out: the AC power flow and the linearized power flow. The AC power flow equation is the most used to accurately estimate the power system operation point in steady-state. Meanwhile, the linearized power flow formulation allows to calculate the power system operation point in a quick and simple way. In general, to perform AC power flow or linearized power flow analysis it is necessary to carry out the computational implementation in a specific programming language or can be used commercial softwares developed to perform Electrical Power System analysis. However, there is an alternative solution that has been recently used to solves the load flow problem as a mathematical optimization problem. This alternative approach allows to solve the load flow problem using mathematical optimization softwares widely used in the Electrical Power System analysis, such as the AMPL language. Therefore, in this work the AMPL language will be used together with the Knitro solver to obtain the linearized power flow solution. For this purpose, two mathematical programming models to solve the linearized power flow are presented. The first model ignores the active power losses and the second one includes the active power losses in the mathematical formulation. Thus, a case study that consists in determining the operating point of a test-system is considered. Finally, a comparison among the results obtained by the linearized power flow mathematical models and by the AC power flow mathematical model is carried out. The results show that the AMPL language can be used to successfully solve the power flow problem in Electrical Power Systems.

KEY-WORDS: Electrical Power System, Linearized Load flow, Mathematical Optimization, AMPL, Knitro Solver.

1 | INTRODUCCIÓN

O fluxo de carga é uma das principais ferramentas usadas para determinar o ponto de operação de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) em regime permanente. Seu objetivo consiste em calcular os valores das variáveis de estado (módulos e ângulos das tensões), a partir dos valores dos componentes e dos valores de demanda de um SEP, de tal forma que, possa ser verificado se as grandezas do SEP operam dentro dos valores operativos permitidos (STEVENSON, 1994).

Na literatura é possível encontrar diferentes formulações para resolver o problema de fluxo de carga em SEP, dentre as quais é possível destacar o fluxo de carga AC e o fluxo

de carga linearizado (MONTICELLI, 1983).

O fluxo de carga AC é resolvido tradicionalmente através do método de Newton-Raphson e as suas versões desacopladas. Este método obtém os valores das variáveis de estado de forma iterativa através da resolução de um conjunto de equações não-lineares. Por sua vez, o fluxo de carga linearizado (também conhecido como fluxo de carga cc) surgiu como uma alternativa de resolver o problema de fluxo de carga CA de uma forma simplificada, uma vez que, **é possível achar** de forma aproximada os valores das variáveis de estado ao resolver um sistema linear de equações (GLOVER, 2011). Em suma, a principal diferença entre os dois métodos radica no tipo de análise que pretende ser realizado, já que, enquanto no fluxo de carga AC é possível analisar o comportamento das variáveis nodais para um cenário específico, no método linearizado só é possível analisar o comportamento das variáveis de forma aproximada.

Dada a sua importância na área dos SEP é possível encontrar alguns softwares tais como ANAREDE, PowerWorld, Digsilent, PSAT, entre outros, que permitem achar a solução do problema de fluxo de carga AC e/ou linearizado (TAMASHIRO, 2016). No entanto, existe uma alternativa de solução recentemente explorada que consiste na possibilidade de representar o problema de fluxo de carga como sendo um problema de programação matemática (FLOREZ, et. al 2021). A principal vantagem desta abordagem, diferente dos softwares comerciais usados para resolver o problema de fluxo de carga, é a possibilidade de poder realizar alterações no modelo de otimização matemática, de tal forma que, seja possível resolver outros problemas de otimização matemática dentro da área dos SEP. Adicionalmente, é importante salientar que existem softwares de modelagem algébrica amplamente usados na área dos SEP, tais como, GAMS, Lingo, Pyomo, AMPL, entre outros, que podem ser usados para resolver os modelos de programação matemática propostos para resolver o problema de fluxo de carga.

