

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o
texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir de
09/12/2021.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JULIO DE MESQUITA FILHO” - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CRISTINA COUTINHO DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE NEWTON E DESACOPLADO RÁPIDO
MODIFICADOS PARA A DETERMINAÇÃO DA MARGEM DE CARREGAMENTO
DE SISTEMAS ELÉTRICOS**

Ilha Solteira

2021

CRISTINA COUTINHO DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE NEWTON E DESACOPLADO RÁPIDO
MODIFICADOS PARA A DETERMINAÇÃO DA MARGEM DE CARREGAMENTO
DE SISTEMAS ELÉTRICOS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Prof. Dr. Dilson Amâncio Alves
Orientador

Ilha Solteira

2021

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- O48a Oliveira, Cristina Coutinho de.
Avaliação de métodos de Newton e desacoplado rápido modificados para a determinação da margem de carregamento de sistemas elétricos / Cristina Coutinho de Oliveira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
134 f. : il.
- Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2021
- Orientador: Dilson Amâncio Alves
Inclui bibliografia
1. Fluxo de potência. 2. Newton-raphson. 3. Injeção de corrente. 4. Coordenadas polares. 5. Curva P-V. 6. Fluxo de potência continuado.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Avaliação de Métodos de Newton e Desacoplado Rápido Modificados para a Determinação da Margem de Carregamento de Sistemas Elétricos

AUTORA: CRISTINA COUTINHO DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: DILSON AMANCIO ALVES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. DILSON AMANCIO ALVES (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. ANNA DIVA PLASENCIA LOTUFO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. LUIZ CARLOS PEREIRA DA SILVA (Participação Virtual)
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Prof. Dr. JOSÉ GUILHERME MAGALINI SANTOS DECANINI (Participação Virtual)
Departamento de Eletrotécnica / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP

Ilha Solteira, 09 de junho de 2021

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a **minha família**.
Meu refúgio, meu abrigo, minha força motriz.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela minha vida e por permitir que eu chegasse até aqui. Agradeço a Ele por estar presente em todos os momentos de minha vida e, principalmente, por vir até mim em todas as vezes que precisei, por intermédio do acolhimento de um amigo, dos abraços de minha mãe e dos sorrisos de meus irmãos. Obrigada, meu Deus!

Agradeço a toda minha família, que mesmo de longe, sempre demonstrou apoio e confiança em mim. Em especial, minha querida mãezinha, Vera Lúcia, que sempre acreditou em mim.

Agradeço meu orientador, Dilson, um verdadeiro mestre, pela orientação e, principalmente pela dedicação e paciência que teve comigo durante todo o tempo. Muito obrigada por tudo, professor.

A todos os meus amigos que estiveram ao meu lado durante este percurso. Em especial, a minha querida amiga, Lizete Maria.

Agradeço a Universidade Estadual Paulista - UNESP e ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira pelas instalações disponíveis para desenvolver minha pesquisa e pela excelente qualidade acadêmica.

Agradeço aos colegas, amigos, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), por todo apoio. E também aqueles que, direta ou indiretamente, apoiaram-me nesta conquista.

Agradeço ao CNPq pelo apoio financeiro concedido durante o período de desenvolvimento desse trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Não deixe que ninguém tire a sua esperança.”

Papa Francisco

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre algumas das diversas metodologias existentes na literatura específica para a resolução do Fluxo de Potência (FP) e Fluxo de Potência Continuado (FPC), utilizando métodos baseados em equações de injeção de potência e em equações de injeção de corrente. A formulação de injeção de potência é baseada nas equações de balanço de potência ativa e reativa de cada barra, enquanto que a de injeção de corrente utiliza equações de balanço de corrente.

É apresentado o desenvolvimento de uma versão alternativa para o método do FP Newton-Raphson baseado em equações de injeção de corrente escritas em coordenadas polares, assim como, o FP via injeção de corrente Desacoplado Rápido, versão BX. As comparações de desempenho são feitas com as versões de injeção de potência correspondentes ao método de Newton-Raphson e FP Desacoplado Rápido escrito em coordenadas polares. Os métodos foram testados em sistemas de teste do IEEE-14, 30, 57, 118 e 300 barras e duas versões reais de grande porte do sistema elétrico SUL/SULDESTE brasileiro 638 e 787 barras considerando: diferentes relações R/X para os ramos e diferentes condições de carregamentos. As simulações foram realizadas em diversas condições de carregamento e relações R/X para os ramos para fins de avaliação de robustez. Os resultados da simulação mostraram que o desempenho dos métodos de injeção de corrente propostos é semelhante aos de injeção de potência.

Apresenta-se também uma técnica para obtenção da margem de carregamento, sem problemas relacionados à singularidade da matriz Jacobiana e que proporcione um baixo número de iterações. A técnica consiste no uso de uma equação de reta localizada num outro plano que o comumente empregado para o traçado da curva P-V, a qual proporciona um menor número de pontos de singularidade da matriz na nova trajetória de soluções. Dos resultados constatou-se que a técnica proposta é mais eficiente, proporcionando uma redução no número de iterações quando comparada com outras metodologias.

Palavras-chave: Fluxo de Potência. Newton-Raphson. Injeção de Corrente. Coordenadas Polares. Curva P-V. Fluxo de Potência Continuado.

ABSTRACT

This work presents a comparative study between some of the several methodologies existing in the specific literature for the resolution of Power Flow (PF) and Continuous Power Flow (CPF), using methods based on power injection equations and current injection equations. The power injection formulation is based on the equations of active and reactive power balance of each bus, while the current injection uses the current balance equations.

The development of an alternative version of the Newton-Raphson power flow method based on current injection equations written in polar coordinates is presented. Its current injection fast decoupled power flow, BX version, is also presented. Performance comparisons are made with their corresponding power injection versions of the Newton and fast decoupled power flow written in polar coordinates. The methods have been tested on 14, 57, 118 and 300-bus IEEE test systems and two realistic Brazilian systems of 638 and 787 buses, corresponding to parts of the South-Southeast Brazilian system. Simulations were carried out under several loading conditions and R/X transmission line ratios for robustness evaluation purposes. The simulation results showed that the performance of the proposed current injection methods are similar to power injection ones.

