



Atena
Editora
Ano 2022

ELECTRICAL ENGINEERING: PERSPECTIVE AND TENDENCY

JOÃO DALLAMUTA
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
(ORGANIZADORES)



Atena
Editora
Ano 2022

ELECTRICAL ENGINEERING: PERSPECTIVE AND TENDENCY

JOÃO DALLAMUTA
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
(ORGANIZADORES)

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

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



Electrical engineering: perspective and tendency

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E38 Electrical engineering: perspective and tendency /
Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz
Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0375-3

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.753222106>

1. Electrical engineering. I. Dallamuta, João
(Organizador). II. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). III.
Título.

CDD 621.3

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



Atena
Editora
Ano 2022

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

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

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

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

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

Boa leitura

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1


DETECÇÃO DE PATOLOGIAS VOCAIS POR MEIO DO USO DE MODELOS AUTO REGRESSIVOS E ALGORITMO KNN

Winnie de Lima Torres

Ícaro Bezerra Queiroz de Araújo

Aldayr Dantas de Araújo

Allan de Medeiros Martins

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7532221061>

CAPÍTULO 2..... 14

APRENDIZAGEM BASEADA EM METODOLOGIA ATIVA NO ENSINO DE FUNDAMENTOS DE ROBÓTICA

Márcio Mendonça

Michelle Eliza Casagrande Rocha

Carlos Renato Alves de Oliveira

Lucas Botoni de Souza

Kazuyochi Ota Junior

Gilberto Mitsuo Suzuki Trancolin

Augusto Alberto Foggiato

Luiz Francisco Sanches Buzachero


Gabriela Helena Bauab Shiguemoto

Luiz Henrique Geromel

Marcio Aurelio Furtado Montezuma

Emerson Ravazzi Pires da Silva

Fábio Rodrigo Milanez

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7532221062>


CAPÍTULO 3..... 27

A VIRTUAL REALITY APPLICATION FOR TRAINING LOCOMOTIVE OPERATORS

Pablo Pereira e Silva

Rodrigo Varejão Andreão

Mário Mestría

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7532221063>


CAPÍTULO 4..... 40

OPEN LOOP CONTROL SYSTEM AND TOOLS FOR DATA ACQUISITION AND ESTIMATION OF THE WELD BEAD DEPTH IN GMAW PROCESS

Guillermo Alvarez Bestard

Renato Coral Sampaio

Sadek Crisostomo Absi Alfaro


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7532221064>

CAPÍTULO 5..... 56

PREMISSAS E PERSPECTIVAS DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA DO

SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO


Bruno Knevez Hammerschmitt
Felipe Cirolini Lucchese
Marcelo Bruno Capeletti
Leonardo Nogueira Fontoura da Silva
Fernando Guilherme Kaehler Guarda
Alzenira da Rosa Abaide

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7532221065>

CAPÍTULO 6..... 68

SISTEMA RETIFICADOR/INVERSOR COM CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA APLICADO AO ACIONAMENTO DE MOTOR SÍNCRONO DE IMÃS PERMANENTES


Pedro Cerutti Bolsi
Edemar de Oliveira Prado
Hamiltom Confortin Sartori
José Renes Pinheiro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7532221066>

CAPÍTULO 7..... 84

UM MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DA MARGEM DE CARGA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA NA REGIÃO DE SEGURANÇA DINÂMICA DEVIDO A BIFURCAÇÕES

Murilo Eduardo Casteroba Bento

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7532221067>

CAPÍTULO 8..... 92

UM MÉTODO BASEADO EM OTIMIZAÇÃO PARA O PROJETO DE CONTROLADORES CENTRALIZADOS DE AMORTECIMENTO


Murilo Eduardo Casteroba Bento

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7532221068>

CAPÍTULO 9..... 102

TRAÇADOR DE CURVAS PORTÁTIL E DE BAIXO CUSTO PARA PAINÉIS PV USANDO UM CONVERSOR CC-CC

Romário de J. Nazaré
Leandro L. O. Carralero
Fabiano F. Costa
André P. N. Tahim

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.7532221069>

CAPÍTULO 10..... 117

METODOLOGIA AVALIATIVA REMOTA APLICADA À UMA DISCIPLINA DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA: RELATO DE CASO