Neste trabalho, são apresentados dois modelos matemáticos para obter a resposta do problema do fluxo de carga linearizado (desconsiderando e considerando as perdas de potência). Para determinar a solução dos modelos matemáticos de otimização será usada a linguagem de programação AMPL junto com o solver Knitro (FOURIER, 2003). Será usado um sistema-teste de 5 barras como estudo de caso (GLOVER, 2011). Além disso, será realizada uma comparação dos resultados obtidos com os modelos matemáticos de otimização do problema de fluxo de carga linearizado com os resultados obtidos através do modelo matemático de otimização do fluxo de carga convencional. Os resultados mostram que a linguagem AMPL é uma ferramenta confiável para realizar estudos de fluxo de carga em SEP.

2 | MODELO MATEMÁTICO FLUXO DE CARGA AC

O problema de fluxo de carga pode ser representado através do seguinte modelo de

otimização não-linear (FLOREZ et. al, 2021):

$$\min P_L = \sum_{(i,j) \in \Omega L} g_{ij} \left(t_{ij}^2 V_i^2 + V_j^2 - 2t_{ij} V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) \right) \quad (1)$$

s. a.

$$P_i^G - P_i^D - \sum_{(i,j) \in \Omega L} P_{ij} = 0, \quad \forall_i \in \Omega B \quad (2)$$

$$Q_i^G - Q_i^D + Q_i^{sh} - \sum_{(i,j) \in \Omega L} Q_{ij} = 0 \quad \forall_i \in \Omega B \quad (3)$$

$$\underline{Q_i^G} \leq Q_i^G \leq \overline{Q_i^G} \quad \forall_i \in \Omega B \quad (4)$$

Sendo que:

- A função objetivo mostrada em (1) representa as perdas de potência ativa do SEP.
- As restrições (2) e (3) representam o balanço de potência ativa e reativa do SEP, onde os fluxos de potências são calculados da seguinte forma:

$$P_{ij} = (t_{ij} V_i)^2 g_{ij} - t_{ij} V_i V_j \left(g_{ij} \cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) + b_{ij} \sin(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) \right) \quad (5)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 (t_{ij}^2 b_{ij} + b_{ij}^{sh}) + t_{ij} V_i V_j \left(b_{ij} \cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) - g_{ij} \sin(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) \right) \quad (6)$$

$$P_{ji} = V_j^2 g_{ij} - t_{ij} V_i V_j \left(g_{ij} \cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) - b_{ij} \sin(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) \right) \quad (7)$$

$$Q_{ji} = -V_j^2 (b_{ij} + b_{ij}^{sh}) + t_{ij} V_i V_j \left(b_{ij} \cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) + g_{ij} \sin(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) \right) \quad (8)$$

A restrição (4) corresponde os limites de geração de potência reativa nas barras do SEP.

Ao solucionar o modelo matemático anterior é possível obter diretamente os valores de V_i e θ_i em todas as barras do SEP, assim como, os fluxos de potência e nas Linhas de Transmissão e as perdas de potência ativa do SEP.

31 MODELO MATEMÁTICO FLUXO DE CARGA LINEARIZADO DESCONSIDERANDO AS PERDAS DE POTÊNCIA NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

De acordo com Monticelli (1983), faz-se necessário incorporar as seguintes aproximações para linearizar a formulação do problema de fluxo de carga:

- Considerando que nos parâmetros série das Linhas de Transmissão se cumpre que $r_{ij} \ll x_{ij}$, pode ser considerado que $r_{ij} = 0$. Portanto, $g_{ij} = 0$ e $b_{ij} = -1/x_{ij}$. Adicionalmente, os parâmetros shunt das Linhas de Transmissão também são desconsiderados.
- Assume-se que os módulos das tensões nas barras do SEP têm valores unitários

$$(V_i \approx V_j \approx 1).$$

- Dado que as aberturas angulares θ_{ij} são pequenas, pode-se considerar que (com base na formulação no fluxo de carga AC) $\cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) \approx 1$ e $\text{sen}(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) \approx \theta_{ij} + \varphi_{ij}$.

