



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 termoeletricas 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.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste Capítulo é apresentado a ideia e o conceito do FPC, assim como, suas etapas de resolução e a formulação do problema. Em linhas gerais, descrevem-se também os mecanismos responsáveis pela instabilidade do SEP e as ferramentas analíticas de controle capazes de prever o colapso de tensão em sistemas altamente carregados, avaliando, com precisão, sua margem de estabilidade. As áreas suscetíveis à instabilidade e pontos críticos são identificadas e, por último, a adoção de ações que visam corrigir esse problema.

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O mercado de eletricidade, ao longo dos anos, sofreu uma série de reformas e reestruturações entre as quais se destaca a privatização das indústrias estatais de eletricidade, o que levou a um aumento da concorrência entre as empresas do setor (Abbott, 2007). Esse processo de transformação motivou o setor elétrico na busca por melhorias nos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Nesse sentido, é essencial conhecer os aspectos de estabilidade de um SEP, uma vez que, um dos principais objetivos dos operadores dos sistemas é garantir que o sistema opere com segurança. Isto é, que o sistema permaneça estável, mesmo no caso de certos eventos inesperados ou contingências, como a saída de uma linha principal ou de um gerador (EXPÓSITO, 2011; KUNDUR, 1993; TAYLOR, 1997; VAN CUTSEN; VOURNAS, 2007). De acordo com IEEE-CIGRE, a estabilidade do SEP é a capacidade da rede voltar a operar em condição normal após ser submetida a uma perturbação.

Na literatura, para a análise de estabilidade de tensão existem duas abordagens: a dinâmica e a estática, sendo a escolha do enfoque dependente da análise a ser realizada. Segundo Taylor (1994), a análise de estabilidade de tensão realizada por ambas as abordagens, considerando algumas aproximações, terá seus resultados muito semelhantes.

Entretanto, as ferramentas de análise estática de estabilidade de tensão apresentam grandes contribuições (XIAOMING et al. 2018) e algumas vantagens em relação a análise dinâmica (DOBSON, 1994), especialmente, os métodos de Fluxo de Potência Continuado

(AJJARAPU, CHRISTY; 1992; BONINI et al. 2018; BONINI, MAGALHÃES, ALVES; 2018).

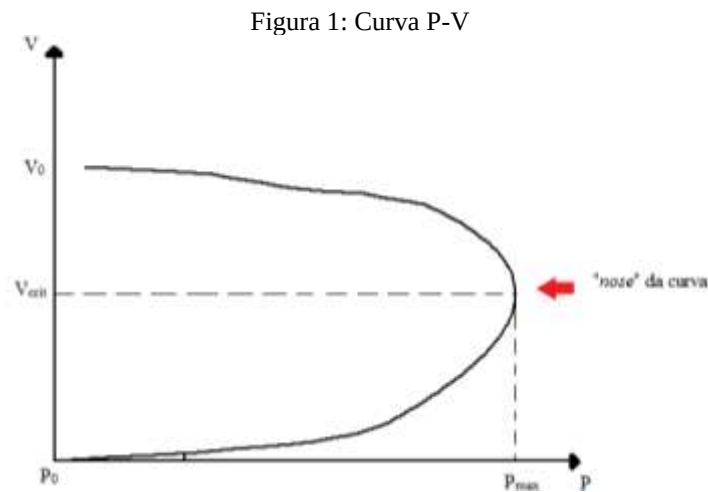
Na análise estática utiliza-se um modelo de Fluxo de Potência (FP). Dessa forma, não está presente no modelo equações diferenciais, o que permite avaliar a MC e identificar as áreas críticas do sistema. Essa análise é interessante por proporcionar informações a respeito da distância entre o ponto de operação e o ponto de instabilidade, assim como a origem do problema, de forma a serem definidas medidas corretivas e/ou preventivas.

Considerando os diversos métodos existentes na literatura para a realização da análise estática de um sistema elétrico em diferentes condições operativas, existem os métodos de obtenção das curvas P-V e Q-V. Essas curvas são obtidas através de cálculos do FC convencional ou através do FPC (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; ALVES et al., 2000; CHIANG et al., 1995; IBA et al., 1991; CAÑIZARES et al., 1992; GARBELINI et al., 2005; BONINI NETO; ALVES, 2008a; BONINI NETO; ALVES, 2010; MAGALHÃES, 2010).

As curvas Q-V são definidas como sendo a relação entre a potência reativa e a magnitude da tensão, isto é, fornece a variação da magnitude de tensão numa determinada barra com relação à potência reativa injetada nessa mesma barra. Essas curvas Q-V são obtidas através de sucessivas soluções de FP. Esta simulação é desenvolvida diminuindo gradativamente a tensão na barra à medida que é calculada a injeção de potência reativa através das soluções de fluxos de potência. Computacionalmente, isto é realizado convertendo-se a barra de carga (PQ) em questão em barra de geração (PV) sem limites de injeção de reativos (TAYLOR, 1994). A desvantagem das curvas Q-V é a obtenção de pseudo resultados, gerado pelo aumento de carga reativa em apenas uma barra do SEP (KUNDUR, 1994).

Já as curvas P-V são definidas como sendo a relação entre a magnitude da tensão e a potência ativa em um determinado barramento para uma condição determinada de fator de potência e tensão no mesmo barramento. As curvas P-V são obtidas após sucessivas soluções do FP, a partir de um ponto de operação inicial, conhecido como caso base ($\lambda=1$), considerando gradativos incrementos de carga em uma determinada barra, em todo o sistema ou apenas em uma região. A cada incremento de carga são realizados novos cálculos de FP, para determinar os pontos de operação que produzirão a curva P-V, e esse acréscimo de carga pode ou não ser realizado com o fator de potência constante. Depois de traçada a curva P-V, o Ponto Máximo de Carregamento (PMC) é identificado conforme mostrado na Figura 1

A distância entre esse ponto (“nose” (nariz) da curva P-V) e um ponto de operação P_0 , indica a margem da estabilidade estática de tensão do SEP. Identificar essa margem é de suma importância para o operador do SEP, pois com essa identificação será possível avaliar se, após ocorrer um aumento gradativo do carregamento do SEP, existirá outro ponto de operação estável.



Na análise estática, o método de curvas P-V é muito utilizado, visto que é possível propor estratégias de planejamento e operação do sistema, assim como determinar o ajuste para as margens de carregamento.

2.2 MARGEM DE CARREGAMENTO

Os operadores do SEP, em geral, monitoram grandezas como: fluxos de potência ativa e reativa, com a intenção de garantir que tais grandezas permaneçam dentro de intervalos aceitáveis na atual configuração, ou em qualquer outra configuração seguida de uma contingência (variação súbita do carregamento do sistema, saída de uma Linha de Transmissão (LT), aumento da transferência de potência entre áreas).

Com a intenção de garantir que as grandezas (fluxos de potência ativa e reativa) permaneçam dentro de intervalos aceitáveis na configuração atual, ou em uma configuração instável, isto é, após ocorrer uma contingência, os operadores do SEP, em geral, monitoram essas grandezas.

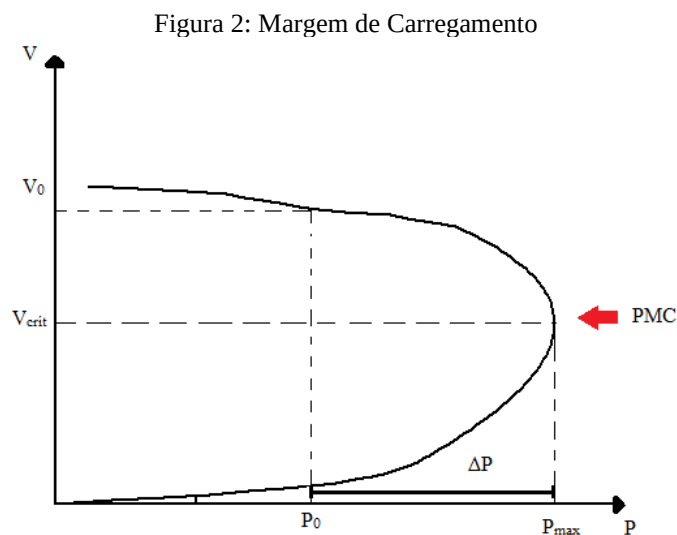
A ideia de capacidade de transmissão está presente para o operador, pois a quantificação direta e explícita da capacidade de transmissão é determinada pela margem de carregamento, conhecida também como margem estática de estabilidade de tensão.

A definição da margem dependerá da aplicação a que se destina. A margem de estabilidade mede a distância a um evento que cause a instabilidade e deve ser definida de forma a ser facilmente compreendida pelo operador. Já para o colapso de tensão, a margem de estabilidade é definida como o maior aumento de carga que o sistema pode ter, sem provocar o colapso de tensão. Em linhas gerais, determina-se a margem de carregamento como sendo a diferença entre o valor de um parâmetro correspondente a um evento e o seu atual valor.

Para calcular o grau de segurança com relação à estabilidade de tensão, é importante obter formas de calcular a distância de certo ponto de operação do sistema elétrico ao ponto crítico, correspondente ao PMC. Esta distância é dada por grandezas físicas, como a potência consumida. A margem de carregamento (ΔP) é obtida como mostra a Figura 2.

$$\Delta P = P_{\text{crit}} - P_0 = P_{\text{max}} - P_0 \quad (1)$$

no qual ΔP representa o maior aumento possível de consumo de forma a manter a rede operando ainda na região estável.



Fonte: Elaboração da própria autora

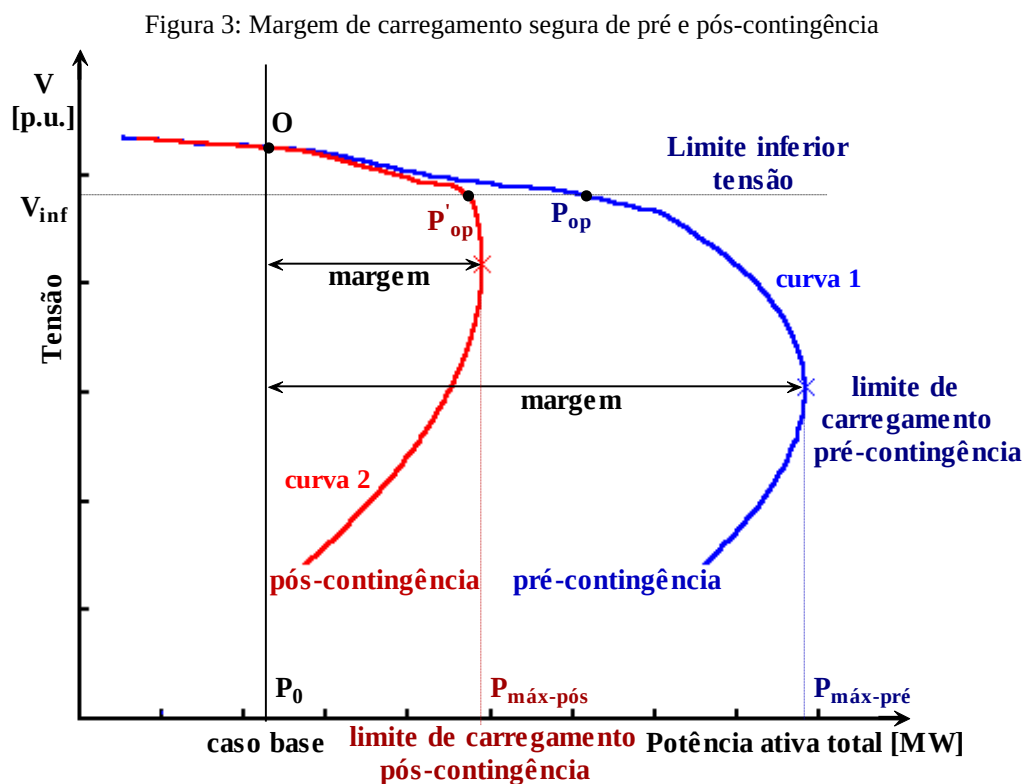
2.1.1 Margem de Carregamento Pós-Contingência

Os SEP quando operado em tempo real estão sujeitos à ocorrência de possíveis contingências ou algum outro imprevisto. Logo, nas etapas de planejamento e operação de um

sistema, é importante definir as margens de estabilidade, juntamente com as ações de controle necessárias para as condições normais de operação (caso base também denominado de pré-contingência) e também para condições de pós-contingência.

Na Figura 3 estão apresentadas as curvas P-V's e alguns dos critérios preventivos de avaliação do colapso de tensão e as definições dos termos envolvidos.

Considere-se o ponto (O) como o ponto de operação estável, denominado de caso base. Através de um programa de fluxo de potência convencional, este ponto é obtido. O método da curva P-V determinará a capacidade do sistema através do aumento gradual da carga total do sistema. Como mostra a Figura 2, conforme a carga aumenta, a tensão do sistema tenderá a diminuir, para as condições de pós-contingência, a MC é definida como sendo a diferença entre o ponto de operação de pré-contingência (O) e o PMC de pós-contingência ($P_{\max-\text{pós}}$).