A technique for obtaining the loading margin is also presented, without problems related to the singularity of the Jacobian matrix and that provides a low number of iterations. The technique consists in the use of a straight line equation located in another plane than the one commonly used to trace the P-V curve, which provides a smaller number of singularity points of the matrix in the new solution path. From the results it was found that the proposed technique is more efficient, providing a reduction in the number of iterations when compared with other methodologies.

Keywords: Power Flow. Newton-Raphson. Current Injection. Polar Coordinates. P-V Curve. Continuation Power Flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva P-V	28
Figura 2: Margem de Carregamento	29
Figura 3: Margem de carregamento segura de pré e pós-contingência.....	30
Figura 4: Curva P-V obtida por meio de sucessivas soluções do FP	32
Figura 5(a): Curva P-V com redução de passo	33
Figura 5(b): Determinante da matriz J	33
Figura 6: Técnicas de Parametrização Local.....	35
Figura 7: Método da continuação com o preditor tangente utilizando λ como parâmetro.....	39
Figura 8: Comparação entre os métodos FPC com preditor tangente e secante	40
Figura 9: Comparação entre os métodos FPC com preditor tangente e secante	43
Figura 10: Perda total de potência ativa como função de λ para o sistema IEEE-57.....	46
Figura 11: Curva P-V típica de um sistema com estabilidade de tensão com características predominantemente local.....	47
Figura 12(a): Procedimento geral para o traçado da curva P-V: curva $\lambda - \Sigma y_k$	48
Figura 12(b): Procedimento geral para o traçado da curva P-V: detalhe do processo de convergência em torno do PMC.	48
Figura 13: Parábolas no plano λ - P_a determinadas pelo método proposto	50
Figura 14(a): Sistema IEEE-638: curva λ - P_a obtida com o procedimento proposto.....	51
Figura 14(b): Sistema IEEE-638: região do PMC ampliada.....	51
Figura 14(c): Sistema IEEE-638: magnitude da tensão na barra crítica como função do carregamento.....	51
Figura 14(d): Sistema IEEE-638: número de iterações gastas para obtenção dos pontos na curva λ - P_a	51
Figura 15: Algoritmo método Desacoplado resolução simultânea.	69
Figura 16: Algoritmo método Desacoplado resolução alternada.	70
Figura 17(a): Sistema IEEE-118 barras - Perfil de magnitude da tensão	81
Figura 17(b): Sistema IEEE-118 barras - Perfil de ângulo de fase.....	82
Figura 17(c): Sistema IEEE-118 barras - <i>Mismatch</i> total em p.u. para a relação $3,0 \times R / 1,0 \times X$	82
Figura 18(a): Sistema 787 barras – Curva P-V da barra crítica	83
Figura 18(b): Sistema 787 barras - <i>Mismatch</i> total em p.u. para a relação $1,0 \times R / 1,0 \times X$ e $\lambda = 1,12$ p.u.	84
Figura 18(c): Sistema 787 barras - <i>Mismatch</i> total em p.u. para a relação $1,0 \times R / 1,0 \times X$ e $\lambda = 1,127$ p.u.	84

Figura 19(a): Sistema 787 barras – Ângulos de fase e diferenças angulares das tensões nodais para o caso base ($\lambda = 1,0$ p.u. e $1,0 \times R/1,0 \times X$): ângulos de fase das tensões nodais.	86
Figura 19(b): Sistema 787 barras – Ângulos de fase e diferenças angulares das tensões nodais para o caso base ($\lambda = 1,0$ p.u. e $1,0 \times R/1,0 \times X$): diferenças angulares entre as barras das LT.	86
Figura 20(a): Sistema 787 barras - Ângulos de fase e diferenças angulares das tensões nodais para $\lambda = 1,0$ p.u. e condição $2,4 \times R/1,0 \times X$: ângulos de fase das tensões nodais.....	87
Figura 20(b): Sistema 787 barras - Ângulos de fase e diferenças angulares das tensões nodais para $\lambda = 1,0$ p.u. e condição $2,4 \times R/1,0 \times X$: diferenças angulares entre as barras das LT.....	87
Figura 20(c): Sistema 787 barras - Ângulos de fase e diferenças angulares das tensões nodais para $\lambda = 1,0$ p.u. e condição $2,4 \times R/1,0 \times X$: com a adição, na oitava iteração, de $50,93^\circ$ em todos os ângulos de fase das tensões nodais.....	87
Figura 21(a): Sistema IEEE-118 barras - Perfil de magnitude da tensão	92
Figura 21(b): Sistema IEEE-118 barras - Perfil de ângulo de fase.....	93
Figura 22(c): Sistema IEEE-118 barras - <i>Mismatch</i> total em p.u.	93
Figura 23: Curvas (λ , Pa) para os dois sistemas estudados.....	95
Figura 24: Curvas ($ V_k $, Pa) para os dois sistemas estudados.	96
Figura 25(a): Desempenho da metodologia proposta para o sistema IEEE 14 barras - Curva P-V da barra de geração 2 (λ , $ V_2 $).....	98
Figura 25(b): Desempenho da metodologia proposta para o sistema IEEE 14 barras - Curva ($ V_{14} $, Pa)..	99
Figura 26(a): Desempenho da metodologia proposta para o sistema IEEE-14 barras: Curva P-V da barra de geração 8 (λ , $ V_8 $)	99
Figura 26(b): Desempenho da metodologia proposta para o sistema IEEE-14 barras: Curva ($ V_{14} $, Pa).	99
Figura 27(a): Curvas P-V do sistema IEEE-14 barras obtidas por: (a) metodologia proposta	100
Figura 27(b): Curvas P-V do sistema IEEE-14 barras obtidas por: parametrizado por Pa .	100
Figura 27(c): Curvas P-V do sistema IEEE-14 barras obtidas por: parametrizado por $ V_2 $.	100
Figura 27(d): Curvas P-V do sistema IEEE-14 barras obtidas por: parametrizado por λ	100
Figura 27(e): Curvas P-V do sistema IEEE-14 barras obtidas por: parametrizado por $ V_{14} $ (crítica).....	100
Figura 27(f): Curvas P-V do sistema IEEE-14 barras obtidas por: parametrizado por $ V_8 $..	100
Figura 28(a): Número de iterações necessárias para obtenção das curvas P-V do sistema IEEE 14 barras: metodologia proposta.....	101
Figura 28(b): Número de iterações necessárias para obtenção das curvas P-V do sistema IEEE 14 barras: parametrizado por Pa	101