Bruno Knevez Hammerschmitt
Felipe Cirolini Lucchese
Alzenira da Rosa Abaide

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.75322210610>

SOBRE OS ORGANIZADORES	127
ÍNDICE REMISSIVO.....	128

UM MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DA MARGEM DE CARGA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA NA REGIÃO DE SEGURANÇA DINÂMICA DEVIDO A BIFURCAÇÕES

Data de aceite: 01/06/2022

Data de submissão: 01/04/2022

Murilo Eduardo Casteroba Bento

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro – Rio de Janeiro
<https://orcid.org/0000-0002-5285-103X>

RESUMO: Este trabalho apresenta um método baseado em problema de otimização para a determinação da margem de carga de sistemas de potência na região de segurança dinâmica considerando as Bifurcações de Hopf (BH) e Selá-Nó (BSN). A região de segurança para a BSN consiste no nível de carga de 96% do nível de carga onde ocorre a BSN. A região de segurança para a BH consiste no nível de carga onde há autovalores com 5% de taxa de amortecimento. O problema de otimização formulado foi resolvido por algoritmos genéticos. Estudos de casos são apresentados para o IEEE 39 barras para uma lista de contingências.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade a Pequenos Sinais, Estabilidade de Tensão, Margem de Carga, Métodos Diretos, Avaliação de Segurança Dinâmica.

A METHOD FOR DETERMINING THE LOAD MARGIN OF POWER SYSTEMS IN THE DYNAMIC SECURITY REGION DUE TO BIFURCATIONS

ABSTRACT: This work presents a method based

on an optimization problem to determine the load margin of power systems in the dynamic security region considering the Hopf (HB) and Saddle-Node (SNB) bifurcations. The security region for the SNB consists of the load level 96% of the load level where the SNB occurs. The security region for HB consists of the load level where there are eigenvalues with a 5% damping ratio. The formulated optimization problem was solved by genetic algorithms. Case studies are presented for the IEEE 39-bus for a list of contingencies.

KEYWORDS: Small-Signal Stability, Voltage Stability, Load Margin, Direct Methods, Dynamic Security Assessment.

1 | INTRODUÇÃO

A expansão de geração e demanda de energia elétrica aumentou a complexidade de operação de sistemas elétricos de potência exigindo que centros de operação desenvolvessem ferramentas capazes de avaliar a estabilidade do sistema sujeito a perturbações e garantir o suprimento contínuo e seguro de energia elétrica (AJJARAPU, 2007). O aumento da demanda de carga pode induzir o sistema elétrico a três bifurcações: Bifurcação de Hopf (BH), Bifurcação Sela-Nó e Bifurcação Induzida por Limites (BIL) (AJJARAPU, 2007).

Em sistemas dinâmicos, a BSN está associada ao súbito desaparecimento da condição de equilíbrio do sistema em um determinado nível de carga enquanto a BH

está associada ao surgimento de ciclos limites levando o sistema a problemas oscilatórios (AJJARAPU, 2007). Modelos lineares de sistemas de potência podem ser utilizados para avaliar a presença destas bifurcações através do estudo de autovalores. A presença de um único autovalor nulo é condição necessária para ocorrer uma BSN e a presença de um par de autovalores imaginários é condição necessária para ocorrer uma BH (AJJARAPU, 2007).

Portanto, com o objetivo de garantir a operação estável de sistemas de potência, é fundamental identificar a margem de carga que consiste na diferença entre o nível de carga da condição atual de operação do sistema e o nível de carga onde ocorre as bifurcações. Há métodos que calculam estas margens, mas devido às complexidades do sistema elétrico há exigências de determinação rápida desta margem de carga considerando inclusive uma lista de possíveis contingências (AJJARAPU, 2007).