Fonte: Alves (2000)

2.1.2 Métodos para determinar a Margem de Carregamento

Existem diversos métodos para determinar a MC de um SEP. Os mais utilizados são:

- FLUXO DE POTÊNCIA CONVENCIONAL (FP) – utilizado para o cálculo do ponto de operação estável, denominado caso base ($\lambda = 1$), e da margem de carregamento através de sucessivas soluções. Este método baseia-se no aumento manual e gradativo da potência até que o estado da rede elétrica atinja pontos de operação próximos do ponto de colapso, isto é, no ponto em que não há mais solução para o fluxo de potência.
- FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO (FPC) – utilizado para encontrar várias soluções do fluxo de potência convencional através da adição de um recurso de parametrização da carga. A parametrização é um procedimento padrão para a obtenção de curvas P-V (SEYDEL, 1994), que permite representar o aumento da demanda de carga nas equações e corrigir os incrementos de carga para evitar problemas de convergência do método próximo ao ponto de máximo carregamento.

2.3 FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO: ESTADO DA ARTE

Com o crescimento dos SEP, tanto em tamanho como em complexidade, o método de Newton-Raphson, desenvolvido por Isaac Newton e Joseph Raphson, ganhou mais destaque em relação aos demais métodos para a resolução do problema de FP, pois de acordo com a literatura técnico-científica, o método tem como vantagem a robustez, convergindo com poucas iterações, e ainda pelo número de iterações necessárias para a convergência ser independente da dimensão do sistema elétrico. Tal método baseia-se no aumento gradativo da potência até que o estado do sistema elétrico atinja pontos de operação próximos do ponto de colapso, no qual não existirá mais solução para o FP.

De uma forma mais geral, as equações do FP convencional podem ser representadas da seguinte forma:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}, \lambda) = 0 \quad (2)$$

na qual, $\mathbf{G}$ representa o vetor das equações dos *mismatches* de potências ativa e reativa, $\mathbf{x}$ o vetor correspondente aos ângulos de fase (θ) e às magnitudes ($|V|$) das tensões nodais das barras, e λ o fator de carregamento do sistema elétrico.

Para a obtenção da solução das equações algébricas não lineares (2), o processo iterativo é o mesmo apresentado em Monticelli (1983), entretanto, as correções e a atualização do estado na v -ésima iteração, para um dado valor de $\lambda = \lambda_0$ é dada por:

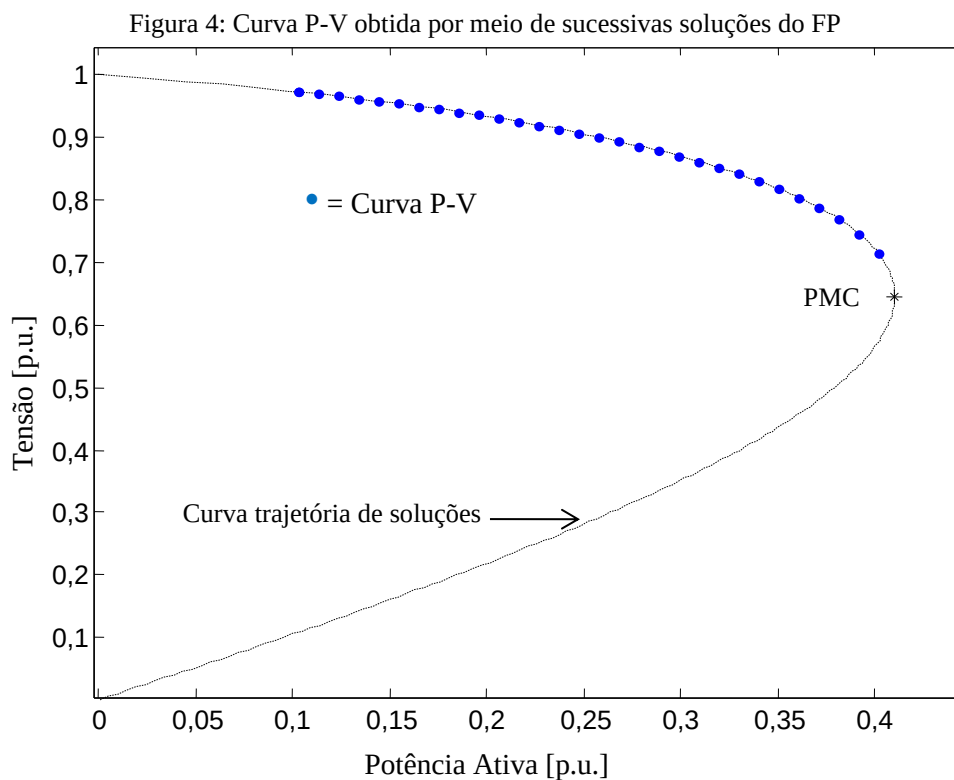
$$\Delta \mathbf{x}^{v+1} = -[\mathbf{J}(\mathbf{x}^v)]^{-1} \mathbf{G}(\mathbf{x}^v, \lambda_0) \quad (3)$$

$$\mathbf{x}^{v+1} = \mathbf{x}^v + \Delta \mathbf{x}^v \quad (4)$$

Nas análises de SEP determinam-se as informações de sensibilidade em torno de um ponto de operação, efetuando a variação dos parâmetros manualmente, e o PMC. Enquanto o SEP é progressivamente carregado, as soluções (os pontos da curva P-V) são obtidas pelas equações (2) e (4).

No FP convencional λ_0 é mantido constante durante todo processo iterativo e assim, a partir do caso base ($\lambda = 1$) obtém-se o traçado da curva P-V até um valor para o qual não se obtenha mais solução, o que ocorre devido à singularidade da matriz **J**.

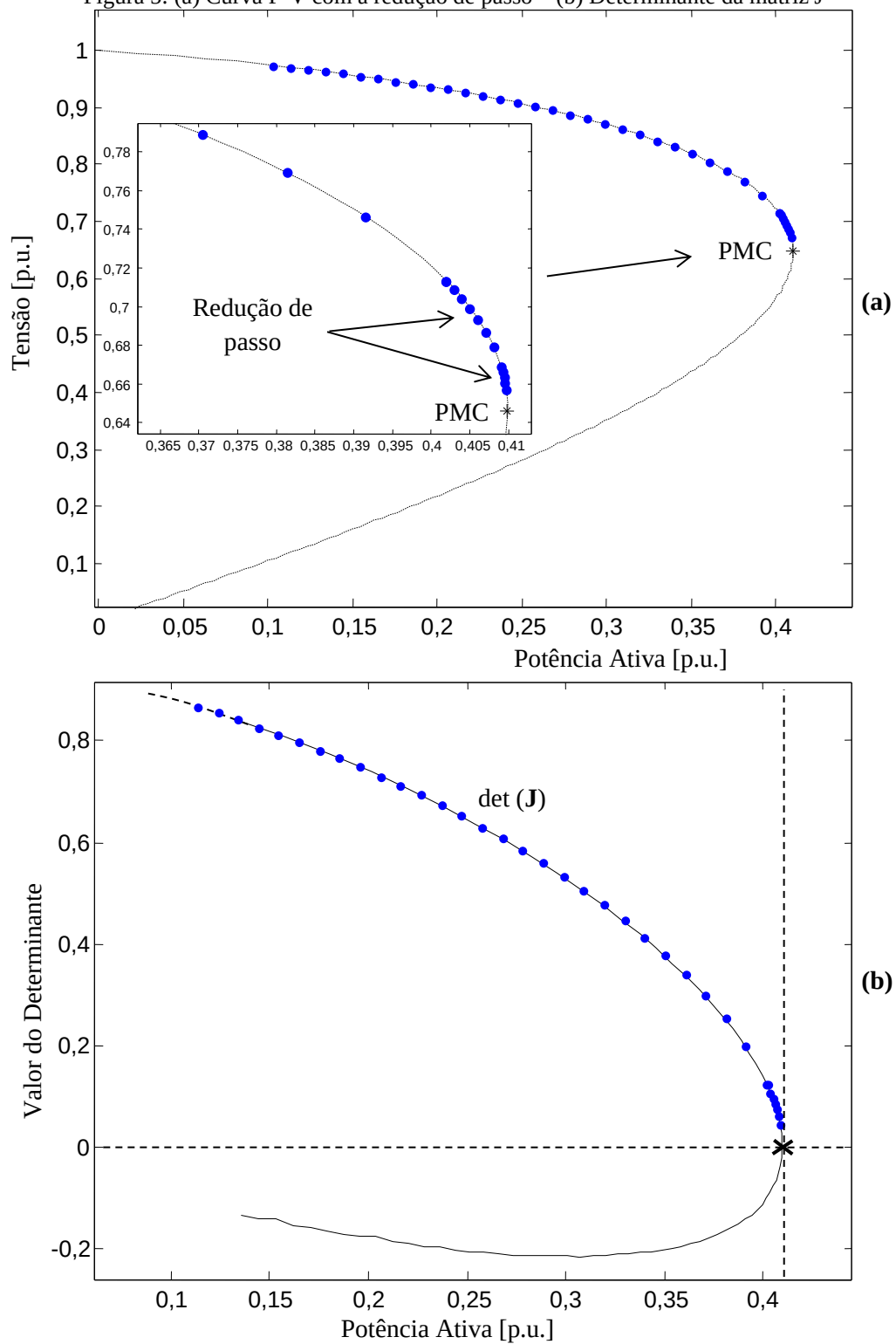
A Figura 4 mostra a curva P-V com os valores de potência ativa em p.u. para cada valor de λ . Analisando a Figura 2.4 observa-se que o método de FC diverge próximo ao PMC, devido ao mau condicionamento da matriz Jacobiana **J**.



Fonte: Bonini Neto (2011)

Assim, para melhorar a aproximação do PMC, volta-se ao ponto de convergência anterior e reduz-se o passo. Esse procedimento foi usado para o ponto de divergência subsequente, como mostra a Figura 5(a). A Figura 5(b) apresenta os valores do determinante da matriz Jacobiana **J**. Nota-se que quanto mais próximo do PMC, mais próximo de zero se torna o valor do determinante, ou seja, a matriz se aproxima da singularidade.

Figura 5: (a) Curva P-V com a redução de passo – (b) Determinante da matriz J



Fonte: Bonini Neto (2011)

Nessa perspectiva, compreende-se a dificuldade do método de N-R em não conseguir determinar o traçado da parte superior da curva P-V. Essa impossibilidade é decorrente da singularidade da matriz Jacobiana no PMC e neste ponto o método diverge (AJJARAPU;

CHRISTY, 1992; SEYDEL, 1994). Dessa forma, faz-se necessário o uso de outra metodologia que seja capaz de contornar este problema.

Assim, para se obter resultados mais próximos ao PMC, o FP convencional deve ser modificado e, um dos principais métodos utilizados para contornar a singularidade da matriz Jacobiana no PMC é o método da continuação, chamado de Fluxo de Potência Continuado (FPC) (do inglês: *Continuation Power Flow*).

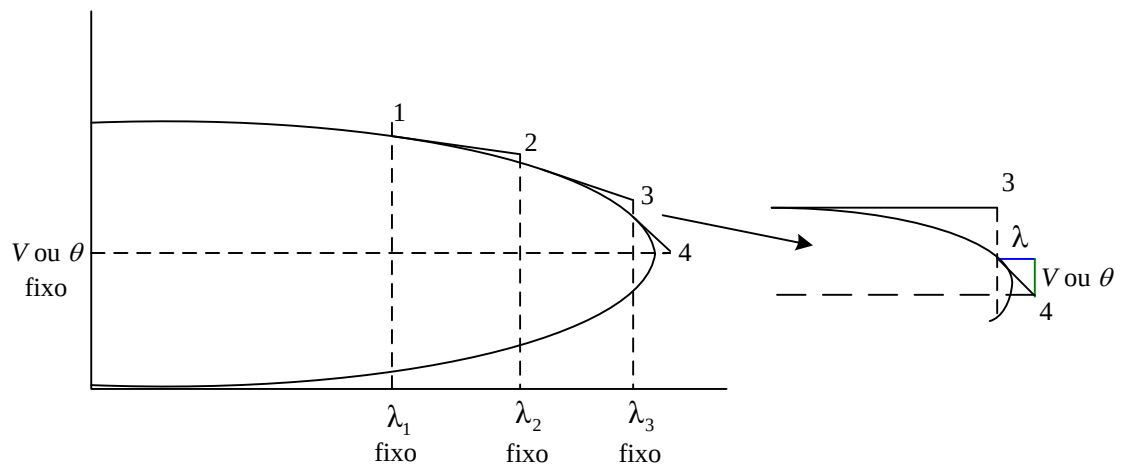
O FPC consiste, basicamente, em determinar o PMC e a curva P-V de um SEP, a partir do caso base e uma direção de crescimento de carga predefinida. Porém, diferente do FP, o FPC é capaz de traçar toda a curva P-V (perfil de tensão) por meio da determinação de sucessivas soluções do FP, através da variação automática de um parâmetro associado ao carregamento do sistema. Uma vantagem interessante do FPC é que, a escolha apropriada do parâmetro, permite o traçado completo da curva P-V sem a preocupação com a singularidade da matriz Jacobiana, oriunda da linearização das equações de fluxo de potência.