Figura 28(c): Número de iterações necessárias para obtenção das curvas P-V do sistema IEEE 14 barras: parametrizado por $ V_2 $	101
Figura 28(d): Número de iterações necessárias para obtenção das curvas P-V do sistema IEEE 14 barras: parametrizado por λ	101
Figura 28(e): Número de iterações necessárias para obtenção das curvas P-V do sistema IEEE 14 barras: parametrizado por $ V_{14} $ (crítica)	101
Figura 28(f): Número de iterações necessárias para obtenção das curvas P-V do sistema IEEE 14 barras: parametrizado por $ V_8 $	101
Figura 29(a): Curvas P-V das barras 51 e 7062	103
Figura 29(b): Curva (V_{526} , Pa)	103
Figura 30(a): Curvas P-V do sistema IEEE-300 barras obtidas por: metodologia proposta	104
Figura 30(b): Curvas P-V do sistema IEEE-300 barras obtidas por: parametrizado por Pa .	104
Figura 30(c): Curvas P-V do sistema IEEE-300 barras obtidas por: parametrizado por $ V_{51} $	104
Figura 30(d): Curvas P-V do sistema IEEE-300 barras obtidas por: parametrizado por λ ..	104
Figura 30(e): Curvas P-V do sistema IEEE-300 barras obtidas por: parametrizado por $ V_{526} $ (crítica)	104
Figura 30(f): Curvas P-V do sistema IEEE-300 barras obtidas por: parametrizado por $ V_{7062} $	104
Figura 31(a): Número de iterações necessárias para obtenção das curvas P-V do sistema IEEE-300 barras: metodologia proposta	104
Figura 31(b): Número de iterações necessárias para obtenção das curvas P-V do sistema IEEE-300 barras: parametrizado por Pa	104
Figura 31(c): Número de iterações necessárias para obtenção das curvas P-V do sistema IEEE-300 barras: parametrizado por $V_{51} $	104
Figura 31(d): Número de iterações necessárias para obtenção das curvas P-V do sistema IEEE-300 barras: parametrizado por λ	104
Figura 31(e): Número de iterações necessárias para obtenção das curvas P-V do sistema IEEE-300 barras: parametrizado por $ V_{526} $ (crítica)	104
Figura 31(f): Número de iterações necessárias para obtenção das curvas P-V do sistema IEEE-300 barras: parametrizado por $ V_{7062} $	104
Figura 32(a): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-14: Curva P-V da barra crítica (14)	112
Figura 32(b): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-14: Pontos da curva P-V ...	112
Figura 32(c): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-14: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos	113

Figura 33(a): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-30: Pontos da curva P-V da barra 30	113
Figura 33(b): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-14: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos.....	114
Figura 34(a): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-57: Pontos da curva P-V da barra 31	114
Figura 34(b): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-57: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos.....	115
Figura 35(a): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-118: Pontos da curva P-V da barra 52	115
Figura 35(b): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-118: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos.....	116
Figura 36(a): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-300: Pontos da curva P-V da barra 526	116
Figura 36(b): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-300: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos.....	117
Figura 37(a): Desempenho dos métodos para o sistema 638 barras: Pontos da curva P-V da barra 150	118
Figura 37(b): Desempenho dos métodos para o sistema 638 barras: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos.....	119
Figura 38(a): Desempenho dos métodos para o sistema 787 barras: Pontos da curva P-V da barra 576	119
Figura 38(b): Desempenho dos métodos para o sistema 787 barras: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos.....	120
Figura 39: Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-14: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos	121
Figura 40: Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-30: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos	122
Figura 41: Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-57: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos	122
Figura 42: Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-118: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos	123
Figura 43: Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-300: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos	123
Figura 44(a): Desempenho dos métodos para o sistema 638 barras: Pontos da curva P-V da barra 150	124

Figura 44(b): Desempenho dos métodos para o sistema 638 barras: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos.....	124
Figura 45(a): Desempenho dos métodos para o sistema 787 barras: Pontos da curva P-V da barra 576	125
Figura 45(b): Desempenho dos métodos para o sistema 787 barras: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de barras	54
Tabela 2 - Desempenho dos métodos para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-14 barras.	77
Tabela 3 - Desempenho dos métodos para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-30 barras	77
Tabela 4 - Desempenho dos métodos para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-57 barras	78
Tabela 5 - Desempenho dos métodos para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-118 barras	78
Tabela 6 - Desempenho dos métodos para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-300 barras	78
Tabela 7 - Desempenho dos métodos para diferentes condições de carregamentos - Sistema 638 barras	78
Tabela 8 - Desempenho dos métodos para diferentes condições de carregamentos - Sistema 787 barras	78
Tabela 9 - Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-14 barras	79
Tabela 10 - Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-30 barras	79
Tabela 11 - Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-57 barras	80
Tabela 12 - Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-118 barras	80
Tabela 13 - Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-300 barras	80
Tabela 14 - Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema 638 barras...	80
Tabela 15 - Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema 787 barras...	81
Tabela 16 - Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema 787 barras...	88
Tabela 17 - Avaliação de desempenho para diferentes condições de carregamentos - Sistema 787 barras	88
Tabela 18 - Avaliação de desempenho para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-14 barras	89