Na comunidade científica, os métodos para identificar a margem de carga podem ser subdivididos em diretos e indiretos. Os métodos indiretos calculam e avaliam os autovalores do sistema para cada incremento de carga segundo uma direção de crescimento de carga. Assim, identificado uma condição de ocorrência da BSN ou BH para um nível de carga, a margem de carga está determinada. Senão, incrementa-se novamente o nível de carga e avalia-se os autovalores. Métodos indiretos podem apresentar, portanto, um elevado esforço computacional para calcular o fluxo de potência e todos os autovalores para cada incremento de carga. A dimensão do sistema de potência e a lista de possíveis contingências podem aumentar ainda mais este esforço computacional (AJJARAPU, 2007).

Os métodos diretos, no entanto, determinam o nível de carga de ocorrência da bifurcação diretamente se o cálculo sucessivo de fluxo de potência e autovalores. Na literatura, métodos diretos foram propostos, mas desafios ainda persistem: (i) dependência de boas condições iniciais das variáveis, (ii) formulação conservadora de sistema dinâmicos, (iii) problemas de convergência (AJJARAPU, 2007).

A grande maioria dos métodos propostos na literatura visa identificar o nível de carga onde ocorre a bifurcação. Entretanto, centros de operação de sistemas de potência desejam uma margem de segurança devido às bifurcações (WANG et al, 2020). No Brasil, o Operador Nacional do Sistema determina que o sistema opere até 96% do nível de carga onde ocorre a BSN e, assim, esta poder ser considerada a margem de segurança para a BSN (BENTO et al, 2018). Em Estabilidade a Pequenas Perturbações de sistemas de potência, é desejável que os autovalores do modelo linear tenham taxas de amortecimento superiores a 5% e, assim, pode-se definir esta taxa como margem de segurança para a BH (GOMES et al, 2003).

Este trabalho apresenta uma abordagem baseada em modelo de otimização para identificar a margem de carga devido às bifurcações de Hopf e Sela-Nó em sistemas de potência. Um conjunto de equações nas condições de ocorrência das bifurcações é apresentado. O modelo de otimização proposto é resolvido utilizando Algoritmos Genéticos

(SIVANANDAM et al, 2008). Estudos de casos são apresentados e avaliados para o sistema IEEE 39 barras considerando uma lista de contingências.

Este trabalho apresenta a seguinte organização: Seção 2 introduz uma revisão sucinta de BSN e BH, Seção 3 descreve o sistema de equações na condição de ocorrência das bifurcações, Seção 4 apresenta o método proposto baseado em modelo de otimização, Seção 5 apresenta estudos de casos para avaliar o método proposto e Seção 5 apresenta as conclusões do trabalho.

2 | REVISÃO

Qualquer sistema dinâmico pode ser representado pela seguinte equação em espaço de estados dependente de um parâmetro

$$\dot{x} = f(x, y, \mu) \quad (1)$$

$$0 = g(x, y, \mu) \quad (2)$$

onde x é o vetor de variáveis de estado, y é o vetor de variáveis algébricas e μ é a parametrização do nível de carga do sistema. Se (x_0, y_0, μ_0) representa uma condição de equilíbrio do sistema (1)-(2), então uma condição para a ocorrer a BH é a presença de um par de autovalores puramente imaginários e para ocorrer a BSN é a presença de um único autovalor nulo (AJJARAPU, 2007).

3 | SISTEMA DE EQUAÇÕES

O objetivo consiste em formular dois sistemas determinados de equações e variáveis nas condições de ocorrência das bifurcações (BENTO et al, 2018). Primeiramente, as equações (3)-(4) de equilíbrio do sistema devem ser satisfeitas.

$$f(x, y, \mu) = 0 \quad (3)$$

$$g(x, y, \mu) = 0 \quad (4)$$

Linearizando as equações (3)-(4) em torno da condição de equilíbrio, tem-se

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (5)$$

onde $\Delta x = x - x_0$, $\Delta y = y - y_0$, J é a matriz Jacobiana, $A = \partial f / \partial x$, $B = \partial f / \partial y$, $C = \partial g / \partial x$ e $D = \partial g / \partial y$.