De acordo com Ajjarapu (2010), as metodologias mais difundidas dentro da literatura especializada para o FPC, utilizam-se de quatro elementos básicos:

i. Passo preditor - Na primeira etapa (passo preditor) determina-se, a partir do caso base ($\lambda = 1$), uma estimativa para a próxima solução. Nessa previsão é usado um passo para estimar um novo ponto da trajetória de soluções (curva PV). Em decorrência da singularidade da matriz Jacobiana, os métodos de FPC empregam uma técnica de parametrização para eliminar os problemas numéricos em torno do PMC.

ii. Parametrização - Após a etapa da predição, pode ser necessário um procedimento de parametrização. Em geral, mesmo com algumas limitações de aplicação para determinados SEP, as técnicas de parametrização geométricas, conseguem determinar para os sistemas (pequeno, médio e grande porte), através de um número reduzido de iterações, o ponto PMC e o traçado da curva P-V. E assim, essas técnicas são consideradas boas alternativas para os estudos de análise de estabilidade estática de tensão, pois conseguem superar os problemas de singularidade da matriz Jacobiana, decorrentes da escolha do fator de carregamento λ como parâmetro da continuação. Essa singularidade da matriz Jacobiana pode ser eliminada utilizando em ambas as etapas, previsão e correção, a técnica conhecida como parametrização local (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; AJJARAPU et al., 1994; SEYDEL, 1994) que consiste na mudança de parâmetro próxima ao PMC (Figura 6).

Figura 6: Técnicas de Parametrização Local



Fonte – Bonini e Alves (2006)

iii. Controle de passo - O desempenho e eficiência do FCC para o traçado completo da curva P-V está estritamente relacionado com a estratégia adotada no controle do passo predictor. Segundo a literatura específica, o ideal seria que o tamanho do passo adaptasse de acordo com as condições reais de convergência, mas de forma genérica, a escolha do tamanho do passo depende do SEP em análise, ou seja, para um caso de um sistema elétrico pouco carregado, ocorrida uma variação de carga, tem-se uma mínima mudança no ponto de operação, e assim o tamanho do passo predictor pode ser maior. Entretanto, em SEP altamente carregados, qualquer variação na carga, mínima que seja, resultará em grandes variações do ponto de operação, e nesses casos, exige-se um tamanho de passo menor.

iv. Passo corretor - Realizada a etapa de previsão, com o intuito de evitar acúmulos de erros (uma vez que a solução encontrada pelo passo predictor é uma solução aproximada) realiza-se a correção da solução aproximada para assim obter a solução correta. Quanto mais próxima a solução prevista estiver da solução correta, menor o número de iterações necessárias para o traçado da curva P-V (curva trajetória de soluções) dentro do raio de convergência desejado.

A seguir, apresentam-se as formulações algébricas para o método e suas etapas.

2.4 FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO: FORMULAÇÃO VIA INJEÇÃO DE POTÊNCIA

O FPC através de sucessivas soluções do FP permite o esboço completo da curva P-V, a partir de um caso base ($\lambda = 1$), passando pelo PMC, devido à estratégia de parametrização da carga (AJJARAPU, 2010). A parametrização é um recurso matemático para identificar

cada solução na curva. É um procedimento padrão para a obtenção de curvas P-V (SEYDEL, 1994).

Nas análises de estabilidade estática de tensão o SEP é representado pelo seguinte conjunto de equações básicas do FPC (AJJARAPU, 2010):

$$\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|, \lambda) = 0 \quad (5)$$

em que:

- $\mathbf{G}$ é o vetor das equações dos *mismatches* das potências ativa e reativa;
- $|\mathbf{V}|$ é o vetor das magnitudes das tensões nodais;
- $\boldsymbol{\theta}$ é o vetor dos ângulos de fase nodais;
- λ é o fator de carregamento.

Para aplicar as técnicas de parametrização local para o problema FPC, as equações de FP devem ser reformuladas para incluir o parâmetro de carregamento λ . Esta reformulação pode ser expressa através da geração e carga de uma barra, como função do parâmetro de carregamento λ . Assim, as formas gerais das novas equações são dadas como segue (AJJARAPU, 2010):

$$\left. \begin{aligned} \Delta \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|, \lambda) &= \mathbf{P}_{sp}(\lambda) - \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) = \mathbf{0} \text{ para as barras PQ e PV} \\ \Delta \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|, \lambda) &= \mathbf{Q}_{sp}(\lambda) - \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) = \mathbf{0} \text{ para as barras PQ} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

sendo:

- $\Delta P(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|, \lambda)$ é o *mismatch* da potência ativa na barra k ;
- $\Delta Q_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|, \lambda)$ é o *mismatch* da potência reativa na barra k ;
- $P_{sp_k}(\lambda) = \lambda(P_{ger_k} - P_{cg_k})$ é a potência ativa especificada na barra k ;
- $Q_{sp_k}(\lambda) = Q_{ger_k} - \lambda Q_{cg_k}$ é a potência reativa especificada na barra k ;
- $P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ e $Q_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ são vetores de injeções de potência ativa e reativa da k -ésima barra, respectivamente, calculadas como funções de $\boldsymbol{\theta}$ e $|\mathbf{V}|$.

$P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ e $Q_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ são calculados de acordo com Monticelli (1983). O fator de carregamento λ varia entre $1 \leq \lambda \leq \lambda_{crítico}$, em que $\lambda = 1$ corresponde ao caso base, e $\lambda = \lambda_{crítico}$ corresponde ao caso crítico.

O traçado completo da curva P-V por meio de sucessivas soluções de (5) utilizando um FC será feito após definir um padrão de variação da carga e uma estratégia de despacho da geração, ou seja, é fundamental conhecer o quanto a carga poderá aumentar antes que o sistema elétrico entre em colapso, para isso, determina-se a margem de carregamento para as

condições preestabelecidas. Durante esse processo, as magnitudes $|\mathbf{V}|$ e ângulos $\boldsymbol{\theta}$ das tensões nodais (exceto a magnitudes $|\mathbf{V}|$ e o ângulo da tensão nodal da barra *slack* e as magnitudes $|\mathbf{V}|$ das tensões nodais das barras de geração) são as variáveis dependentes, enquanto que $\mathbf{P}_{sp}$ e $\mathbf{Q}_{sp}$ são as variáveis independentes.

2.4.1 Passo Preditor

Após determinar a solução da equação $(\boldsymbol{\theta}_0, |V_0|, \lambda_0 = 1)$ para o caso base, através do método FPC, é necessário executar um passo preditor para encontrar uma estimativa para a próxima solução $(\boldsymbol{\theta}_e, |\mathbf{V}|_e, \lambda_e)$. Entre as diversas técnicas de previsão presentes na literatura específica, as mais difundidas são os métodos da tangente (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; AJJARAPU; LAU; BATULA, 1994) e da secante (CHIANG et al., 1995; CHIANG et al., 1999).

2.4.1.1 Preditor Tangente

Para o método FP convencional, utilizou-se o preditor tangente. Nesse preditor, para se obter uma estimativa do próximo ponto, escolhe-se um passo, de tamanho adequado, na direção do vetor tangente à curva P-V no ponto correspondente à solução atual.

Efetua-se o cálculo do vetor tangente tomando as derivadas parciais da equação (5), e que colocadas na forma matricial, apresenta (AJJARAPU, 2010):

$$[\mathbf{G}_{\boldsymbol{\theta}} \quad \mathbf{G}_{|\mathbf{V}|} \quad \mathbf{G}_{\lambda}] \begin{bmatrix} d\boldsymbol{\theta} \\ d|\mathbf{V}| \\ d\lambda \end{bmatrix} = [\mathbf{G}_{\boldsymbol{\theta}} \quad \mathbf{G}_{|\mathbf{V}|} \quad \mathbf{G}_{\lambda}] \mathbf{t} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

no qual:

- $\mathbf{G}_{\boldsymbol{\theta}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta \mathbf{P}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \\ \frac{\partial \Delta \mathbf{Q}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix}$, $\mathbf{G}_{|\mathbf{V}|} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta \mathbf{P}}{\partial |\mathbf{V}|} \\ \frac{\partial \Delta \mathbf{Q}}{\partial |\mathbf{V}|} \end{bmatrix}$ e $\mathbf{G}_{\lambda} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{sp} \\ \mathbf{Q}_{sp} \end{bmatrix}$ são as respectivas derivadas parciais de $\mathbf{G}$ em relação à $\boldsymbol{\theta}$, $|\mathbf{V}|$ e λ da equação (2);
- $\mathbf{t}$ é o vetor tangente, ao qual deseja-se determinar.

Como uma coluna correspondente à nova variável λ ($\mathbf{G}_{\lambda}$) é adicionada à matriz $\mathbf{J}$, tem-se que o número de incógnitas passa a ser maior do que o número de equações. Logo, para

possibilitar a solução desse problema, é necessário especificar uma variável do vetor tangente $\mathbf{t}$ com um valor não nulo, a qual passa a ser denominada como “parâmetro da continuação”. Em toda etapa de predição é escolhido o parâmetro da continuação, sendo esse escolhido mediante análise da variação de cada uma das variáveis de estado no último ponto obtido, sendo a variável escolhida aquela que apresentar a maior variação no preditor tangente. Especificando o parâmetro da continuação, e acrescentando a equação ($\mathbf{e}_k \mathbf{t} = \mathbf{t}_k = \pm 1$) em (7), tem-se (AJJARAPU, 2010):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_\theta & \mathbf{G}_{|V|} & \mathbf{G}_\lambda \\ & \mathbf{e}_k & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ d|V| \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_\lambda \\ \mathbf{Q}_\lambda \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ d|V| \\ d\lambda \end{bmatrix} = \mathbf{J}_M \mathbf{t} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

no qual:

- $\mathbf{e}_k$ é um vetor linha, dimensionado adequadamente, com o k -ésimo elemento igual a 1, e os demais todos nulos;
- $\mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{P}(\theta, |V|)}{\partial \theta}$, $\mathbf{N} = \frac{\partial \mathbf{P}(\theta, |V|)}{\partial |V|}$, $\mathbf{M} = \frac{\partial \mathbf{Q}(\theta, |V|)}{\partial \theta}$ e $\mathbf{L} = \frac{\partial \mathbf{Q}(\theta, |V|)}{\partial |V|}$ são as submatrizes que compõem a matriz Jacobiana $\mathbf{J}$;
- $\mathbf{P}_\lambda = \frac{\partial P_{sp}}{\partial \lambda}$ e $\mathbf{Q}_\lambda = \frac{\partial Q_{sp}}{\partial \lambda}$ são as respectivas derivadas da potência ativa e reativa especificada em relação a λ .

Ao escolher o índice k , deve-se garantir que o vetor tangente $\mathbf{t}$ tenha uma norma diferente de zero e que a matriz Jacobiana modificada $\mathbf{J}_M$ seja não singular no PMC. O número 1, correspondente ao k -ésimo elemento, deverá ser colocado na coluna da variável que foi escolhida como parâmetro da continuação $|V_k|$, θ_k ou λ . Para a escolha do sinal (+) ou (−) deve-se analisar como a variável escolhida como parâmetro da continuação varia. O sinal será positivo (+) se o parâmetro da continuação estiver aumentando de valor, e negativo (−) se estiver diminuindo. Após resolver a equação (8), obtém-se o vetor tangente $\mathbf{t}$, e assim atualizam-se as variáveis de estado da rede da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \theta^e \\ |V|^e \\ \lambda^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^v \\ |V|^v \\ \lambda^v \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\theta \\ d|V| \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (9)$$

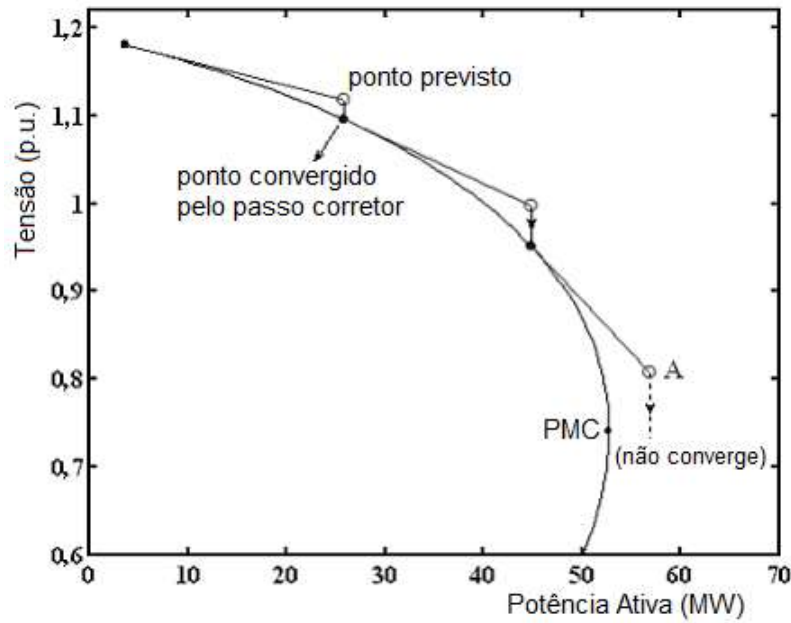
no qual:

- “e” indica uma estimativa, ou seja, o vetor tangente $\mathbf{t}$ é usado para obter uma estimativa para θ , $|V|$ e λ a partir da solução atual v ;

- σ é o escalar que definirá o comprimento do passo preditor, no qual o valor deverá ser especificado de maneira que a solução prevista esteja dentro do raio de convergência do passo preditor (CHIANG et al., 1995).