Tabela 19 - Avaliação de desempenho para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-30 barras	89
Tabela 20 - Avaliação de desempenho para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-57 barras	89
Tabela 21 - Avaliação de desempenho para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-118 barras	90
Tabela 22 - Avaliação de desempenho para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-300 barras	90
Tabela 23 - Avaliação de desempenho para diferentes condições de carregamentos - Sistema 638 barras	90
Tabela 24 - Avaliação de desempenho para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-14 barras	90
Tabela 25 - Avaliação de desempenho para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-30 barras	91
Tabela 26 - Avaliação de desempenho para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-57 barras	91
Tabela 27 - Avaliação de desempenho para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-118 barras	91
Tabela 28 - Avaliação de desempenho para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-300 barras	91
Tabela 29 - Avaliação de desempenho para diferentes relações R/X - Sistema 638 barras	91
Tabela 30 - Determinante da matriz Jacobiana parametrizado por $ V_2 $	100
Tabela 31 - Número Total de iterações (IEEE 14 barras)	102
Tabela 32 - Número Total de iterações (IEEE 300 barras)	105
Tabela 33 - Número Total de iterações para traçado da curva P-V completa	105
Tabela 34 - Desempenho dos métodos considerando o mesmo preditor tangente	118
Tabela 35 - Desempenho dos métodos considerando o mesmo preditor tangente	120
Tabela 36 - Desempenho dos métodos considerando o mesmo preditor tangente	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BD	Banco de Dados
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
cg	Carga
FP	Fluxo de Potência
FPC	Fluxo de Potência Continuado
FPCIP	Fluxo de Potência Continuado via Injeção de Potência
FPCIC	Fluxo de Potência Continuado via Injeção de Corrente
FPCICQ	Fluxo de Potência Continuado via Injeção de Corrente Q_{ger}
FPCICM	Fluxo de Potência Continuado via Injeção de Corrente Modificado
FPCICH	Fluxo de Potência Continuado via Injeção de Corrente Híbrido
FPIC	Fluxo de Potência via Injeção de Corrente
FPICH	Fluxo de Potência via Injeção de Corrente Híbrido
FPICM	Fluxo de Potência via Injeção de Corrente Modificado
FPICQ	Fluxo de Potência via Injeção de Corrente Q_{ger}
FPIP	Fluxo de Potência Injeção de Potência
FPIPDR	Fluxo de Potência Injeção de Potência Desacoplado Rápido
FPICDR	Fluxo de Potência Injeção de Corrente Desacoplado Rápido
ger	gerada
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
Iter θ	Número de meia iterações P- θ
Iter V	Número de meia iterações Q-V
J	Matriz Jacobiana
LT	Linha de Transmissão
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MC	Margem de Carregamento
MW	Megawatt
NB	Número de Barras
NC	Não Converge
ND	Não Diverge
N-R	Newton Raphson

NTI	Número Total de Iterações
NTIPMC	Número Total de Iterações para atingir o Ponto Máximo de Carregamento
PMC	Ponto Máximo de Carregamento
P_{cg}	Potência ativa de carga
P_{ger}	Potência ativa gerada
P_{sp}	Potência ativa especificada
Q_{cg}	Potência reativa de carga
Q_{ger}	Potência reativa gerada
Q_{sp}	Potência reativa especificada
p.u.	Por unidade
P-V	Curva da magnitude de tensão em função da potência ativa
PQ	Barra de carga
PV	Barra de geração
Q-V	Curva da potência reativa em função da magnitude de tensão
R	Resistência
SEP	Sistema Elétrico de Potência
sp	Especificado
t	Transposto
X	Reatância

LISTA DE SÍMBOLOS

*	Não obtém o ponto de máximo carregamento
**	Não traça a curva toda

Conjuntos

Ω_k	Conjunto formado por todas as barras diretamente conectadas a barra k ;
K	Conjunto formado por todas as barras vizinhas a k , inclusive a própria k .

Parâmetros e variáveis

λ	Fator de carregamento
σ	Tamanho do passo preditor
$\Delta \sigma$	Variação do passo preditor

Matrizes

J	Matriz Jacobiana FP
J_P	Matriz Jacobiana FPP - (FP)
J_I	Matriz Jacobiana FPIC - (FP)
J'_I	Matriz Jacobiana FPICM - (FP)
J''_I	Matriz Jacobiana FPICQ - (FP)
J_M	Matriz Jacobiana FPC
J_{IM}	Matriz Jacobiana FPIC - (FPC)
J'_{IM}	Matriz Jacobiana FPICM - (FPC)
J''_{IM}	Matriz Jacobiana FPICQ - (FPC)
Y	Matriz de admitância
G	Parte real da matriz admitância
B	Parte imaginária da matriz admitância

Vetores

$ \mathbf{V} $	Vetor das magnitudes das tensões nodais
$\Delta \mathbf{V} $	Fator de correção das magnitudes das tensões nodais
$\boldsymbol{\theta}$	Vetor dos ângulos das tensões nodais
$\Delta\boldsymbol{\theta}$	Fator de correção dos ângulos das tensões nodais
$\Delta\mathbf{P}$	Vetor das injeções de potência ativa nas barras PQ e PV
$\Delta\mathbf{Q}$	Vetor das injeções de potência reativa nas barras PQ
$\Delta\mathbf{F}$	Vetor das equações dos <i>mismatches</i> de corrente complexa
$\Delta\mathbf{G}$	Vetor da parte real do <i>mismatch</i> de corrente
$\Delta\mathbf{H}$	Vetor da parte imaginária do <i>mismatch</i> de corrente
$\mathbf{G}$	Vetor das equações dos <i>mismatches</i> de potência ativa e reativa
$\mathbf{x}$	Vetor composto por $ \mathbf{V} $ e $\boldsymbol{\theta}$
$\Delta\mathbf{x}$	Variação para correção do vetor $\mathbf{x}$, correspondente a $\Delta \mathbf{V} $, $\Delta\boldsymbol{\theta}$
$\mathbf{t}$	Vetor tangente
$\mathbf{e}_k$	Vetor linha

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 OBJETIVO DA TESE	24
1.2 ESTRUTURA DA TESE	24
2 REFERENCIAL TEÓRICO	26
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	26
2.2 MARGEM DE CARREGAMENTO	28
2.1.1 Margem de Carregamento Pós-Contingência	29
2.1.2 Métodos para determinar a Margem de Carregamento	30
2.3 FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO: ESTADO DA ARTE.....	31
2.4 FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO: FORMULAÇÃO VIA INJEÇÃO DE POTÊNCIA	35
2.4.1 Passo Preditor	37
2.4.1.1 Preditor Tangente	37
2.4.1.2 Preditor Secante	39
2.4.2 Parametrização	41
2.4.3 Passo Corretor	42
2.4.4 Controle do Passo Preditor	43
2.5 UM LEVANTAMENTO DE PROPOSTAS DE PARAMETRIZAÇÃO	44
3 FLUXO DE POTÊNCIA: FORMULAÇÕES E MÉTODOS	53
3.1 FLUXO DE POTÊNCIA: FORMULAÇÃO VIA INJEÇÃO DE POTÊNCIA	53
3.1.1 Formulação via Injeção de Potência – Método FP.....	57
3.1.2 Formulação via Injeção de Potência – Método FPIP	59
3.2 FLUXO DE POTÊNCIA: FORMULAÇÕES VIA INJEÇÃO DE CORRENTE	61
3.2.1 Formulação via Injeção de Corrente – Método FPICM.....	61
3.2.2 Formulação via Injeção de Corrente Híbrido – Método FPICH.....	64
3.3 FLUXO DE POTÊNCIA: MÉTODO DESACOPLADO	67
3.3.1 Desacoplado: Formulação via Injeção de Potência	68
3.3.1.1 Método Desacoplado: Algoritmo Simultâneo	68
3.3.1.2 Método Desacoplado: Algoritmo Alternado	69
3.3.2 Desacoplado Rápido: Formulação via Injeção de Potência – Método FPIPDR...	71
3.3.2.1 Desacoplado Rápido: Versão XB.....	72