Se λ é um autovalor de A e v o respectivo autovetor, então há um vetor w de forma que

$$J \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} v \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Na condição de ocorrência da BH, há um autovalor puramente imaginário, ou seja, $\lambda = j\omega_0$ e se decomposmos os vetores v e w em suas partes reais e imaginárias, ou seja, $v = v_R + jv_I$ e $w = w_R + jw_I$, tem-se

$$J \begin{bmatrix} v_R \\ w_R \end{bmatrix} + \omega_0 \begin{bmatrix} v_I \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

$$J \begin{bmatrix} v_I \\ w_I \end{bmatrix} - \omega_0 \begin{bmatrix} v_R \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

Na condição de ocorrência da BSN, há um autovalor puramente nulo, ou seja, $\lambda=0$ e, assim, tem-se

$$J \begin{bmatrix} v_R \\ w_R \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

$$J \begin{bmatrix} v_I \\ w_I \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

Dois equações adicionais são utilizadas para se ter um sistema determinado de equações e variáveis. Estas duas equações estão relacionadas à normalização dos autovetores v e w e estão descritas a seguir

$$\begin{bmatrix} v_R^T & w_R^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_I \\ w_I \end{bmatrix} = 0 \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} v_R^T & w_R^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_R \\ w_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_I^T & w_I^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_I \\ w_I \end{bmatrix} = 1 \quad (12)$$

O sistema de equações da BH apresenta uma equação a mais que o sistema de equações da BSN, pois apresenta uma variável a mais, ω_0 , a parte imaginária do autovalor.

Se $\theta = \arccos(\zeta_0)$, onde ζ_0 é a taxa de amortecimento mínimo desejado para os autovalores de J , pode-se formular \bar{J} como (BENTO et al, 2018)

$$\bar{J} = J \otimes \begin{bmatrix} \text{sen}(\theta) & \text{cos}(\theta) \\ -\text{cos}(\theta) & \text{sen}(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \text{sen}(\theta) & J \text{cos}(\theta) \\ -J \text{cos}(\theta) & J \text{sen}(\theta) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Assim, se J tem um par de autovalores $\lambda_{1,2} = \sigma \pm j\omega_0$ com amortecimento ζ_0 , então \bar{J} tem um par de autovalores $\bar{\lambda}_{1,2} = \sigma \pm j\bar{\omega}_0 = \pm j\sqrt{\sigma^2 + \omega_0^2}$ (BENTO et al, 2018). Assim, pode-se utilizar esta matriz estendida \bar{J} no sistema de equações para identificar o autovalor imaginário sendo que na verdade estamos encontrando o autovalor com a taxa de amortecimento desejado na região de segurança dinâmica devido a BH.

Assim, o sistema de equações na condição de ocorrência da BSN é dado por

$$f(x, y, \mu) = 0 \quad (14)$$

$$g(x, y, \mu) = 0 \quad (15)$$

$$\bar{J} \begin{bmatrix} \bar{v}_R \\ \bar{w}_R \end{bmatrix} = 0 \quad (16)$$

$$J \begin{bmatrix} \bar{v}_I \\ \bar{w}_I \end{bmatrix} = 0 \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_R^T & \bar{w}_R^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_I \\ \bar{w}_I \end{bmatrix} = 0 \quad (18)$$

enquanto o sistema de equações na condição de ocorrência da BSN é dado por

$$f(x, y, \mu) = 0 \quad (19)$$

$$g(x, y, \mu) = 0 \quad (20)$$

$$\bar{J} \begin{bmatrix} \bar{v}_R \\ \bar{w}_R \end{bmatrix} + \bar{\omega}_0 \begin{bmatrix} \bar{v}_I \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (21)$$