Quando se utiliza os métodos de N-R, o cálculo do vetor tangente $\mathbf{t}$ não implica em aumento significativo do tempo computacional, pois se recomenda usar a última matriz Jacobiana fatorada. A Figura 7 mostra o preditor tangente e o passo corretor parametrizado pelo fator de carregamento λ .

Figura 7: Método da continuação com o preditor tangente utilizando λ como parâmetro



Fonte: Alves (2000)

2.4.1.2 Preditor Secante

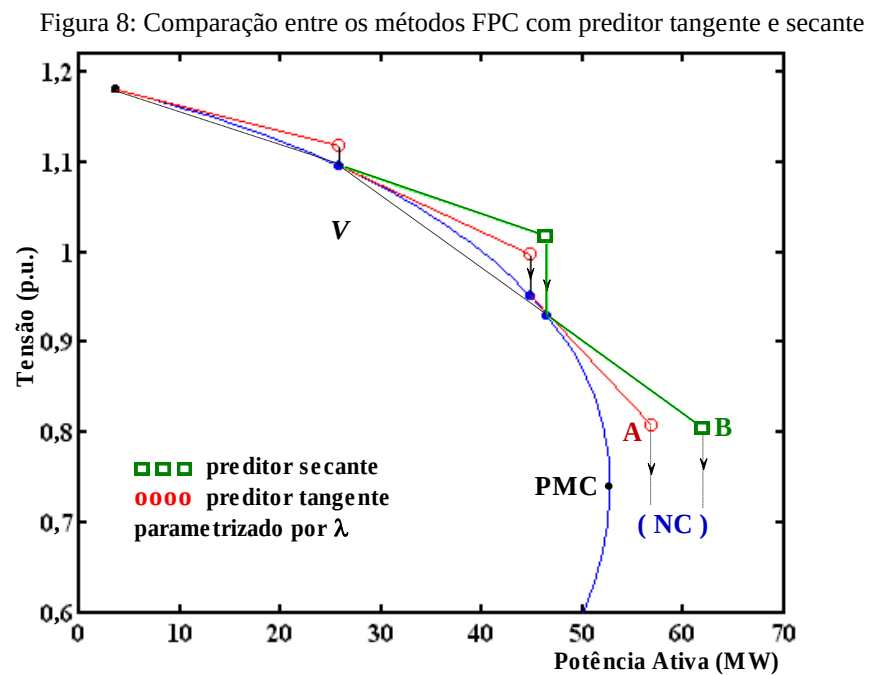
O método do preditor secante de ordem um, utiliza duas soluções (dois pontos), a atual e a anterior, para assim estimar a próxima solução (próximo ponto da curva). Para determinar as duas primeiras soluções é necessário utilizar o preditor tangente $\mathbf{t}$.

Métodos polinomiais são baseados em um polinômio de ordem variada que intercepta a solução atual $(\theta^v, |\mathbf{V}|^v, \lambda^v)$ e a solução anterior $(\theta^{v-1}, |\mathbf{V}|^{v-1}, \lambda^{v-1})$ para determinar um ponto de aproximação para a próxima solução $(\theta^{v+1}, |\mathbf{V}|^{v+1}, \lambda^{v+1})$, ou seja, a estimativa para a próxima solução (ponto da curva P-V) é dada por:

$$\begin{bmatrix} \theta^{v+1} \\ |\mathbf{V}|^{v+1} \\ \lambda^{v+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^v \\ |\mathbf{V}|^v \\ \lambda^v \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} \theta^v - \theta^{v-1} \\ |\mathbf{V}|^v - |\mathbf{V}|^{v-1} \\ \lambda^v - \lambda^{v-1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Sendo σ o tamanho do passo, escolhido de forma conveniente.

Na Figura 8 observa-se a etapa de previsão pelo vetor tangente (reta contínua) e pelo vetor secante (reta tracejada), respectivamente obtidas utilizando λ como parâmetro da continuação. Verifica-se que, quanto mais próximo os dois pontos estiverem um do outro, dentro de uma tolerância numérica razoável, mais o preditor secante se aproxima do preditor tangente, embora seja necessário calcular mais pontos da curva. Ao contrário, pontos distantes um do outro podem produzir diferenças consideráveis em relação ao ponto fornecido pelo vetor tangente.



Fonte: Alves (2010)

No ponto “A”, assim como no “B”, o passo corretor não é capaz de encontrar um ponto (solução) na curva P-V sendo λ o parâmetro de continuação utilizado, além do que, não é possível vencer a singularidade da matriz Jacobiana modificada $\mathbf{J}_M$ no PMC. Assim, para que o ponto seja obtido com maior precisão, adota-se a estratégia de redução do tamanho do passo à medida que os pontos se aproximam do PMC.

Outros previsores bastante utilizados nessa etapa são:

- preditor polinomial modificado de ordem zero (CHIANG et al., 1995): Nessa técnica de previsão, também conhecida por previsão trivial, usa-se a solução atual e um incremento fixo num determinado parâmetro da continuação $|V_k|$, θ_k ou λ como uma estimativa para a próxima solução.

- Preditor não linear (KARBALAEI; ABASI, 2011; MORI; SEKI, 2009; KOJIMA; MORI, 2008; LI; CHIANG, 2008; MORI; SEKI, 2007; BONINI; MAGALHÃES; ALVES, 2014): Nessa técnica, os preditores não lineares, associados à interpolação polinomial de Lagrange de ordem dois, permitem reconstituir uma função passando por três pontos (soluções) conhecidos na curva P-V. Os preditores não lineares seguem mais de perto a curva de trajetória de soluções, e com isso fornece um número global menor de iterações na etapa de correção quando comparado com os preditores lineares como o polinomial de ordem zero (polinomial trivial), o secante (polinomial de primeira ordem) e o tangente.

2.4.2 Parametrização

A parametrização é um recurso matemático para identificar cada solução ao longo de toda a curva, através do aumento gradual do parâmetro de carregamento λ . Com a parametrização, a singularidade da matriz Jacobiana no PMC é eliminada. Uma técnica muito utilizada é chamada de parametrização local (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; SEYDEL, 1994), que consiste na troca do parâmetro próximo ao PMC.

Para o vetor tangente, a variável escolhida será a que apresentar maior variação, sendo assim, λ passará a ser tratado como uma variável dependente, enquanto que a variável escolhida será o novo parâmetro da continuação p , do conjunto de $n+1$ variáveis (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; AJJARAPU; LAU; BATTULA, 1994). O novo parâmetro da continuação será escolhido da seguinte forma:

$$p \leftarrow \max \{|t_1|, |t_2|, \dots, |t_{n+1}|\} \quad (11)$$

Para o método baseado no preditor secante, p é escolhido como sendo o componente que apresenta maior variação relativa (SEYDEL, 1994):

$$p \leftarrow \max \left\{ \left(\frac{|\boldsymbol{\theta}^{j+1} - \boldsymbol{\theta}^j|}{|\boldsymbol{\theta}^{j+1}|} \right), \left(\frac{||\mathbf{V}|^{j+1} - |\mathbf{V}|^j|}{||\mathbf{V}|^{j+1}|} \right), \left(\frac{|\lambda^{j+1} - \lambda^j|}{|\lambda^{j+1}|} \right) \right\} \quad (12)$$

no qual j refere-se ao ponto da curva. Ao escolher p de acordo com (11) ou (12), tem-se a expectativa de que o algoritmo tenha um bom desempenho, embora esse procedimento não garanta que o parâmetro p conduza a um processo com maior velocidade (SEYDEL, 1994).

A equação (11) tem sido utilizada no método do vetor tangente, demonstrando que p muda de λ , ao aproximar-se do PMC, para a magnitude da tensão que apresentar maior variação, voltando novamente para λ após alguns pontos determinados. Mesmo para sistemas

altamente compensados, o uso desse método para a escolha automática de p não tem apresentado dificuldades (CAÑIZARES; ALVARADO, 1993).

2.4.3 Passo Corretor

Para realizar o passo corretor, em geral, utiliza-se o método de N-R, embora se possa utilizar qualquer outro método numérico. Nesse passo, adiciona-se a equação (5), a seguinte equação:

$$y - y^e = 0 \quad (13)$$

no qual:

- y corresponde à variável escolhida como parâmetro da continuação;
- y^e corresponde ao valor estimado da variável escolhida.

Assim, o sistema de equações na etapa de correção é dado por:

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{G}(|\mathbf{V}|, \boldsymbol{\theta}, \lambda) = 0 \\ y - y^e = 0 \end{array} \right\} \quad (14)$$

O sistema de equações (14), ligeiramente modificado devido a inclusão da última equação, é resolvido pelo método de N-R. Assim, o sistema de equações (2.14) expandido em série de Taylor fornece:

$$-\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{\boldsymbol{\theta}} & \mathbf{G}_{|\mathbf{V}|} & \mathbf{G}_{\lambda} \\ & \mathbf{e}_k & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta |\mathbf{V}| \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{\lambda} \\ \mathbf{Q}_{\lambda} \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta |\mathbf{V}| \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = -\mathbf{J}_M \mathbf{t} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

sendo

- $\mathbf{e}_k$ vetor linha que conterà 1 apenas na coluna correspondente ao novo parâmetro;
- $\mathbf{J}_M$ é a matriz Jacobiana;
- $\mathbf{P}_{\lambda}$ e $\mathbf{Q}_{\lambda}$ são as derivadas da potência ativa e reativa especificada em relação a λ .

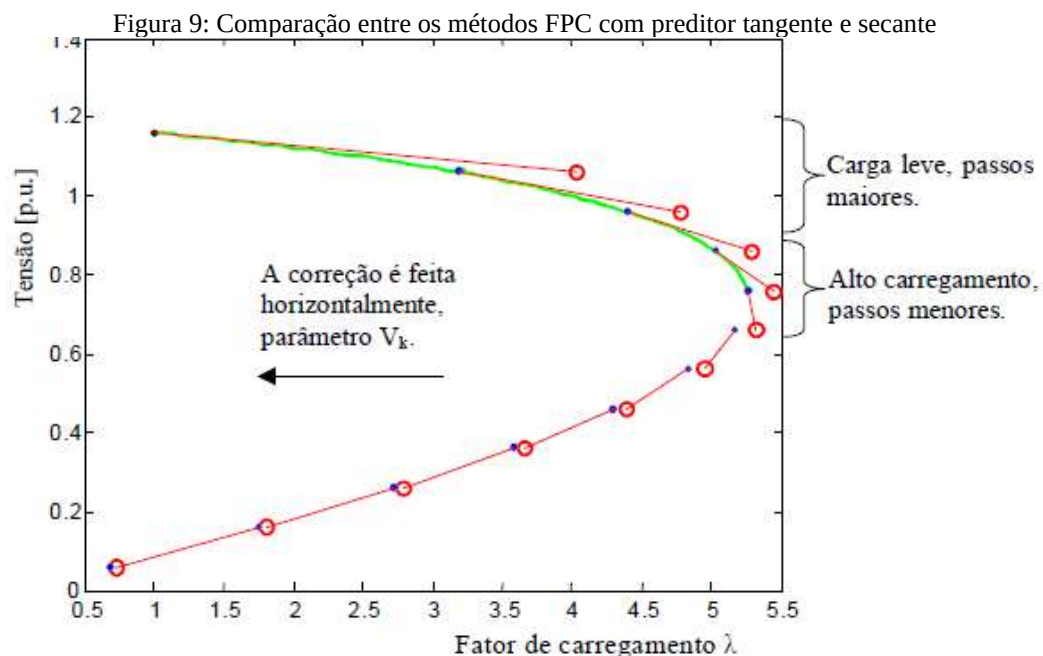
Geralmente, o número de iterações necessárias para realizar essa etapa é bem pequeno. De acordo com a Figura 7, no ponto “A”, a correção não será capaz de encontrar uma solução, caso o fator de carregamento λ seja adotado como parâmetro da continuação. Além do que, ao adotar esse parâmetro, tanto na etapa da predição quanto na correção, não se elimina o problema da singularidade da matriz Jacobiana modificada ($\mathbf{J}_M$) no PMC. Logo, para

determinar o PMC com a maior precisão possível, deve-se reduzir o passo, através de um controle de passo, conforme os pontos se aproximam do PMC.

2.4.4 Controle do Passo Predictor

Uma técnica simples para controlar o tamanho do passo predictor é baseada no número de iterações do passo corretor (SEYDEL, 1994). Tratando-se de uma carga leve (sistema pouco carregado) ou normal, o número de iterações do passo corretor será pequeno, logo, o tamanho do passo previsto poderá ser maior. Por outro lado, se o número de iterações aumenta, indica que o sistema numa região de alto carregamento, e deve-se diminuir o tamanho do passo.