Baseado nas aproximações expostas anteriormente, a solução do fluxo de carga linearizado pode ser representado através do seguinte modelo de otimização:

$$\min P_L = \sum_{(i,j) \in \Omega_L} (P_{ij} + P_{ji}) \quad (9)$$

$$s. a. \quad (10)$$

$$P_i^G - P_i^D - \sum_{(i,j) \in \Omega_L} P_{ij} = 0, \quad \forall i \in \Omega_B$$

Sendo que:

- A função objetivo mostrada em (9) representa as perdas de potência ativa do SEP (que neste caso seriam nulas).
- A restrição mostrada em (10) representa o balanço de potência ativa nas barras do SEP, onde os fluxos de potência ativa são calculados como:

$$P_{ij} = -t_{ij} b_{ij} (\theta_{ij} + \varphi_{ij}) \quad (11)$$

$$P_{ji} = t_{ij} b_{ij} (\theta_{ij} + \varphi_{ij}) \quad (12)$$

Ao solucionar o modelo matemático anterior é possível obter diretamente os valores de θ_i em todas as barras do SEP, assim como, os fluxos de potência ativa P_{ij} nas Linhas de Transmissão.

4 | MODELO MATEMÁTICO FLUXO DE CARGA LINEARIZADO CONSIDERANDO AS PERDAS DE POTÊNCIA NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

De acordo com Monticelli (1983) é possível incorporar as perdas de potência ativa na formulação do fluxo de carga linearizado. Desta forma, é possível melhorar os resultados do fluxo de carga linearizado quando comparados com os resultados obtidos pela formulação AC do problema de fluxo de carga.

Assim sendo, para obter a formulação desta versão do fluxo de carga linearizado é necessário considerar as seguintes aproximações:

- O parâmetro série r_{ij} das Linhas de Transmissão é considerado na formulação. Portanto, define-se $g_{ij} = r_{ij} / (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)$. No entanto, o parâmetro b_{ij} continua sendo calculado de forma aproximada ($b_{ij} \approx -1/x_{ij}$) e os parâmetros shunt são desconsiderados.
- Baseado na expansão em séries de Taylor das funções $\text{sen}(\theta)$ e $\text{cos}(\theta)$, então pode

ser considerado que $\cos(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) \approx 1 - (\theta_{ij} + \varphi_{ij})^2/2$ e $\text{sen}(\theta_{ij} + \varphi_{ij}) \approx \theta_{ij} + \varphi_{ij}$.

A partir das aproximações anteriores e com base nos modelos de otimização matemática apresentados acima, a solução do fluxo de carga linearizado considerando as perdas de potência ativa pode ser obtida mediante o seguinte modelo matemático de otimização:

$$\min P_L = \sum_{(i,j) \in \Omega L} g_{ij} \left(t_{ij}^2 - 2t_{ij} \left(1 - \frac{(\theta_{ij} + \varphi_{ij})^2}{2} \right) + 1 \right) \quad (13)$$

s. a.

$$P_i^G - P_i^D - \sum_{(i,j) \in \Omega L} P_{ij} = 0, \quad \forall_i \in \Omega B \quad (14)$$

Sendo que:

- A função objetivo mostrada em (13) representa as perdas de potência ativa do SEP.
- A restrição (13) representa o balanço de potência ativas nas barras do SEP, onde os fluxos de potência ativa são calculados como:

$$P_{ij} = t_{ij}^2 g_{ij} - t_{ij} g_{ij} \left(1 - \frac{(\theta_{ij} + \varphi_{ij})^2}{2} \right) - t_{ij} b_{ij} (\theta_{ij} + \varphi_{ij}) \quad (15)$$

$$P_{ji} = g_{ij} - t_{ij} g_{ij} \left(1 - \frac{(\theta_{ij} + \varphi_{ij})^2}{2} \right) + t_{ij} b_{ij} (\theta_{ij} + \varphi_{ij}) \quad (16)$$

Ao solucionar o modelo matemático anterior é possível obter diretamente os valores de θ_i em todas as barras do SEP, assim como, os fluxos de potência ativa P_{ij} nas Linhas de Transmissão e as perdas de potência ativa do SEP.

5 | ESTUDO DE CASO PROPOSTO

Para realizar o estudo comparativo dos modelos de programação matemática do problema de fluxo de carga linearizado e do modelo de programação matemática do fluxo de carga CA será usado como referência o sistema-teste da Figura 1 (GLOVER, 2011).