$$J \begin{bmatrix} \bar{v}_I \\ \bar{w}_I \end{bmatrix} - \bar{\omega}_0 \begin{bmatrix} \bar{v}_R \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_R^T & \bar{w}_R^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_I \\ \bar{w}_I \end{bmatrix} = 0 \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_R^T & \bar{w}_R^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_R \\ \bar{w}_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{v}_I^T & \bar{w}_I^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_I \\ \bar{w}_I \end{bmatrix} - 1 = 0 \quad (24)$$

e o vetor de variáveis destes sistemas de equações é

$$s = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \mu \\ \bar{v}_R \\ \bar{v}_I \\ \bar{w}_R \\ \bar{w}_I \\ \bar{\omega}_0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Trata-se de sistemas determinados de equações e variáveis e estas equações são não lineares. O objetivo consiste em encontrar o vetor s que satisfaça um destes sistemas de equações e assim determinar o nível de carga do sistema que é definido pela variável μ .

4 | MÉTODO PROPOSTO

O método proposto consiste em encontrar o vetor de variáveis através de um modelo de otimização. Conforme pode ser observado pelos sistemas de equações, o vetor de variáveis devem zerar as equações e, assim, pode-se definir $F_{BSN}(s)=0$ como o sistema de equações na ocorrência da BSN e $F_{BH}(s)=0$ como o sistema de equações na ocorrência da BH. Além disso, podemos definir a função objetivo como o valor encontrado quando atribuímos um valor ao vetor de variáveis s e determinamos o erro nos sistemas de equações da BH e da BSN, ou seja, $F_{obj}(s_x) = \min(F_{BSN}(s_x), F_{BH}(s_x))$. Assim, o problema de otimização consiste em encontrar s que minimize a função objetivo $F_{obj}(\cdot)$ e pode ser formulado como

$$\begin{array}{l} \text{Find } s \\ \text{Minimize } F_{obj}(s) \end{array} \quad (26)$$

Este problema de otimização pode ser resolvido por qualquer metaheurística. Nesta pesquisa, foi utilizado Algoritmo Genéticos pela sua fácil implementação e bons resultados

em problemas de engenharia (SIVANANDAM et al, 2008). O operador de recombinação consistiu em trocar quaisquer dois vetores entre dois indivíduos da população e o operador de mutação consistiu em multiplicar um elemento do vetor de variáveis de metade da população por um valor escolhido aleatoriamente entre 0,7 e 1,3 e a outra metade da população terá um valor gerado aleatoriamente para um elemento do vetor de variáveis.

5 | ESTUDOS DE CASOS

O método proposto foi avaliado no sistema IEEE 39 barras composto por 10 geradores síncronos, 10 Reguladores Automáticos de Tensão, 10 Estabilizadores de Sistemas de Potência e 35 linhas de transmissão e cujo ponto de operação nominal e todas as informações do modelo algébrico-diferencial estão disponíveis em (CANIZARES et al., 2017). Estudos de avaliação de segurança dinâmica também foram conduzidos e consistiram avaliar o sistema pelo critério N-1 de desconexão de linhas de transmissão.

Conforme já mencionado, o limite de segurança devido à Bifurcação de Hopf foi o amortecimento de 5% e o limite de segurança devido à Bifurcação Sela-Nó foi o nível de carga de 96% do nível de carga da BSN. Os resultados foram comparados com o método *Look-Ahead* que tem a capacidade de determinar a margem de carga para a BSN (AJJARAPU, 2007). Este método é rápido pois executa somente dois fluxos de potência para determinar a margem de carga. Entretanto, este método não calcula a margem de carga para a BH e, portanto, a margem de carga pode não estar adequada.