Outra alternativa para controlar o tamanho do passo predictor é o uso da magnitude da tensão $|V_k|$ de uma barra k como parâmetro durante todo o traçado da curva P-V. Essa estratégia acarretará em um controle automático do passo de λ , uma vez que o passo fixo na tensão, geralmente, corresponde a passos maiores na variação do λ tratando-se de carga leve ou normal, e passos menores para sistemas altamente carregados. Ver Figura 9.



Fonte: Bonini e Alves (2006)

Outro método interessante também de controle de passo está baseado na norma do vetor tangente (ZAMBRONI DE SOUZA; CAÑIZARES; QUINTANA, 1997). Para esse método o tamanho do passo é definido como:

$$\sigma = \frac{\sigma^0}{\|\mathbf{t}\|_2} \quad (16)$$

no qual:

- $\|\mathbf{t}\|_2$ é a norma Euclidiana do vetor tangente $\begin{bmatrix} d\theta \\ d|V| \\ d\lambda \end{bmatrix}$;
- σ^0 é um escalar predefinido.

Conforme o sistema elétrico torna-se carregado, a magnitude do vetor tangente $\mathbf{t}$ aumenta e o escalar σ diminui. Destaca-se que a eficiência desse processo dependerá da escolha apropriada de σ^0 , que depende do sistema e, nesses casos, o parâmetro da continuação adotado deve ser λ .

2.5 UM LEVANTAMENTO DE PROPOSTAS DE PARAMETRIZAÇÃO

Os métodos de FPC distinguem-se pela forma de eliminar a singularidade da matriz Jacobiana, através das técnicas de parametrização. A seguir, apresenta-se um levantamento sobre algumas das diversas metodologias, presentes na literatura, que foram propostas para evitar a singularidade da matriz.

A técnica de Ajjarapu e Christy (1992) consiste na troca de parâmetro próximo ao PMC. Para o método do vetor tangente, escolhe-se a variável que apresentar a maior variação. Dessa forma, o fator de carregamento (λ) passa a ser tratado como variável dependente, enquanto que o novo parâmetro passe a ser a variável escolhida. Essa técnica de parametrização local tem demonstrado que ao aproximar-se do PMC, o parâmetro muda de λ para a tensão que apresenta a maior variação, retornando novamente para λ após alguns pontos. Embora o uso dessa metodologia para a escolha automática do parâmetro não tenha apresentado dificuldades, o conjunto das barras, cuja magnitude de tensão pode ser utilizada como parâmetro da continuação, fica restrito, particularmente nos sistemas com grande número de barras PV.

Em (CHIANG et al., 1995) a técnica de parametrização proposta define como parâmetro o comprimento de arco (s). Logo após a obtenção de dois pontos da curva, é utilizado na etapa da predição o preditor secante.

Embora, esta técnica de parametrização, considerada pelos autores como mais robusta (possibilita que sejam dados passos maiores do que a técnica utilizando parametrização local), sendo o sistema de equação algébrica não linear, a solução para o problema exige um método diferenciado, o que pode acarretar em um tempo computacional muito alto.

Garbelini et al. (2007) apresenta uma técnica de parametrização geométrica que consiste em acrescentar ao conjunto de equações básicas do FP, a equação de uma reta que passa por um ponto no plano formado pelas variáveis perda total de potência ativa e o fator de carregamento.

O conjunto de equações é dado por:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{G}(|\mathbf{V}|, \boldsymbol{\theta}, \lambda) &= \mathbf{0} \\ W(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda, \alpha) &= \alpha(\lambda - \lambda^0) - (Pa(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda) - Pa^0) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Em que o parâmetro α é o coeficiente angular da reta e passa a ser considerado o parâmetro da continuação (seu valor é prefixado). Assim, o número de incógnitas fica igual ao de equações, com isto, a condição necessária para que se tenha solução é atendida, desde que a matriz tenha posto máximo (seja não singular). Sendo que o valor perda total de potência ativa (Pa) é calculado por meio da equação:

$$Pa = \sum_{k, m \in \Omega} g_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (18)$$

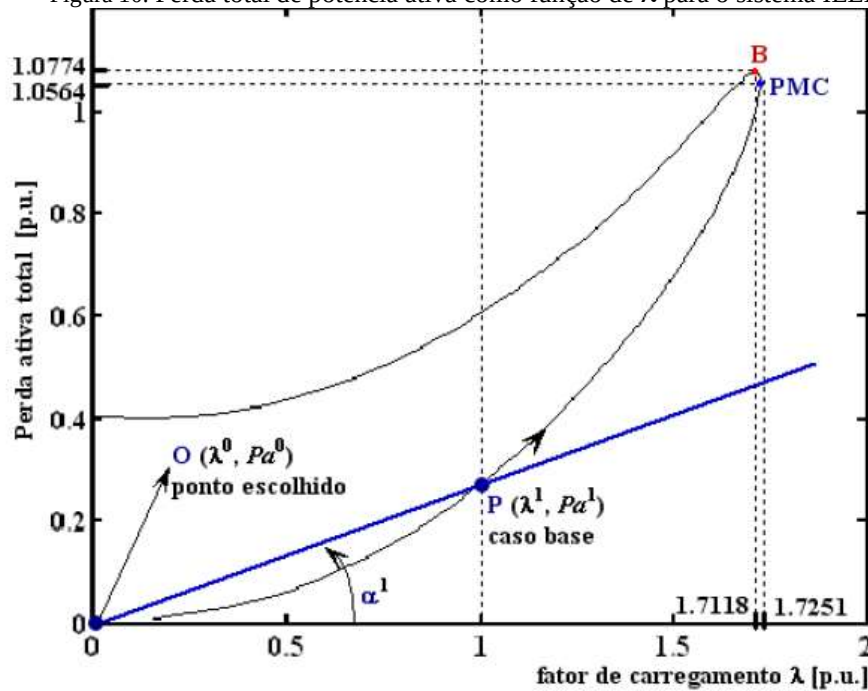
sendo g_{km} a condutância do ramo $k-m$, V_k e V_m são as magnitudes das tensões terminais do ramo $k-m$ e θ_{km} a diferença angular entre as tensões nodais do ramo $k-m$.

Desta forma, após obter a solução do caso base (θ^1 , V^1 , Pa^1 e λ^1) através de um FP, determina-se o valor de α a partir do ponto inicial escolhido (λ^0 , Pa^0) e dos seus respectivos valores obtidos no caso base (λ^1 , Pa^1), ver Figura 10.

$$\alpha^1 = \frac{Pa^1 - Pa^0}{\lambda^1 - \lambda^0} \quad (19)$$

Determinado α^1 , a técnica proposta pode ser aplicada para traçar a curva P-V e obter o PMC aplicando o passo preditor para encontrar uma estimativa para a próxima solução.

Figura 10: Perda total de potência ativa como função de λ para o sistema IEEE-57.



Fonte – Garbelini (2007)

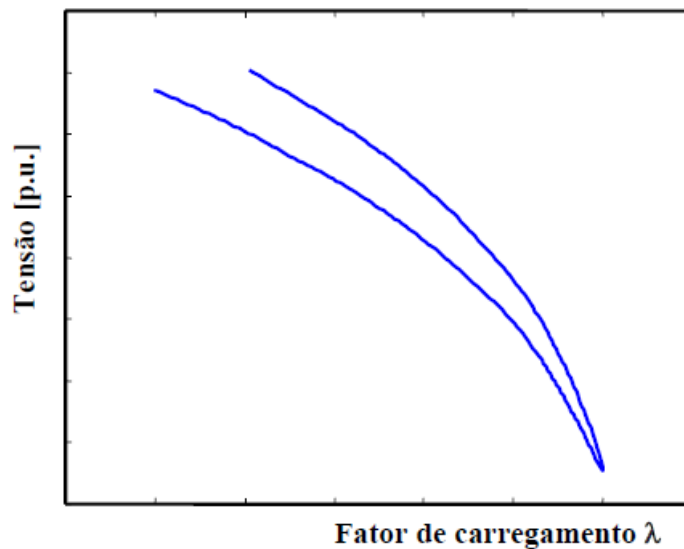
Através da técnica calculam-se as demais soluções por meio de sucessivos incrementos ($\Delta\alpha$) no valor de α . Para $\alpha = \alpha^1 + \Delta\alpha$ a solução de (17) fornecerá o novo ponto de operação (θ^2 , V^2 , Pa^2 e λ^2) que corresponde à interseção da reta Pa com a reta cujo novo valor do coeficiente angular $\alpha^1 + \Delta\alpha$ foi especificado. Para $\alpha = \alpha^1$ a solução convergida deverá resultar em $\lambda = 1$. Quando o método não convergir, o tamanho do passo deverá ser reduzido. Em caso de nova falha, as coordenadas do feixe de retas são ligadas a novas coordenadas localizadas no eixo das abscissas e que corresponde ao ponto médio entre o carregamento do caso base e o último ponto de carregamento antes da divergência. Este passo é essencial para superar a singularidade da matriz Jacobiana modificada no PMC. Durante este processo, não é necessário trocar o parâmetro, mas apenas alterar as coordenadas do feixe de retas.

Essa metodologia associada a um bom controle de passo proporcionou bons resultados quando aplicada aos sistemas teste analisados. A técnica possibilitou encontrar o PMC e toda a curva P-V com um baixo número global de iterações. A vantagem desse método é de que no caso dos FPC parametrizados por tensão sempre ocorrem mudanças de parâmetro, enquanto que na metodologia proposta a mudança, quando se fizer necessária, é previamente estabelecida.

As técnicas de parametrização global desenvolvidas por Bonini Neto e Alves (2009) fundamentam-se na metodologia proposta em Garbelini et al. (2007), que também utilizada equações de retas, mas que passam através de pontos nos planos determinados pelas variáveis

fator de carregamento e a somatória das magnitudes dos ângulos, ou das tensões nodais de todas as barras do sistema com o objetivo de obter o traçado completo da curva P-V especialmente de sistemas com instabilidade de tensão com características predominantemente local (Figura 11).

Figura 11: Curva P-V típica de um sistema com estabilidade de tensão com características predominantemente local



Fonte – Bonini (2009)

Nessa proposta é feita uma mudança de coordenadas do centro do feixe de retas para o ponto médio, ver Figura 12 onde se apresenta o procedimento geral para o traçado da curva P-V. O critério utilizado para se efetuar essa mudança das coordenadas do centro do feixe de retas é baseado na análise da evolução do *mismatch* total de potência. O uso desta análise propiciou uma redução do número de iterações, ou seja, as mudanças ocorreram antes de atingir-se o número máximo de iterações estipulado em torno de dez para a obtenção das curvas P-V.

Nessa metodologia foi utilizada o seguinte sistema de equações:

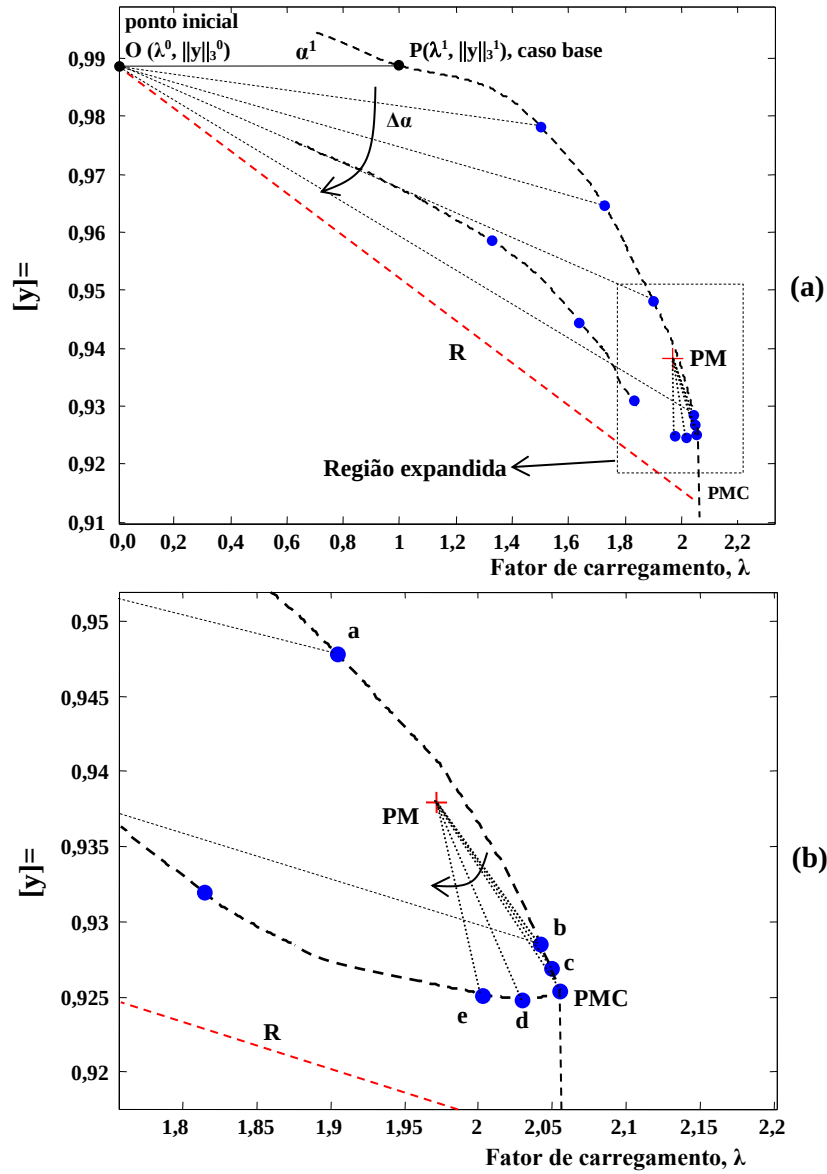
$$\left. \begin{aligned} \mathbf{G}(|\mathbf{V}|, \boldsymbol{\theta}, \lambda) &= \mathbf{0} \\ R(y, \lambda, \alpha, \beta) &= \alpha(\lambda - \lambda^0) - \beta([y] - [y^0]) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

em que α e β são coeficientes angulares que definem a reta a ser utilizada, e $[y]$ é a medida escalar do vetor $y = [y_1, \dots, y_n]^T$.