3.3.2.2	<i>Desacoplado Rápido: Versão BX</i>	72
3.3.3	Desacoplado Rápido: Formulação via Injeção de Corrente – Método FPICDR .	73
3.4	ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS MÉTODOS	75
3.4.1	Análise de desempenho dos sistemas	76
3.4.2	Desacoplado Rápido: Uma proposta de melhoria para o Método FPICDRM	83
3.4.3	Análise de desempenho dos sistemas	89
4	FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO	94
4.1	FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO: TÉCNICA DE PARAMETRIZAÇÃO PROPOSTA EM OLIVEIRA, BONINI NETO E ALVES (2020)	94
4.1.1	Algoritmo do Método Proposto	97
4.1.2	Análise de desempenho do sistema IEEE-14 barras	98
4.1.3	Análise de desempenho do sistema IEEE-300 barras	102
4.2	FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO: FORMULAÇÃO VIA INJEÇÃO DE CORRENTE	105
4.2.1	Passo Preditor e Corretor para o método FPCIC	107
4.2.2	Passo Preditor e Corretor para o método FPCICM	108
4.2.3	Passo Preditor e Corretor para o método FPCICQ	108
4.2.4	Passo Preditor e Corretor para o método FPCICH	109
4.3	ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS SISTEMAS	110
4.3.1	Desempenho dos Métodos para o traçado da curva P-V e obtenção do PMC considerando os mesmos pontos previstos	111
4.3.1.1	<i>Análise de desempenho para sistemas do IEEE</i>	111
4.3.1.2	<i>Análise de desempenho para os sistemas de grande porte</i>	118
4.3.2	Desempenho dos métodos para o traçado da curva P-V e obtenção do PMC considerando os respectivos previstos	121
5	CONCLUSÕES	127
5.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	129
	REFERÊNCIAS	130
	APÊNDICE A	134
A.1	PUBLICAÇÕES EM PERIÓDICOS	134
A.2	PUBLICAÇÕES EM CONGRESSOS	134
A.3	PUBLICAÇÃO SUBMETIDA EM PERIÓDICO	134

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a qualidade e a continuidade do fornecimento de energia elétrica são essenciais para nosso modo de vida. Assim, para se manter o sistema operando de forma segura e evitar-se o colapso de tensão, passou-se a monitorar a estabilidade estática de tensão durante a operação em tempo real do sistema elétrico de potência.

Mesmo sendo realizados grandes investimentos no setor energético, reduzir a possibilidade dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) de operar próximos aos seus limites de transmissão é um enorme desafio para as indústrias transmissão de energia elétrica. Essa dificuldade em reduzir a possibilidade dos SEP de operarem próximos a seus limites operacionais é resultado de vários fatores tais como: o desequilíbrio entre oferta e demanda; os picos de consumo de energia elétrica; o uso contínuo e intenso de termoelétricas que pode resultar em um blecaute; as longas distâncias entre as usinas e centro de consumo que aumentam a probabilidade de ocorrer problemas de instabilidade de tensão; entre outros.

Nessa perspectiva, uma ferramenta frequentemente utilizada nos estudos de planejamento, e operação de SEP é Fluxo de Potência (FP). Nestes estudos são avaliadas diversas condições operativas em regime normal ou de contingência, bem como são determinadas as estratégias corretivas necessárias para a manutenção dos níveis aceitáveis de tensão e limites de transmissão de potência. As equações do problema de fluxo de potência podem ser expressas em coordenadas polares, retangulares ou híbridas, sendo baseadas no balanço de injeção de potência ou de corrente (HAWARY, 1995; SAADAT, 1990; MONTICELLI, 1983; EL-ABIAD, 1983; POWELL, 2004; STOTT, 1974).

A representação das barras de geração com tensão controlada (barras do tipo PV) nas formulações Newton-Raphson de injeção de corrente têm sido o enfoque de diversos estudos recentes (COSTA, MARTINS; 1999; COSTA, ROSA; 2008; KULWORAWANICHONG, 2010; KAMEL, ABDEL-AKHER, JURADO; 2013; ABHYANKAR, FLUECK; 2014).

Os motivos desses estudos se devem ao fato de os métodos de injeção de corrente mostrarem-se adequados para a solução de sistemas de grande porte com barras de carga, mas apresentarem uma redução na característica de convergência quando da existência de barras PV's.

1.1 OBJETIVO DA TESE

Os principais objetivos desse trabalho são:

- Apresentar uma ideia sobre o problema do FP situando o trabalho desenvolvido no contexto geral deste assunto;
- Expor a metodologia convencional para a resolução do FP, assim como o estudo de outras metodologias para a sua resolução, e apresentar duas propostas para a resolução deste problema;
- Implementar uma nova metodologia para o Fluxo de Potência Continuado (FPC), visando o traçado completo da curva P-V e obtenção do ponto de máximo carregamento e comparar resultados obtidos com a metodologia proposta com as existentes na literatura.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

Para a boa compreensão da proposta central através da apresentação da teoria envolvida, este trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro tem como objetivo situar o leitor no que será apresentado nos demais capítulos.

Com o intuito de criar subsídios que são necessários para a compreensão do problema e das possíveis soluções, apresenta-se no Capítulo 2 uma revisão bibliográfica, com a finalidade de introduzir os conceitos básicos sobre: Margem de Carregamento (MC), Métodos para determinar a MC e o FPC.