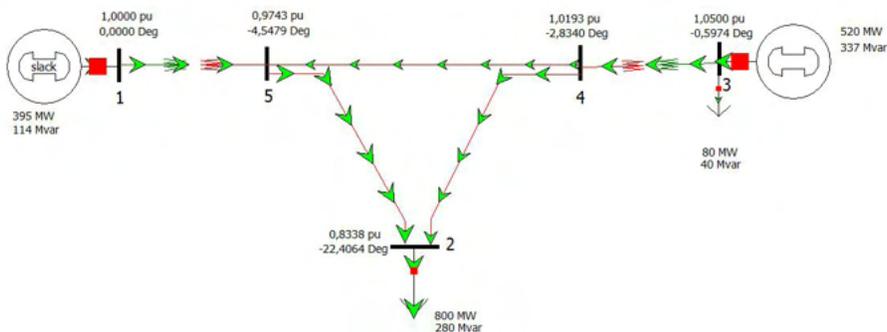


Figura 1 – Sistema-teste usado na validação dos modelos de otimização propostos.

Fonte: Autoria própria.

Os dados de entrada do sistema-teste necessários para realizar as simulações 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.

Por simplicidade, as informações anteriores podem ser inseridas em um único arquivo de texto comum para os três modelos matemáticos, 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      bsh      t      phi:=
      1  5  0.00150  0.0200  0.0000  1.0000  0.0000
      3  4  0.00075  0.0100  0.0000  1.0000  0.0000
      2  4  0.00900  0.1000  0.8600  1.0000  0.0000
      2  5  0.00450  0.0500  0.4400  1.0000  0.0000
      4  5  0.00225  0.0250  0.2200  1.0000  0.0000
;

```

Figura 2 – Dados de entrada do sistema-teste.

Fonte: Próprio autor.

Por outro lado, para solucionar os modelos de otimização matemática do problema de fluxo de carga através da linguagem AMPL é usado o solver Knitro amplamente usado em aplicações na área dos SEP.

Com o intuito de fazer uma comparação do desempenho do solver Knitro usado na resolução dos modelos de programação matemática do problema de fluxo de carga, na Tabela 3 é mostrado um resumo dos valores da função objetivo, o erro relativo, o número de iterações e o tempo de cômputo obtidos após realizar as simulações.

	<i>Fluxo CA</i>	<i>Fluxo linearizado (sem perdas)</i>	<i>Fluxo linearizado (com perdas)</i>
<i>Valor da função</i>			
<i>objetivo</i>	0,3484	$2,2204e^{-16}$	0,2366
<i>(Perdas)</i>			
<i>Erro relativo</i>	$6,43e^{-9}$	$7,11e^{-15}$	$2,41e^{-12}$
<i>Número de iterações</i>	6	2	3
<i>Tempo [s]</i>	0,004	0,003	0,003

Tabela 3 – Comparação do desempenho do solver Knitro.

Fonte: Próprio autor.

Salienta-se que, os valores da função objetivo mostrados na Tabela 3 correspondem às perdas de potência ativa do sistema-teste. Adicionalmente, nas Figuras 3-5 são mostrados os resultados obtidos nas simulações realizadas usando a linguagem de programação AMPL.

```

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    -3.9220    -0.8049    0.0253    0.3379
3      4      4.4000    2.9748    -4.3888    -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 3 – Resultados do modelo matemático do fluxo de carga CA.

Fonte: Próprio autor.

```

Locally optimal solution.
objective 2.220446049e-16; feasibility error 8.88e-16
2 iterations; 3 function evaluations
*****
***** Resultados do fluxo de carga (p.u) *****
*****
i      TB      PGi      PDi      Pi      Ui      Thi
1      1      3.6000    0.0000    3.6000    1.0000    0.0000
2      0      0.0000    0.0000    -8.0000    1.0000    -18.6948
3      2      5.2000    0.8000    4.4000    1.0000    0.5238
4      0      0.0000    0.0000    0.0000    1.0000    -1.9972
5      0      0.0000    0.0000    0.0000    1.0000    -4.1253

i      j      Pij      Pji      PLij
1      5      3.6000    -3.6000    0.0000
3      4      4.4000    -4.4000    0.0000
2      4      -2.9143    2.9143    0.0000
2      5      -5.0857    5.0857    0.0000
4      5      1.4857    -1.4857    0.0000

Perdas do sistema (Soma das perdas nos trechos): Ploss= 0.0000
Perdas do sistema (PG menos PD do sistema):      Ploss= 0.0000

```

Figura 4 – Resultados do modelo matemático do fluxo de carga linearizado sem perdas.