O método mostrou-se eficiente para o traçado completo da curva P-V para os sistemas analisados, incluindo os sistemas com instabilidade de tensão com características, predominantemente local. Possui como vantagens a possibilidade do uso de um tamanho de passo fixo, a não necessidade de realizar troca de parâmetro durante o traçado da curva P-V, e

o cálculo mais preciso do valor de λ do PMC sem a necessidade de uma estratégia de redução no passo ($\Delta\alpha$), o que ocorre em virtude da mudança das coordenadas do centro do feixe de retas para o Ponto Médio (PM) situado próximo do PMC.

Figura 12: Procedimento geral para o traçado da curva P-V:
(a) curva $\lambda - \Sigma y_k$ - (b) detalhe do processo de convergência em torno do PMC.



Fonte – Bonini Neto e Alves (2009)

Com o intuito de reduzir o número de pontos ao longo do traçado da curva P-V, em (KURODA et al., 2020) foi proposto o uso de um passo variável ($\Delta\alpha$) no parâmetro geométrico, ao invés de um passo fixo como o proposto por Bonini Neto e Alves (2009). Nesse sentido, um PMC temporário é previsto por meio da técnica *Look-Ahead*, o parâmetro geométrico é ajustado em torno do resultado previsto e o incremento $\Delta\alpha$ é ampliado. Observa-

se que, diferente do estudo apresentado por Bonini Neto e Alves (2009), as restrições de potência reativa do gerador não foram levadas em consideração.

Em Magalhães et al. (2013) é apresentada uma proposta de parametrização geométrica para o FPC, fundamentado nas equações de parábolas situadas no plano formado pelas variáveis perda total de potência ativa versus fator de carregamento. Na proposta adotou-se um polinômio do segundo grau, ou seja, uma função quadrática que passa por três pontos e cuja imagem geométrica é uma parábola, conforme apresentado na Figura 13. A escolha de um polinômio de segundo grau deve-se à característica, aproximadamente, quadrática apresentada pelas trajetórias da função de perda total de potência ativa em função do fator de carregamento. Assim, para o traçado da curva P-V e a determinação do PMC (e da MC) do sistema, uma equação polinomial do segundo grau, baseada no método de interpolação de Lagrange, foi ajustada à função de perda total de potência ativa (P_a).

A equação quadrática ajustada à função de perda total de potência ativa, e que será adicionada ao sistema de equações (6), é dada por:

$$\Delta W(\theta, V, \lambda, \alpha) = P_a(\theta, V, \lambda) - P_n(x) = 0 \quad (21)$$

em que $P_n(x) = ax^2 + bx + c$, sendo x o fator de carregamento (λ). Os coeficientes a , b e c são calculados através do desenvolvimento do produto do coeficiente do polinômio interpolador de Lagrange. A primeira equação de parábola é dada pelo polinômio interpolador de Lagrange através da equação:

$$P_n(x) = \sum_{i=0}^n L_i(x) f(x_i) \quad (22)$$

em que:

$$L_i(x) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{(x - x_j)}{(x_i - x_j)} \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (23)$$

onde:

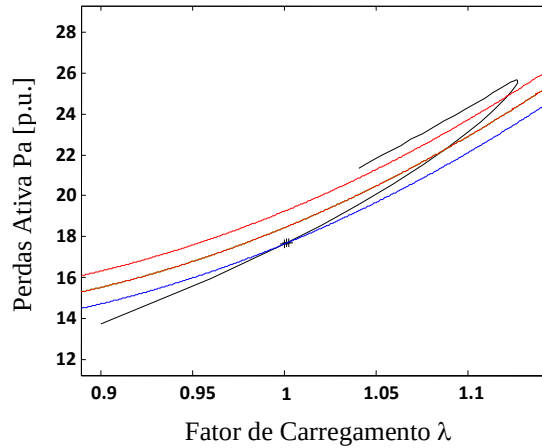
- $P_n(x)$: polinômio interpolador de Lagrange.
- x_i : pontos conhecidos ($i = 0, 1, \dots, n$).
- $f(x_i)$: valor da função nos pontos conhecidos.
- $L_i(x)$: coeficiente do polinômio interpolador de Lagrange.
- n : ordem do polinômio.

Assim, o sistema (6) passa a ser representado da seguinte forma:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda) &= \mathbf{P}^{\text{esp}}(\lambda) - \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = \mathbf{0} \\ \Delta \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda) &= \mathbf{Q}^{\text{esp}}(\lambda) - \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}) = \mathbf{0} \\ \Delta W(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda, \alpha) &= Pa(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{V}, \lambda) - ((a\alpha)\lambda^2 + b\lambda + c) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

sendo α o parâmetro que determina as novas equações de parábolas.

Figura 13: Parábolas no plano λ - Pa determinadas pelo método proposto

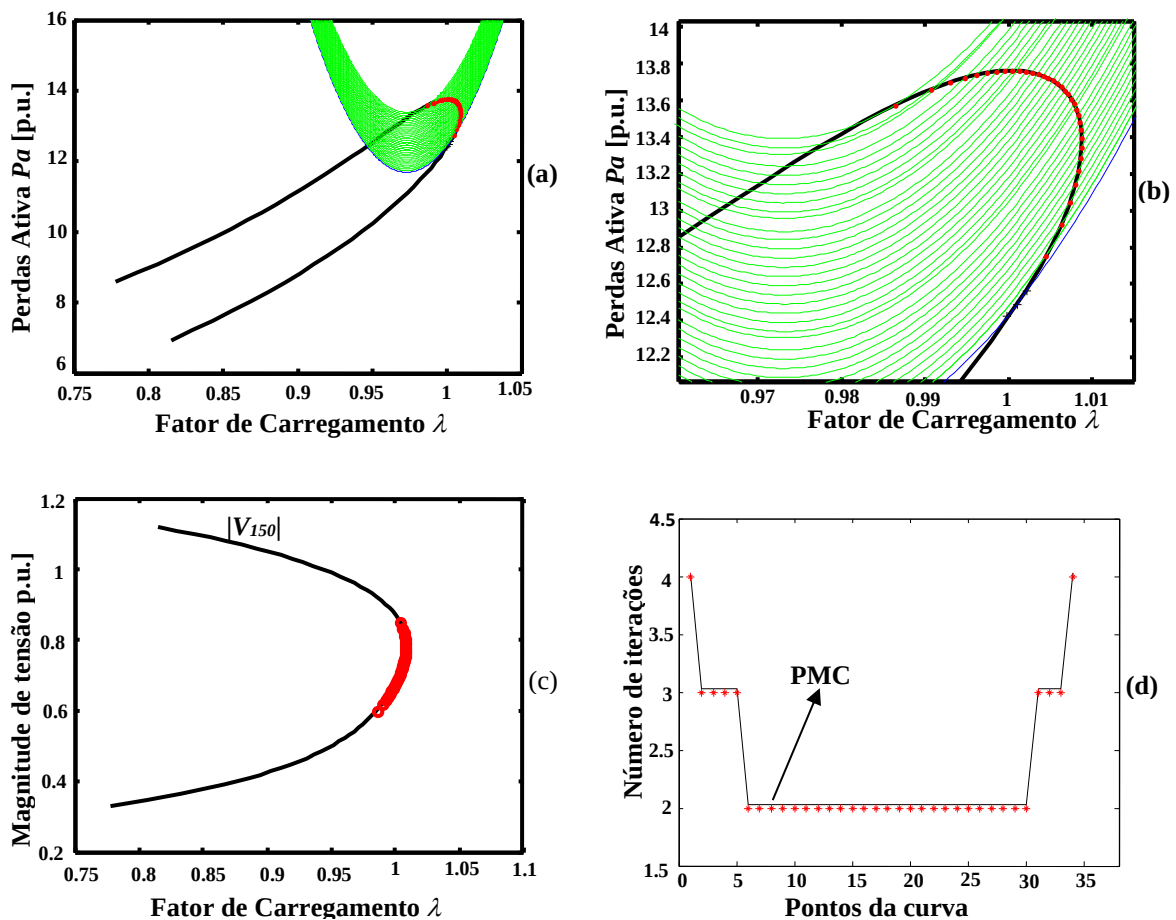


Fonte – Magalhães, Bonini Neto e Alves (2009)

A Figura 14 apresenta os resultados para a configuração de 638 barras do sistema Sul-Sudeste Brasileiro. Na Figura 14(a) apresenta-se a curva de perda total de potência ativa (Pa) em função de λ . A região do PMC ampliada pode ser visto na Figura 14(b), enquanto que na Figura 14(c) se apresenta a curva P-V da barra crítica (barra 150) e que foi obtida com os pontos armazenados durante o traçado da curva λ - Pa . O número de iterações utilizadas para obtenção dos pontos da curva P-V é mostrado na Figura 14(d). Observa-se o PMC foi obtido e os problemas numéricos devido ao mau-condicionamento das matrizes foram removidos.

O método apresenta como vantagem o fato de não ser necessário a troca de parâmetro ou redução do passo na região do PMC.

Figura 14: Sistema IEEE-638: (a) curva λ - P_a obtida com o procedimento proposto, (b) região do PMC ampliada, (c) magnitude da tensão na barra crítica como função do carregamento, (d) número de iterações gastas para obtenção dos pontos na curva λ - P_a



Fonte – Magalhães, Bonini Neto e Alves (2009)

Em Tostado et. al. (2019) foi proposta uma nova metodologia para a resolução do problema de FP de sistemas elétricos bem e mal condicionados. A nova metodologia denominada *Newton-Raphson-Predictor-Corrector* (NR-PC) mostrou-se capaz de melhorar a taxa de convergência do método Newton-Raphson padrão. O procedimento preditor-corretor foi desenvolvido para atingir a taxa de convergência da ordem $1 + \sqrt{2} \approx 2,4$ ao invés de 2, como no caso do método convencional de resolução de FP via Newton-Raphson.

A aritmética *affine* também foi utilizada para o desenvolvimento de algoritmos de FPC visando à determinação dos impactos da incorporação do efeito de incertezas relacionadas à demanda e geração de potência. Em Adusumilli e Kumar (2018) a aritmética *affine* é aplicada ao FPC para determinar a curva P-V considerando incertezas nas injeções de potência ativa e reativa em todas as barras do sistema.

Uma abrangente revisão sobre a aplicação de métodos de N-R para a resolução do FP em SEP bem e mal condicionados pode ser encontrado em Karimi et al. (2019).

3 FLUXO DE POTÊNCIA: FORMULAÇÕES E MÉTODOS

O FP consiste na modelagem matemática das condições de operação de um sistema de energia elétrica em regime permanente. Essa formulação é representada através de um conjunto de equações algébricas não lineares que são utilizadas para a determinação do estado da rede, da distribuição dos fluxos e de outras grandezas de interesse, através de métodos iterativos (MONTICELLI, 1983).

De acordo com Monticelli (1983), esses resultados são utilizados durante os estágios de projeto, planejamento e operação dos sistemas elétricos e, em geral, tem como objetivo determinar as gerações de potência ativa e potência reativa de tal forma que: a demanda seja totalmente satisfeita, o perfil de tensão esteja dentro dos limites preestabelecidos e tanto as LT como os equipamentos operem sem sobrecarga.

Com o crescimento dos sistemas elétricos, tanto em tamanho como em complexidade, o método de N-R, desenvolvido por Isaac Newton e Joseph Raphson, ganhou mais destaque em relação aos outros métodos de resolução para o problema de FP, pois, de acordo com a literatura especializada técnico-científica, o método tem como vantagem ser robusto, convergindo com poucas iterações e, ainda pelo número de iterações necessárias para a convergência ser independente do tamanho do SEP. É importante destacar que a convergência do método de N-R depende muito do ponto inicial adotado.

3.1 FLUXO DE POTÊNCIA: FORMULAÇÃO VIA INJEÇÃO DE POTÊNCIA

Na literatura especializada, as formulações para as equações do FP podem ser expressas em termos de coordenadas retangulares ou em termos de coordenadas polares e, em alguns casos, formulações híbridas destas (STOTT, 1974; DA COSTA 1997; KULWORAWANICHPONG, 2010; KAMEL, 2013; EL-HAWARY, 1995). Tais formulações podem ser baseadas considerando as equações de injeção de potência ou as equações de injeção de corrente.