No Capítulo 3 são apresentados os conceitos básicos de FP. São apresentados os métodos de Newton-Raphson (N-R) e Desacoplado Rápido baseado nas equações de balanço de injeção de potência, assim como, nas equações de balanço de injeção de corrente. Também, são apresentadas duas propostas para a melhoria dos métodos. Nesse Capítulo também são realizadas comparações dos resultados obtidos com cada método e uma análise comparativa de sua eficiência.

O Capítulo 4 apresenta-se o FPC relativos aos métodos de N-R descritos no Capítulo 3, bem como uma proposta de parametrização associada com a mudança de plano geométrico para obtenção da margem de carregamento de sistemas elétricos de potência.

As conclusões para a pesquisa são apresentadas no Capítulo 5, assim como as sugestões para os trabalhos futuros.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho abordou-se os métodos FP N-R e Desacoplado Rápido, e o FPC, formulados considerando as equações de injeção de potência e as equações de injeção de corrente. A formulação de injeção de potência é baseada nas equações de balanço de potência ativa e reativa de cada barra, enquanto que a formulação baseada em injeção de corrente utiliza expressões referentes ao balanço de corrente. Para ambas as formulações, as tensões nodais são expressas em termos de coordenadas polares.

Além das metodologias já existentes na literatura específica para a resolução problema, outras três propostas de melhoria são apresentadas. Dessa forma, um estudo comparativo entre as metodologias abordadas é realizado para comparar a eficiência dos métodos.

As comparações de desempenho foram feitas para várias condições de carregamento e diferentes relações R/X nos sistemas de teste IEEE-14, 30, 57, 118 e 300 barras, bem como para sistemas reais, como as duas versões do sistema brasileiro Sul/Sudeste de 638 e 787 barras.

A primeira proposta, denominada Fluxo de Potência via Injeção de Corrente Híbrida (FPICH), que foi formulada considerando as equações de balanço de injeção de corrente, propõe uma nova formulação para barras de geração (barras PV's), cuja potência reativa está dentro de seus limites, visto que, nestas a potência reativa gerada, a priori, não é conhecida. Nessa perspectiva, é possível resolver o problema, através de manipulações algébricas das equações de balanço de injeção de corrente de forma a eliminar a variável desconhecida. O desempenho deste método foi comparado com os demais métodos N-R abordados e os resultados da simulação demonstraram que o desempenho do método de injeção de corrente proposto é semelhante ao de sua respectiva versão de injeção de potência.

A segunda metodologia proposta neste trabalho consiste na formulação do fluxo de potência através da versão BX do método desacoplado rápido, baseado nas equações de injeção de corrente escritas em termos de coordenadas polares. Seu desempenho é comparado com a versão BX do método desacoplado formulado via equações de injeção de potência.

Verificou-se que o aumento da razão R/X aproxima o sistema do valor de máximo carregamento correspondente, e esta é a principal razão pela qual os métodos desacoplados não convergem para razões maiores.

Além do efeito de aproximação do PMC, decorrente do aumento da relação R/X , constatou-se que a versão BX do fluxo de potência desacoplado rápido, via injeção de corrente, é mais afetada devido ao uso do ângulo de tensão da barra k , ao invés da diferença de ângulo de tensão, como no caso da versão BX do fluxo de potência desacoplado rápido via injeção de potência. Para superar o problema apresentado pelo método FPICDR, uma estratégia é proposta. A estratégia consiste em adicionar, em uma determinada iteração, um determinado ângulo a todas as barras proporcionando com isso uma melhora na convergência, em decorrência da obtenção de uma simetria em relação ao eixo horizontal, e também uma redução na faixa de variação dos ângulos de fase das tensões de barra.

Com relação aos métodos de fluxo de potência continuado via injeção de corrente, os resultados também confirmam que as duas versões: a denominada por fluxo de potência via injeção de corrente modificado, que considera a dependência da potência reativa gerada das barras PV's com as variáveis de estado, e a denominada por fluxo de potência continuado via injeção de corrente híbrido, que faz uso da equação de balanço de injeção de corrente para barras PQ e da equação de balanço de injeção de potência ativa para as barras PV's, levam a uma melhora significativa de desempenho. Observa-se também um bom desempenho no método continuado por injeção de corrente que considera a injeção de potência reativa da barra PV como uma nova variável. Entretanto, quando comparado aos demais este último apresenta como desvantagem o acréscimo do número de equações e, portanto, da dimensão da matriz Jacobiana, proporcionalmente ao número de barras PV's.

E por fim, apresentou-se uma nova técnica de parametrização para obtenção da margem de carregamento e o traçado completo das curvas P-V de sistemas elétricos de potência sem problemas relacionados à singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de potência continuado. A técnica consistiu em uma mudança de plano e consequentemente acarretou em uma trajetória de soluções mais atrativa para obtenção das curvas P-V. Em relação aos resultados, a técnica utilizando as perdas totais de potência ativa apresentou bons resultados em termos de iterações se comparada a metodologia proposta, mas falhou para sistemas maiores. Já a técnica que possui a tensão da barra crítica como parâmetro foi a única, juntamente com a técnica proposta, que conseguiu obter as curvas P-V completas dos dois sistemas apresentados, mas com um número global maior de iterações em relação a técnica proposta.

5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Para os próximos trabalhos propõem-se:

- estudos dos métodos com rotação de eixos, desenvolvidos para adequar o os métodos desacoplados às redes de distribuição, visando a viabilidade de sua aplicação à versão BX do método desacoplado formulado via equações de injeção de corrente;
- a implementação do método da continuação na versão BX do método desacoplado formulado via equações de injeção de corrente;
- a implementação do controle de intercâmbio nas versões de Newton-Raphson apresentadas;
- a aplicação das versões apresentadas nos estudos de contingência de linhas e transformadores.