Fonte: Próprio autor.

```

Locally optimal solution.
objective 0.2365522991; feasibility error 5.06e-12
3 iterations; 4 function evaluations

*****
***** Resultados do fluxo de carga (p.u) *****
*****

i      TB      PGi      PDi      Pi      Ui      Thi
1      1      3.8366   0.0000   3.8366   1.0000   0.0000
2      0      0.0000   8.0000   -8.0000   1.0000   -19.1763
3      2      5.2000   0.8000   4.4000   1.0000   0.1535
4      0      0.0000   0.0000   0.0000   1.0000   -2.3634
5      0      0.0000   0.0000   0.0000   1.0000   -4.3839

i      j      Pij      Pji      PLij
1      5      3.8366   -3.8147   0.0218
3      4      4.4000   -4.3856   0.0144
2      4      -2.8960   2.9728   0.0769
2      5      -5.1040   5.2230   0.1190
4      5      1.4128   -1.4083   0.0044

Perdas do sistema (Soma das perdas nos trechos): Ploss= 0.2366
Perdas do sistema (PG menos PD do sistema):      Ploss= 0.2366

```

Figura 5 – Resultados do modelo matemático do fluxo de carga linearizado com perdas.

Fonte: Próprio autor.

Adicionalmente, nas Tabelas 4 e 5 são comparados os valores das tensões nas barras e os valores dos fluxos de potência obtidos através do fluxo de carga linearizado e os resultados obtidos através do fluxo de carga CA, respectivamente.

Barra	Fluxo CA		Fluxo Linearizado (sem perdas)		Fluxo Linearizado (com perdas)	
	V_i [p.u.]	θ_i [graus]	V_i [p.u.]	θ_i [graus]	V_i [p.u.]	θ_i [graus]
1	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
2	0,8338	-22,4064	1,0000	-18,6948	1,0000	-19,1763
3	1,0500	-0,5973	1,0000	0,5238	1,0000	0,1535
4	1,0193	-2,8340	1,0000	-1,9972	1,0000	-2,3634
5	0,9743	-4,5479	1,0000	-4,1253	1,0000	-4,3839

Tabela 4 – Comparação dos valores das variáveis de estado do sistema-teste.

Fonte: Próprio autor.

<i>i</i>	<i>j</i>	<i>Fluxo AC</i>		<i>Fluxo linearizado (sem perdas)</i>		<i>Fluxo linearizado (com perdas)</i>	
		<i>P_{ij}</i>	<i>P_{ji}</i>	<i>P_{ij}</i>	<i>P_{ji}</i>	<i>P_{ij}</i>	<i>P_{ji}</i>
1	5	3,9484	-3,9230	3,6000	-3,6000	3,8366	-3,8147
3	4	4,4000	-4,3808	4,4000	-4,4000	4,4000	-4,3856
2	4	-2,9184	3,0368	-2,9143	2,9143	-2,8960	2,9728
2	5	-5,0816	5,2566	-5,0857	5,0857	-5,1040	5,2230
4	5	1,3440	-1,3336	1,4857	-1,4857	1,4128	-1,4083

Tabela 5 – Comparação dos valores dos fluxos de potência ativa nas Linhas de Transmissão.
Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados anteriores e tomando como referência os resultados do fluxo de carga CA é possível mensurar o impacto das aproximações incorporadas nos modelos de fluxo de carga linearizados.