O método proposto foi implementado considerando 20 indivíduos, 1000 iterações e critério de parada o valor mínimo de 10^{-5} da função objetivo. A Tabela 1 fornece os resultados de margem de carga, a bifurcação associada a esta margem de carga e o tempo de processamento exigido pelo método proposto e pelo método *Look-Ahead* para o critério N-1 de desconexão de linhas de transmissão. Os resultados permitem as seguintes avaliações: (i) há margens de carga associadas a ambas as bifurcações e o método *Look-Ahead* forneceu somente a margem de carga associada a BSN que em muitos casos não era a margem de carga na região de segurança dinâmica do sistema teste, (ii) o tempo de processamento exigido pelo método proposto foi menor do que o método *Look-Ahead*.

#	Contingência	Método Proposto			Método Look-Ahead		
		Margem de Carga [p.u.]	Tempo [ms]	Bifurcação	Margem de Carga [p.u.]	Tempo [ms]	Bifurcação
1	5-6	1,1244	0,78	BH	1,1891	1051,22	BSN
2	9-39	1,1244	0,86	BH	1,1945	1009,92	BSN
3	8-9	1,1249	0,81	BH	1,1914	1113,74	BSN
4	3-4	1,1255	0,83	BH	1,1975	1063,65	BSN
5	14-15	1,1268	0,82	BH	1,2045	1012,33	BSN
6	4-5	1,1316	0,80	BH	1,1985	1074,84	BSN
7	13-14	1,1332	0,81	BH	1,1962	1037,21	BSN
8	6-7	1,1352	0,85	BH	1,2040	1044,83	BSN
9	15-16	1,1363	0,82	BH	1,1784	1021,08	BSN
10	10-13	1,1397	0,86	BH	1,2081	1011,75	BSN
11	5-8	1,1415	0,82	BH	1,2198	1088,45	BSN
12	7-8	1,1416	0,80	BH	1,2255	1054,13	BSN
13	17-27	1,1420	0,83	BH	1,2325	1008,75	BSN
14	21-22	1,1435	0,73	BH	1,2228	1022,14	BSN
15	4-14	1,1471	0,81	BH	1,2265	1008,33	BSN
16	10-11	1,1483	0,76	BH	1,2099	1032,51	BSN
17	Nenhuma	1,1492	0,85	BH	1,2344	1068,26	BSN
18	23-24	1,1493	0,78	BH	1,2310	1044,64	BSN
19	22-23	1,1493	0,80	BH	1,2344	1038,62	BSN
20	26-27	1,1496	0,74	BH	1,2284	1060,89	BSN
21	6-11	1,1500	0,81	BH	1,2000	1045,92	BSN
22	2-3	1,1501	0,85	BH	1,2149	1039,53	BSN
23	16-24	1,1512	0,84	BH	1,2315	1025,87	BSN
24	26-28	1,1517	0,84	BH	1,2333	1031,84	BSN
25	16-21	1,1524	0,85	BH	1,2314	1088,57	BSN
26	26-29	1,1524	0,83	BH	1,2332	1055,05	BSN
27	28-29	1,1536	0,81	BH	1,2309	1004,29	BSN
28	2-25	1,1589	0,77	BH	1,2332	1023,14	BSN
29	17-18	1,1592	0,82	BH	1,2309	1050,75	BSN
30	3-18	1,1595	0,81	BH	1,2338	1074,98	BSN
31	25-26	1,1602	0,83	BH	1,2319	1007,67	BSN
32	16-17	1,1637	0,84	BH	1,2315	1034,96	BSN
33	1-39	1,1666	0,88	BH	1,2320	1055,33	BSN
34	1-2	1,1667	0,87	BH	1,2309	1026,67	BSN

Tabela 1. Resultados de Margem de Carga para o Sistema Teste.

6 | CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um método baseado em modelo de otimização para a obtenção da margem de carga de sistemas de potência considerando as Bifurcações de Hopf e Sela-Nó. O modelo de otimização foi resolvido pelo algoritmo genético. Os resultados mostraram a necessidade de considerar ambas as bifurcações e fornecer a menor margem de carga do sistema. Além disso, os resultados foram alcançados exigindo um baixo esforço computacional.