REFERÊNCIAS

- ADUSUMILLI, B. S.; KUMAR, B. K. Modified affine arithmetic based continuation power flow analysis for voltage stability assessment under uncertainty. **IET Generation, Transmission & Distribution**, [s. l.], v. 12, p. 4225–4232, 2018.
- AJJARAPU, V. Identification of steady-state voltage stability in power systems. **International Journal of Energy Systems**, Calgary, v. 11, n. 1, p. 43-46, 1991.
- AJJARAPU, V.; CHRISTY, C. The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 7, n. 1, p. 416-423, 1992.
- AJJARAPU, V.; LAU, P. L. & BATULA, S. An Optimal Reactive Power Planning Strategy Against Voltage Collapse. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 9, n.2, p. 906-917, 1994.
- AJJARAPU V. **Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control**. New York: Springer, 2006.
- ALVES D. A. **Obtenção do ponto de máximo carregamento em sistemas elétricos de potência utilizando novas técnicas de parametrização para o método de continuação**. 2000. 120 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.
- ALVES, D. A.; SILVA, L. C. P.; CASTRO, C. A.; COSTA, V. F. da. Continuation fast decoupled power flow with secant predictor. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, p. 1078 – 1085, 2003.
- BOTURA, C. P. **Análise linear de sistemas**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.
- BONINI A. N.; ALVES D. A. Técnica de Parametrização Global para o Fluxo de Carga Continuado. **Revista Controle & Automação – SBA – Sociedade Brasileira de Automática**, Campinas, v. 21, n. 4, 2010.
- BONINI A. N., ALVES D. A. Técnica de Parametrização Geométrica para o Fluxo de Carga Continuado Baseado nas Variáveis Tensão Nodal e Fator de Carregamento. **Revista Controle & Automação – SBA – Sociedade Brasileira de Automática**, Brasil, v. 19, n. 3, p. 350 – 366, 2008.
- CAÑIZARES, C. A.; ALVARADO, F. L.; DEMARCO, C. L.; DOBSON, I.; LONG, W. F. Point of Collapse Methods Applied to AC/DC Power Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 7, n. 2, p. 673-683, 1992.
- CAÑIZARES, C. A.; ALVARADO, F. L. Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 8, n. 1, p. 1-8, 1993.
- CHIANG, H. D.; FLUECK, A.; SHAH, K.S.; BALU, N. CPFLOW: A Pratical Tool for Tracing Power System Steady State Stationary Behavior Due to Load and Generation

Variations. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 10, n. 2, p. 623-634, 1995.

CHIANG, H. D.; LI, H. Y.; FUKUYAMA, Y. NAKANISHI, Y. The Generation of ZIP-V curves for tracing power system state stationary behavior due to load and generation variations. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 1999, [s. l.]. **Anais [...]** Piscataway: IEEE, 1999. p. 647-651. v. 2.

EL-HAWARY ME. Electrical power systems: design and analysis. **Revised printing**, John Wiley & Sons; vol. 2, p. 799, 1995.

EXPÓSITO, A. G.; CONEJO, A. J.; CAÑIZARES, C. **Sistemas de energia elétrica**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GABERLINI, E.; BONINI A. N.; ALVES D. A.; RIGHETO, E.; SILVA, L.C.P., An efficient geometric parameterization technique for continuation power flow. **Electrical Power and Energy Systems Research**, Amsterdam, v. 77, n. 1, p. 71-82, 2007.

GAO B.; MORISON G. K. e KUNDUR P. Towards the development of a systematic approach for voltage stability assessment of large-scale power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 11, n. 3, p. 1314-1324, 1996.

GARCIA, A. V.; MONTICELLI, A. J.; FRANÇA, A. L. M.; TANAKA, M. R.; MURARI, C. A. F. Automatização da Distribuição de Energia Elétrica: Simulação Utilizando o Fluxo de Carga Desacoplado Rápido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 1.; CONGRESSO LATINO AMERICANO DE AUTOMÁTICA, 1., Campina Grande. **Anais [...]** Campina Grande: [s. n.], 1984. p. 256-261.

IBA K.; SUZUKI, H.; EGAWA, M.; T. Calculation of critical loading condition with nose curve using homotopy continuation method. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 6, n. 2, p. 585-593, 1991.

IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, Definition and Classification of Power System Stability. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 19, n. 3, p. 1387-1401, 2004.

KAMEL, S.; ABDEL-AKHER, M.; JURADO, F. Improved NR current injection load flow using power mismatch representation of PV Bus. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, [s. l.], v. 53, n. 1, p. 64–68, 2013.

KAMEL S., Abdel-Akher M., El-Nemr M. K.. A new technique to improve voltage controlled nodes (PV nodes) in the current injection newton-raphson power-flow analysis. **Universities Power Engineering Conf. (UPEC)**, 2010.

KURODA E.; WATANABE M.; KATO D.; SAITO N.; YATSU M. Fast computation method of static voltage stability using geometric parameter adjustment for the continuation power flow. **Electrical Engineering in Japan**, [s. l.], p. 1-10, 2020.

KULWORAWANICHPONG T. Simplified newton–raphson power-flow solution method. **Journal of Electrical Power and Energy Systems**, London, v. 32, p. 551–558, 2010.

KUNDUR, P. **Power system stability and control**. New York: McGraw-Hill, 1993.

KUNDUR, P.; MORISON, G.K. Definitions and classification of stability problems in today's power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 19, n. 3, p. 1387-1401, 1997.

KUNDUR, P.; PASERBA, J.; AJJARAPU, V.; ANDERSON, G.; BOSE, A.; CAÑIZARES, C.; HATZIARGYRION, N.; HILL, D.; STANKOVIC, A.; TAYLOR, C.; VAN CUSTEM, T.; VITTAL, V. Definitions and classification of stability problems in today's power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 19, n. 3, 2004.

MAGALHÃES, E. M.; BONINI, A. N.; ALVES, D. A. Técnica de Parametrização Geométrica para o Fluxo de Carga Continuado Baseado Nas Variáveis Fator de Carregamento e Perda Total de Potência Ativa. In: **15th Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ**. Foz do Iguaçu: [s. n.], 2013.

MANSOUR, M. R.; GERALDI, E. L.; ALBERTO, L. F. C.; RAMOS, R. A. A New and fast method for preventive control selection in voltage stability analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 28, p. 4448-4455, 2013.

MANSOUR, Y. Suggested techniques for voltage stability analysis. **IEEE Power Engineering Society**, Piscataway, p. 142, 1993.

MARTINS, A. et al. Critérios e metodologias estabelecidos no âmbito da força-tarefa “colapso de tensão” do gtad/scel/gcoi para estudos de estabilidade de tensão nos sistemas interligados norte/nordeste, sul/sudeste e norte/sul brasileiros. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 1999, Foz do Iguaçu. Anais [...]Foz do Iguaçu: [s. n.], 1999.