6 I CONCLUSÃO

Neste trabalho os resultados obtidos mostram que é possível representar o fluxo de carga linearizado considerando e desconsiderando as perdas de potência ativa através de um modelo de programação matemática, respectivamente. Estes modelos matemáticos do problema de fluxo de carga são implementados na linguagem de programação matemática AMPL e resolvidos satisfatoriamente através do solver Knitro.

O modelo matemático de otimização do fluxo de carga linearizado que desconsidera as perdas de potência ativa corresponde a um modelo de programação linear, o que poderia ser considerado como uma condição favorável na hora de resolver um problema de otimização matemática de maior complexidade usando essa formulação. No entanto, pode ser visto que há uma diferença considerável entre os valores das grandezas quando comparados com os valores obtidos pelo modelo do fluxo de carga CA.

Por sua vez, o modelo matemático de otimização do fluxo de carga linearizado que considera as perdas de potência ativa, embora apresente melhores resultados do que o modelo que desconsidera as perdas de potência, pelo fato de ser um modelo de programação não-linear não seria uma vantagem o seu emprego para realizar aplicações nas análises de SEP.

De acordo com o anterior, em um trabalho futuro seria interessante propor um modelo matemático de otimização do fluxo de carga linearizado que possa ser representado como um modelo de programação linear, que incorpora as perdas de potência do sistema e cujos valores das variáveis de estado sejam bem próximos aos fornecidos pelo fluxo de carga CA.

REFERÊNCIAS

FLOREZ, H. A. R.; MARUJO, D.; LOPEZ, G. P.; MOLINA, A. Fluxo de carga em sistemas elétricos de potência – Um estudo de caso usando a linguagem AMPL. **Coleção Desafios das Engenharias: Engenharia Elétrica**, p. 47-61, 2021.

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.

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

STEVENSON, W. D.; GRAINGER, J. J.; Power system analysis. New York, Ed. Mc Graw Hill, 1994.

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

Aprendizado de máquina 3, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 13, 18, 20, 33, 43, 44

Armazém inteligente 87, 88, 90, 94, 103, 104

B

Bloom 51, 52, 54, 63, 65, 66, 69, 70, 71, 72, 73

Busca de custo uniforme 87, 89, 91, 92, 96, 97, 98, 99, 100, 102, 103

C

Colônia de formigas 87, 91, 93

Computação evolutiva 4, 133, 135, 136, 139, 144

Covid-19 3, 33, 34, 35, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 75, 82

D

Data augmentation 106

Doença de alzheimer 4, 105, 106, 119

E

Experiência do usuário 3, 74, 75, 76

Extração de conhecimento 133, 138, 140

F

Fluxo de carga linearizado 3, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 29, 30, 31

Funções contínuas 4, 121, 124, 131

G

Generative adversarial networks 106, 110

I

Imagens de raio X 3, 33, 46

Índices de reprovação 147, 149, 152, 153, 158, 159

Inteligência lógico-matemática 3, 51, 52, 56, 57, 59, 72

J

Jogos digitais de entretenimento 3, 51, 52, 53, 63, 64, 71

M

Mercado financeiro 2, 4, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 144

Multilayer perceptron 8, 35, 38, 105, 106, 109, 110, 121

O

Otimização matemática 22, 23, 26, 28, 31

P

Perceptron 4, 8, 35, 38, 105, 106, 109, 110, 121

Portais de notícias 3, 74, 76, 77, 79, 80, 82, 84, 85

R

Rastreamento 3, 74, 75, 76, 77, 78

Reconhecimento de padrões 20, 33, 35, 40

redes neurais artificiais 20, 35, 49, 146

Redes neurais artificiais 4, 105, 106, 121, 132, 136

Redes neurais convolucionais 33, 34, 37, 46

Reprovação no curso de sistemas de informação 4, 147, 159

Roteirização 87, 89, 103, 104

S

Sistemas de recomendação 133

Sistemas elétricos de potência 21, 22, 32

Solver knitro 22

T

Teoria das Inteligências Múltiplas 51, 54, 71, 72

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 @atenaeditora
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Collection:

APPLIED COMPUTER ENGINEERING 2

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 @atenaeditora
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Collection:

APPLIED COMPUTER ENGINEERING 2


Ano 2022