REFERÊNCIAS

AJJARAPU, V. **Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control**, Boston, MA: Springer, 2007.

BENTO, M. E. C.; RAMOS, R. A. **A Method for Dynamic Security Assessment of Power Systems with Simultaneous Consideration of Hopf and Saddle-Node Bifurcations**, 2018 *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, pp. 1-5, 2018.

CANIZARES, C. *et al.* **Benchmark Models for the Analysis and Control of Small-Signal Oscillatory Dynamics in Power Systems**, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 715-722, Jan. 2017.

GOMES, S. Gomes; MARTINS, N.; PORTELA, C. **Computing small-signal stability boundaries for large-scale power systems**, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 747-752, May 2003.

SIVANANDAM, S. N.; DEEPA, S. N. **Introduction to Genetic Algorithms**, Berlin: Springer, 2008.

WANG, Y.; VITTAL, V.; ABDI-KHORSAND, M.; SINGH, C. **Probabilistic Reliability Evaluation Including Adequacy and Dynamic Security Assessment**, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 551-559, Jan. 2020.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Adquisição de dados 41

Amortecimento 84, 85, 87, 89, 92, 93, 95, 96, 97, 98, 99, 100

Ar 1, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 60

Arma 1, 2, 4, 6, 9, 10, 11, 12

Avaliação 6, 13, 27, 59, 67, 84, 89, 95, 119, 120, 123, 124

C

Controladores 80, 92, 93, 100

Controle 3, 6, 7, 8, 21, 24, 25, 40, 59, 68, 69, 70, 72, 73, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 93, 95, 99, 101, 118

Conversor CC-CC Cuk 102, 104, 106, 111, 114

Curso de graduação 117, 119

D

Desvios vocais 1, 2

Detecção 1, 2, 12, 13

E

Emulador 102, 104, 105, 114

Energias renováveis 57, 61, 65

Ensino remoto 117, 118, 119, 120, 124, 126

Estabilidade 65, 84, 85, 92, 105

Expansão da geração de energia 56, 57, 65

F

Fator de potência 68, 69, 73, 77, 80, 82

I

Ímãs permanentes 68, 74, 78, 81, 82, 83

J

Jogos digitais 15, 16, 18, 19, 25

K

K-nearest neighbor 1, 2, 5

M

Margem de carga 84, 85, 89, 90, 91

Metodologia avaliativa 117, 119

Metodologias ativas 15

Métodos diretos 84, 85

Modelagem computacional 27

Motor síncrono 68, 78, 82

O

Otimização 13, 39, 58, 65, 84, 85, 86, 88, 91, 92, 93, 95, 96, 97

P

Pandemia 59, 60, 117, 118, 120, 124, 126

Penetração do cordão de solda 40, 41

Pequenos sinais 68, 69, 72, 73, 82, 84, 92

Procesamento de imagen 41

Prototipagem virtual 27

R

Realidade virtual 16, 27

Resistência 110, 121, 122

Robótica móvel 15

S

Scratch 14, 15, 19, 20, 24, 25

Segurança dinâmica 84, 87, 89

Sistema elétrico brasileiro 56, 57, 58, 62

Sistemas multienergia 57, 65

T

Tensão 68, 69, 70, 71, 73, 76, 78, 80, 81, 82, 84, 89, 99, 100, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 112, 113, 118

Termografia infravermelha 41

Traçador de curvas 102, 104, 108, 109, 110, 111, 114

Treinamento 9, 17, 27

U

Unidade de medição fasorial 92



Atena
Editora
Ano 2022

ELECTRICAL ENGINEERING: PERSPECTIVE AND TENDENCY

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

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

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 



Atena
Editora
Ano 2022

ELECTRICAL ENGINEERING: PERSPECTIVE AND TENDENCY

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

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

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 