Na formulação do FP convencional, que utiliza as equações de injeção de potência e as tensões nodais expressas em termos de coordenadas polares, a equação (**G**) para um sistema elétrico de potência é escrita como (MONTICELLI, 1983):

$$\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) = \mathbf{0} \quad (25)$$

no qual:

- $\boldsymbol{\theta}$ é o vetor dos ângulos de fase nodais das barras de carga (PQ) e de geração (PV);
- $|\mathbf{V}|$ é o vetor das magnitudes das tensões nodais das barras de carga (PQ);
- $\mathbf{G}$ é o vetor que contém as equações dos balanços de potências ativa e reativa.

A cada barra da rede são associadas quatro variáveis, sendo duas variáveis consideradas dentro do problema como independentes (dados) e as outras duas como variáveis dependentes (incógnitas) (MONTICELLI, 1983):

- $|V_k|$ – magnitude da tensão nodal de uma barra k ;
- θ_k – ângulo de fase da tensão nodal na barra k ;
- P_k – geração líquida (geração menos carga) de potência ativa na barra k ;
- Q_k – injeção líquida (geração menos carga) de potência reativa na barra k .

As variáveis dependentes são encontradas mediante resolução das equações do FP. Dependendo de quais as variáveis nodais são consideradas como independentes e quais são consideradas dependentes, definem-se três tipos de barras (MONTICELLI, 1983), de acordo com a Tabela 1:

Tabela 1 – Tipo de barras

Tipo de barra	Dados	Incógnitas
Barra de carga - PQ	P_k, Q_k	V_k, θ_k
Barra de tensão controlada - PV	P_k, V_k	Q_k, θ_k
Barra de referência – V θ (ou referência, ou folga, ou <i>slack</i> , ou <i>swing</i>)	V_k, θ_k	P_k, Q_k

Fonte: Elaboração da própria autora

As barras do tipo PQ e PV são utilizadas para representar as barras de carga e geração, respectivamente. A barra V θ têm duas funções: uma é fornecer a referência angular do sistema, e a outra é fechar o balanço de potência do sistema (MONTICELLI, 1983).

As equações de injeção de potência ativa e potência reativa na barra k são obtidas através da Lei das correntes de Kirchhoff (potência injetada na barra é igual à soma das potências distribuídas pelos ramos conectados a ela), sendo expressas da seguinte forma (MONTICELLI, 1983):

$$S_k \begin{cases} P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) = |V_k| \sum_{i \in K} |V_i| [G_{ki} \cos(\theta_{ki}) + B_{ki} \sin(\theta_{ki})] \\ Q_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) = |V_k| \sum_{i \in K} |V_i| [G_{ki} \sin(\theta_{ki}) - B_{ki} \cos(\theta_{ki})] \end{cases} \quad (26)$$

sendo:

$P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ e $Q_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ vetores de injeções de potência ativa e reativa da k -ésima barra, respectivamente, calculadas como funções de $\boldsymbol{\theta}$ e $|\mathbf{V}|$, onde:

- $|V_k|$ e $|V_i|$ são as magnitudes das tensões terminais no ramo $k-i$;
- θ_{ki} é a defasagem angular entre as tensões das barras terminais no ramo $k-i$, isto é: $\theta_{ki} = \theta_k - \theta_i$;
- G_{ki} é a condutância do ramo $k-i$;
- B_{ki} é a susceptância do ramo $k-i$;
- K é o conjunto formado por todas as barras vizinhas a k , inclusive a própria k .
- S_k é a injeção líquida da potência complexa na barra k .

O conjunto de equações (26) tem $2n$ equações, e consiste em obter o estado $(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ da rede, assim que todas as tensões (magnitudes $(|\mathbf{V}|)$ e ângulos de fase $(\boldsymbol{\theta})$) são calculadas, excetuando as magnitudes de tensão das barras de geração e ângulo das barras de folga.

De acordo com a Tabela 1, considera-se um PFP no qual são dados:

- P_k e Q_k para as barras PQ;
- P_k e V_k para as barras PV;
- V_k e θ_k para as barras V θ .

e com esses dados calculam-se:

- V_k e θ_k para as barras PQ;
- θ_k e Q_k para as barras PV;
- P_k e Q_k para as barras V θ .

Resolvendo esse problema, será determinado o estado $(\theta_k, |V_k|)$ para todas as barras da rede ($k = 1, n$), o que torna viável o cálculo de outras variáveis de interesse, como, por exemplo, os FP nas LT (MONTICELLI, 1983).

Considere-se uma rede elétrica constituída por:

- uma barra *slack* (V θ);
- n_{PQ} barras do tipo PQ (barras de carga);
- n_{PV} barras do tipo PV (barras de tensão controlada).

Tem-se que uma rede qualquer possui $(n_{PQ} + n_{PV} + 1)$ barras e:

$$\begin{cases} 2 \cdot (n_{PQ} + n_{PV} + 1) \text{ dados} \\ 2 \cdot (n_{PQ} + n_{PV} + 1) \text{ incógnitas} \end{cases}$$

Esse problema pode ser decomposto em dois subsistemas de equações algébricas, conforme mostra-se abaixo (MONTICELLI, 1983):

Subsistema 1

O Subsistema 1 contém um sistema de equações algébricas não lineares de dimensão $(2n_{PQ} + n_{PV})$, no qual são dados:

- P_k e Q_k para as barras PQ e calculam-se V_k e θ_k ;
- P_k e V_k para as barras PV e calcula-se θ_k .

Subsistema 2

Após resolver o subsistema 1, tem-se conhecido o estado $(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ de todas as barras da rede, e calcula-se:

- P_k e Q_k nas barras de referência;
- Q_k nas barras PV.

Assim, tem-se um sistema de $(n_{PV} + 2)$ equações algébricas não lineares com o mesmo número de incógnitas, no qual todas elas aparecem de forma explícita, diferente do subsistema 1, em que todas as incógnitas são implícitas, exigindo um processo iterativo de resolução (MONTICELLI, 1983).

Como a solução do PFP é de natureza iterativa, é necessário, antes de iniciar o processo de resolução do problema, estipular um critério de convergência, e para tal, é comum realizar teste nos chamados *mismatches* (ou desbalanços, ou resíduos, ou erro) de injeção de potência (SALGADO, [2000]).

Os *mismatches* da potência complexa no nó k é a diferença entre a potência especificada S_{sp_k} e a potência calculada S_k , ou seja:

$$\Delta S_k = S_{sp_k} - S_k \quad (27)$$

Separando a equação (4) em partes real e imaginária e expressando as tensões nodais na forma polar $(|V| \angle \theta)$, tem-se:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) &= P_{sp_k} - |V_k| \sum_{i \in K} |V_i| [G_{ki} \cos(\theta_{ki}) + B_{ki} \sin(\theta_{ki})] \\ \Delta Q_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) &= Q_{sp_k} - |V_k| \sum_{i \in K} |V_i| [G_{ki} \sin(\theta_{ki}) - B_{ki} \cos(\theta_{ki})] \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

em que:

- $\Delta P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ é denominado como resíduo de potência ativa na barra k ;
- $\Delta Q_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ é denominado como resíduo de potência reativa na barra k ;
- $P_{sp_k} = \lambda(P_{ger_k} - P_{cg_k})$ é a potência ativa especificada na barra k ;
- $Q_{sp_k} = Q_{ger_k} - \lambda Q_{cg_k}$ é a potência reativa especificada na barra k .

O FP só admitirá solução quando ΔP_k e ΔQ_k forem iguais a zero.

$$\left. \begin{aligned} \Delta \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) &= P_{sp} - \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) = \mathbf{0} \text{ para as barras PQ e PV} \\ \Delta \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) &= Q_{sp} - \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) = \mathbf{0} \text{ para as barras PQ} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Na prática, o critério de convergência mais adotado é:

- $|\Delta P_k| \leq \varepsilon_p$ para todas as barras PQ e PV;
- $|\Delta Q_k| \leq \varepsilon_q$ para todas as barras PQ.

Sendo ε uma tolerância predefinida.

3.1.1 Formulação via Injeção de Potência – Método FP

Na formulação matricial do método de N-R, o conjunto de soluções do sistema de equações algébricas não lineares é atingido a partir de uma estimativa inicial predefinida, ou seja, para obter a solução do problema de FP cumprindo uma sequência de etapas, é necessário adotar antes um ponto de partida inicial. Em geral, estimam-se todas as magnitudes das tensões nodais iguais a um ($|\mathbf{V}| = 1$ p.u.) para as barras de carga (PQ), e todos os ângulos de fase iguais a zero grau ($\theta = 0^\circ$ grau) para as barras de carga (PQ) e geração (PV). Essa condição é conhecida na literatura específica como *flat-start* (EL-ABIAD, 1983). Outra alternativa para iniciar o método de N-R é utilizar antes o método iterativo de Gauss-Seidel (G-S) com a finalidade de refinar o ponto de partida inicial.

Utilizando o método de N-R, para a resolução do conjunto de equações do FP, calcula-se $|\mathbf{V}_k|$ e θ_k para todas as barras, seguindo o algoritmo apresentado por Monticelli (1983).

Por conveniência reescreve-se a equação (29) novamente da seguinte maneira, a qual o método de Newton é aplicado:

$$S_1 = \left\{ \begin{aligned} \Delta P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) &= P_{sp_k} - P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) = 0 & k \in \{\text{barras PQ e PV}\} \\ \Delta Q_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) &= Q_{sp_k} - Q_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) = 0 & k \in \{\text{barras PQ}\} \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

em que:

- $P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ e $Q_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ componentes dos vetores de injeções de potência ativa e reativa da k -ésima barra, respectivamente, e são calculadas como mostrado em (26).

O objetivo da resolução de S_1 consiste em determinar o vetor das correções $\Delta \mathbf{x}$, da v -ésima iteração, no qual $\mathbf{x}$ é o vetor das variáveis dependentes ($|\mathbf{V}|, \boldsymbol{\theta}$):

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}^v) = -\mathbf{J}(\mathbf{x}^v)\Delta \mathbf{x}^v \quad (31)$$

$$\Delta \mathbf{x}^v = -[\mathbf{J}(\mathbf{x}^v)]^{-1}\mathbf{G}(\mathbf{x}^v) \quad (32)$$

obtem-se assim,

$$\Delta \mathbf{x}^v = \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}^v \\ \Delta |\mathbf{V}|^v \end{bmatrix}_{2npq+npv} \quad (33)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}^v) = \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}^v \\ \Delta |\mathbf{V}|^v \end{bmatrix}_{2npq+npv} \quad (34)$$

sendo nPV e nPQ os números de barras PV e PQ, respectivamente, existentes no sistema.

Consideram-se as expressões dos vetores $\Delta \mathbf{P}$ e $\Delta \mathbf{Q}$ expressas em (29), no qual P_{sp_k} e Q_{sp_k} são constantes, a matriz Jacobiana $\mathbf{J}$ é dada como:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}^v) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial |\mathbf{V}|} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial |\mathbf{V}|} \end{bmatrix}_{2npq+npv}^v \quad (35)$$

Logo, a equação que define a aplicação do método de N-R para o FP, será dada por:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}^v \\ \Delta \mathbf{Q}^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{bmatrix}^v \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}^v \\ \Delta |\mathbf{V}|^v \end{bmatrix} \quad (36)$$

sendo $\mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \boldsymbol{\theta}}$, $\mathbf{N} = \frac{\partial \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial |\mathbf{V}|}$, $\mathbf{M} = \frac{\partial \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \boldsymbol{\theta}}$ e $\mathbf{L} = \frac{\partial \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial |\mathbf{V}|}$ submatrizes da matriz Jacobiana

$\mathbf{J}$, nas quais, seus componentes correspondem às derivadas das potências ativa e reativa em relação ao ângulo de fase das tensões das barras de carga e geração, e em relação à magnitude das tensões nas barras de carga. Os componentes das submatrizes que compõem a Jacobiana $\mathbf{J}$ são explicitadas da seguinte maneira (MONTICELLI, 1983):

$$\mathbf{H} \left\{ \begin{aligned} H_{ki} &= \frac{\partial P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \theta_i} = |V_k V_i| [G_{ki} \sin(\theta_{ki}) - B_{ki} \cos(\theta_{ki})] \text{ para } k \neq i \\ H_{kk} &= \frac{\partial P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \theta_k} = -|V_k^2| B_{kk} - V_k \sum_{i \in K} V_i [G_{ki} \sin(\theta_{ki}) - B_{ki} \cos(\theta_{ki})] \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

$$\mathbf{N} \left\{ \begin{aligned} N_{ki} &= \frac{\partial P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial |V_i|} = |V_k| [G_{ki} \cos(\theta_{ki}) + B_{ki} \sin(\theta_{ki})] \text{ para } k \neq i \\ N_{kk} &= \frac{\partial P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial |V_k|} = |V_k| G_{kk} + \sum_{i \in K} V_i [G_{ki} \cos(\theta_{ki}) + B_{ki} \sin(\theta_{ki})] \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

$$\mathbf{M} \left\{ \begin{aligned} M_{ki} &= \frac{\partial Q_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \theta_i} = -|V_k V_i| [G_{ki} \cos(\theta_{ki}) + B_{ki} \sin(\theta_{ki})] \text{ para } k \neq i \\ M_{kk} &= \frac{\partial Q_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \theta_k} = -|V_k^2| G_{kk} + V_k \sum_{i \in K} V_i [G_{ki} \cos(\theta_{ki}) + B_{ki} \sin(\theta_{ki})] \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

$$\mathbf{L} \left\{ \begin{aligned} L_{ki} &= \frac{\partial Q_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial V_i} = |V_k| [G_{ki} \sin(\theta_{ki}) - B_{ki} \cos(\theta_{ki})] \text{ para } k \neq i \\ L_{kk} &= \frac{\partial Q_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial V_k} = -|V_k| B_{kk} + \sum_{i \in K} V_i [G_{ki} \sin(\theta_{ki}) - B_{ki} \cos(\theta_{ki})] \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