MATARUCCO, R. R.; CANOSSA, J.; H; ALVES, D. A.; SILVA, L.C.P.; CASTRO, C. A. Método da continuação aplicado na análise de contingência de linhas de transmissão. **Controle & Automação**, Campinas, v. 17, n. 2, p. 1-17, 2006.

MEDEIROS JR, M. F. DE; LUCAS, J. A. Fast decoupled load flow with optimal axes rotation. **Proceedings of the IEEE/PES Transmission and Distribution 2002, Latin America**, São Paulo, 2002.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Blücher, 1983.

MONTICELLI A, GARCIA A, SAAVEDRA OR. Fast decoupled load flow: hypothesis, derivations and testing, **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], p. 1425–1431, 1990.

OLIVEIRA, C.C.; BONINI NETO, A.; ALVES, D. A. Análise Comparativa da Influência da Representação de Barras PV na Convergência do Método de Resolução do Fluxo de Potência Via Injeção de Corrente. In: INTERNATIONAL FOR THE DEVELOPMENT OF THE COUNTRIES – INTERNATIONAL SODEBRAS CONGRESS, 2015, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo: [s. n.], 2015. p. 1-6.

OLIVEIRA, CC.; BONINI-NETO, A.; ALVES, D.A. **Uma Proposta de Parametrização com Mudança de Plano Geométrico para Obtenção da Margem de Carregamento de Sistemas Elétricos de Potência**. Congresso Brasileiro de Automática-2020, Santa Maria, p. 1-8, 2020.

OLIVEIRA, C.C.; BONINI-NETO, A.; MINUSSI, C.R.; ALVES, D.A.; CASTRO, C.A. New representation of PV buses in the current injection Newton power Flow. **Electrical Power and Energy Systems**, [s. l.], v. 90, p. 237-244, 2017.

OLIVEIRA, C.C.; MINUSSI, C.R.; ALVES, D.A. Comparative Analysis of the Influence of PV Bus Representation in the Current Injection Continuation Power-Flow. **IEEE Latin America Transactions**, [s. l.], v. 16, n. 12, 2018.

PORTELINHA, R. K.; DURCEL, C. C.; TORTELLI, O. L.; LOURENÇO, E. M.; PAL, B. C. Unified Transmission and Distribution Fast Decoupled Power Flow. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, [s. l.], p. 1051–1058, 2019.

SALGADO, R. de S. **Fluxo de potência: método de Newton**. Florianópolis: UFSC, [2000]. Disponível em: <http://www.labspot.ufsc.br/~simoies/osee/FPNR-Slg.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2016.

SEYDEL, R. **From Equilibrium to Chaos: pratical bifurcation and stability analisys**. 2. ed. New York: Springer-Verlag, p. 407, 1994.

STOTT, B; ALSAÇ, O. Fast decoupled load flow. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 93, n. 3, p. 859-869, 1974.

TAYLOR, C. W. **Power system voltage stability**. Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.

TAYLOR, C. W. Maybe I can't define stability, but I know it when I see it. **IEEE/PES – Panel on Stability Terms and Definitions**, New York, 1997.

TORTELLI, O. L., LOURENÇO, E. M., GARCIA, A. V.; PAL, B. C. Fast decoupled power flow to emerging distribution systems via complex pu normalization. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 30, n. 3, pp. 1351–1358, 2015.

TOSTADO, M.; KAMEL, S.; JURADO, F. Developed Newton-Raphson based Predictor-Corrector load flow approach with high convergence rate. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, [s. l.], v. 105, pp. 785-792, 2019.

VAN AMERONGEN, R.A.M. A general-purpose version of the fast decoupled load ow. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 4, p.760-770, 1989.

VAN CUTSEN, T.; VOURNAS, C. **Voltage stability of eletric power system**. New York: Springer, 2007. p. 380.

ZAMBRONI de SOUZA, A. C.; CAÑIZARES, C. A.; QUINTANA, V. H. New techniques to speed up voltage collapse computations using tangent vectors. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 12, n. 3, p. 1380-1387, 1997.

APÊNDICE A

Este apêndice apresenta as publicações de artigos resultantes de trabalhos desenvolvidos em vínculos científicos como autora e coautora durante o doutorado.

A.1 PUBLICAÇÕES EM PERIÓDICOS

OLIVEIRA, C.C.; BONINI-NETO, A.; MINUSSI, C.R., ALVES, D.A.; CASTRO, C.A. **New representation of PV buses in the current injection Newton power Flow.** *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 90, 2017, pp. 237-244. Doi: 10.1016/j.ijepes.2017.01.027.

OLIVEIRA, C.C.; MINUSSI, C.R. and ALVES, D.A. **Comparative Analysis of the Influence of PV Bus Representation in the Current Injection Continuation Power-Flow.** *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 16, No. 12, Dec-2018 Doi: 10.1109/TLA.2018.8804256.

A.2 PUBLICAÇÕES EM CONGRESSOS

OLIVEIRA, CC.; BONINI-NETO, A. e ALVES, D.A. **Uma Proposta de Parametrização com Mudança de Plano Geométrico para Obtenção da Margem de Carregamento de Sistemas Elétricos de Potência.** CBA-2020 - Congresso Brasileiro de Automática-2020, 2020, Santa Maria. (RS). Anais do Congresso Brasileiro de Automática-2020, p. 1-8.

SANTOS, A.R.D.; OLIVEIRA, C. C.; BONINI-NETO, A.; ALVES, D.A. **Avaliação de Alternativas de Representação de Barras PV's no Problema de Fluxo de Potência Via Injeção de Corrente.** 13-th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 2018, São Paulo. XIII INDUSCON, 2018. p. 1-6.

SANTOS, A.R.D.; Oliveira, C.C; Alves, D.A. **“Uma Proposta Para Representação de Barras PV's para o Fluxo de Potência via Equações de Injeção de Corrente Expressas em Coordenadas Retangulares.** CBA-2018 - Congresso Brasileiro de Automática 2018, 2018, João Pessoa. Anais do Congresso Brasileiro de Automática-2018, p. 1-8.

A.3 PUBLICAÇÃO SUBMETIDA EM PERIÓDICO

OLIVEIRA, C.C.; BONINI-NETO, A.; MINUSSI, C.R., ALVES, D.A.; CASTRO, C.A. **Alternative Current Injection Newton and Fast Decoupled Power Flow.** *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2021.