Os elementos (H_{kk} , N_{kk} , M_{kk} e L_{kk}) das submatrizes ($\mathbf{J}$, $\mathbf{N}$, $\mathbf{M}$ e $\mathbf{L}$) que compõem a matriz Jacobiana $\mathbf{J}$, podem ser colocados em função das injeções de potência ativa e reativa na barra k , e assim, esses elementos passam a ser calculados de acordo com (41) à (43) (MONTICELLI, 1983):

$$\mathbf{H} \begin{cases} H_{ki} = |V_k V_i| [G_{ki} \sin(\theta_{ki}) - B_{ki} \cos(\theta_{ki})] \\ H_{kk} = -Q_k - |V_k^2| B_{kk} \end{cases} \quad (41)$$

$$\mathbf{N} \begin{cases} N_{ki} = |V_k| [G_{ki} \cos(\theta_{ki}) + B_{ki} \sin(\theta_{ki})] \\ N_{kk} = |V_k^{-1}| (P_k + |V_k^2| G_{kk}) \end{cases} \quad (42)$$

$$\mathbf{M} \begin{cases} M_{ki} = -|V_k V_i| [G_{ki} \cos(\theta_{ki}) + B_{ki} \sin(\theta_{ki})] \\ M_{kk} = P_k - |V_k^2| G_{kk} \end{cases} \quad (43)$$

$$\mathbf{L} \begin{cases} L_{ki} = |V_k| [G_{ki} \sin(\theta_{ki}) - B_{ki} \cos(\theta_{ki})] \\ L_{kk} = |V_k^{-1}| (Q_k - |V_k^2| B_{kk}) \end{cases} \quad (43)$$

3.1.2 Formulação via Injeção de Potência – Método FPIP

A diferença entre os métodos FP e FPIP, diferem apenas na representação dos termos do problema. No método FP os termos são expressos em termos de coordenadas retangulares e

polares, conhecida por formulação híbrida (EL-HAWARY, 1995). Já o método FPIP têm seus termos expressos apenas em coordenadas polares (EL-HAWARY, 1995; KULWORAWANICHPONG, 2010).

Para esta formulação, as equações de injeção de potência ativa e potência reativa na barra k são expressas da seguinte forma:

$$\begin{cases} P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) = |V_k| \sum_{i \in K} |Y_{ki} V_i| \cos(\phi_{ki} - \theta_{ki}) \\ Q_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) = -|V_k| \sum_{i \in K} |Y_{ki} V_i| \sin(\phi_{ki} - \theta_{ki}) \end{cases} \quad (44)$$

sendo $P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ e $Q_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ vetores de injeções de potência ativa e reativa da k -ésima barra, respectivamente, calculadas como funções de $\boldsymbol{\theta}$ e $|\mathbf{V}|$, onde o *mismatch* da potência complexa é dado da seguinte forma:

$$\Delta S_k = S_{spk} - S_{calc_k} = |S_k| \angle \varphi_k \quad (45)$$

Separando a equação (45) em partes, real e imaginária, tem-se o seguinte conjunto de equações:

$$\begin{cases} \Delta P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) = P_{spk} - |V_k| \sum_{i \in K} |Y_{ki} V_i| \cos(\phi_{ki} - \theta_{ki}) \\ \Delta Q_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) = Q_{spk} + |V_k| \sum_{i \in K} |Y_{ki} V_i| \sin(\phi_{ki} - \theta_{ki}) \end{cases} \quad (46)$$

em que:

- $\Delta P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ é denominado como resíduo de potência ativa na barra k ;
- $\Delta Q_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ é denominado como resíduo de potência reativa na barra k .

Logo, a equação que define a aplicação do método de N-R para o FPIP, é dada de acordo com a equação (36), entretanto, as submatrizes que compõem a matriz Jacobiana $\mathbf{J}_p$ são dadas como segue abaixo:

$$\mathbf{H} \begin{cases} H_{ki} = -|V_k V_i Y_{ki}| \sin(\phi_{ki} - \theta_{ki}) & \text{para } k \neq i \\ H_{kk} = -Q_k - B_{kk} |V_k|^2 \end{cases} \quad (47)$$

$$\mathbf{N} \begin{cases} N_{ki} = |V_k Y_{ki}| \cos(\phi_{ki} - \theta_{ki}) & \text{para } k \neq i \\ N_{kk} = \frac{(P_k + G_{kk} |V_k|^2)}{|V_k|} \end{cases} \quad (48)$$

$$\mathbf{M} \begin{cases} M_{ki} = -|V_k V_i Y_{ki}| \cos(\phi_{ki} - \theta_{ki}) & \text{para } k \neq i \\ M_{kk} = P_k - G_{kk} |V_k|^2 \end{cases} \quad (49)$$

$$\mathbf{L} \left\{ \begin{array}{l} L_{ki} = -|V_k Y_{ki}| \sin(\phi_{ki} - \theta_{ki}) \quad \text{para } k \neq i \\ L_{kk} = \frac{(Q_k - B_{kk} |V_k|^2)}{|V_k|} \end{array} \right\} \quad (50)$$

3.2 FLUXO DE POTÊNCIA: FORMULAÇÕES VIA INJEÇÃO DE CORRENTE

Alguns dos trabalhos existentes na literatura (LEITE, COSTA, 2003; KULWORAWANICHPONG, 2010) afirmam que as formulações baseadas nas equações via injeção de corrente têm como vantagem em relação a formulação convencional, o tempo e esforço computacional, uma vez a estrutura da matriz Jacobiana é formada basicamente pelos elementos da matriz de admitância nodal.

3.2.1 Formulação via Injeção de Corrente – Método FPICM

De acordo com Monticelli (1983) a injeção de corrente I_k , k -ésimo componente do vetor $\mathbf{I}$, é descrita da seguinte forma:

$$I_{sp_k} - \sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i = 0 \quad (51)$$

Os componentes real e imaginário da injeção de potência complexa especificada (S_{sp_k}) da magnitude da tensão complexa (V_k) na barra k ; o elemento (Y_{ki}) de k -ésima linha e i -ésima coluna da matriz de admitância $\mathbf{Y}$; e a corrente especificada na barra k (I_{sp_k}), são definidos abaixo como:

$$S_{sp_k} = |S_{sp_k}| \angle \varphi_k \quad (52)$$

$$V_k = |V_k| \angle \theta_k \quad (53)$$

$$Y_{ki} = |Y_{ki}| \angle \phi_{ki} \quad (54)$$

$$I_{sp_k} = \left(\frac{|S_{sp_k}| \angle \varphi_k}{|V_k| \angle \theta_k} \right)^* \quad (55)$$

Substituindo o segundo membro da equação (55) no respectivo termo do primeiro membro da equação (51) tem-se:

$$\left(\frac{|S_{sp_k}| \angle \varphi_k}{|V_k| \angle \theta_k}\right)^* - \sum_{i=1}^n |Y_{ki}| \angle \phi_{ki} |V_i| \angle \theta_i = 0 \quad (56)$$

$$\Delta F_k(\mathbf{V}) = \left|\frac{S_{sp_k}}{V_k}\right| \angle(-\varphi_k + \theta_k) - \sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i \angle(\phi_{ki} + \theta_i) = 0 \quad (57)$$

Define-se o resíduo de corrente complexo ($\Delta F_k = \Delta G_k + j\Delta H_k$), sendo ΔG_k e ΔH_k suas partes real e imaginária, respectivamente. Separando as partes real e imaginária da equação (53) e expressando as tensões nodais em termos de coordenadas polares, têm-se:

$$\left. \begin{aligned} \Delta G_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) &= \left|\frac{S_{sp_k}}{V_k}\right| \cos(-\varphi_k + \theta_k) - \sum_{i=1}^n |Y_{ki} V_i| \cos(\phi_{ki} + \theta_i) = 0 \\ \Delta H_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) &= \left|\frac{S_{sp_k}}{V_k}\right| \sin(-\varphi_k + \theta_k) - \sum_{i=1}^n |Y_{ki} V_i| \sin(\phi_{ki} + \theta_i) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (58)$$

O sistema de equações (58) representa as partes, real e imaginária, dos *mismatches* de corrente na barra k . Os *mismatches* serão zero assim que todas as tensões das barras desconhecidas forem obtidas.

Com $(n - 1)$ incógnitas de variáveis complexas e $(n - 1)$ equações complexas, uma forma de representar a matriz compacta usada para atualizar a solução do estado, magnitude e ângulo de tensão, podem ser expressas como segue:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) \\ \Delta \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \Delta \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial |\mathbf{V}|} \\ \frac{\partial \Delta \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \Delta \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial |\mathbf{V}|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta |\mathbf{V}| \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta |\mathbf{V}| \end{bmatrix} = -\mathbf{J}_1 \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta |\mathbf{V}| \end{bmatrix} \quad (59)$$

As derivadas parciais da matriz Jacobiana $\mathbf{J}_1$ podem ser expressas de modo semelhante ao FP convencional, e são resumidas em (60) – (63)

$$\mathbf{J}_1 \left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \Delta G_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \theta_i} &= -|Y_{ki} V_i| \sin(\phi_{ki} + \theta_i) \text{ para } k \neq i \\ \frac{\partial \Delta G_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \theta_k} &= -|Y_{kk} V_k| \sin(\phi_{kk} + \theta_k) + \left|\frac{S_{sp_k}}{V_k}\right| \sin(-\varphi_k + \theta_k) \end{aligned} \right\} \quad (60)$$

$$\mathbf{J}_2 \left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \Delta G_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial |V_i|} &= |Y_{ki}| \cos(\phi_{ki} + \theta_i) \text{ para } k \neq i \\ \frac{\partial \Delta G_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial |V_k|} &= |Y_{kk}| \cos(\phi_{kk} + \theta_k) + \left|\frac{S_{sp_k}}{V_k^2}\right| \cos(-\varphi_k + \theta_k) \end{aligned} \right\} \quad (61)$$

$$\mathbf{J}_3 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Delta H_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \theta_i} = |Y_{ki} V_i| \cos(\phi_{ki} + \theta_i) \text{ para } k \neq i \\ \frac{\partial \Delta H_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \theta_k} = |Y_{kk} V_k| \cos(\phi_{kk} + \theta_k) - \left| \frac{S_{spk}}{V_k} \right| \cos(-\phi_k + \theta_k) \end{array} \right\} \quad (62)$$

$$\mathbf{J}_4 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Delta H_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial |V_i|} = |Y_{ki}| \sin(\phi_{ki} + \theta_i) \text{ para } k \neq i \\ \frac{\partial \Delta H_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial |V_k|} = |Y_{kk}| \sin(\phi_{kk} + \theta_k) + \left| \frac{S_{spk}}{V_k^2} \right| \sin(-\phi_k + \theta_k) \end{array} \right\} \quad (63)$$

Considera-se que a solução do FPIC convergiu para o estado $(|\mathbf{V}|^v, \boldsymbol{\theta}^v)$ se os vetores de resíduos de corrente $\Delta \mathbf{G}$ e $\Delta \mathbf{H}$ forem menores que uma tolerância especificada. Caso contrário, a solução atual na iteração v tem de ser atualizada para a iteração seguinte $v+1$, como segue:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ |\mathbf{V}| \end{bmatrix}^{v+1} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ |\mathbf{V}| \end{bmatrix}^v + \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta |\mathbf{V}| \end{bmatrix}^v \quad (64)$$

A cada iteração, os componentes ΔG_k e ΔH_k dos vetores $\Delta \mathbf{G}$ e $\Delta \mathbf{H}$ são atualizados utilizando (58), para avaliar os resíduos de corrente. Assim como no método FPIP (baseado em injeção de potência), no FPIC (baseado em injeção de corrente) as potências ativas e reativas também são recalculadas de forma iterativa, como segue abaixo:

$$P_{calc_k}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) = \sum_{i=1}^n |Y_{ki} V_i V_k| \cos(\phi_{ki} + \theta_i - \theta_k) \quad (65)$$

$$Q_{calc_k}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) = \sum_{i=1}^n |Y_{ki} V_i V_k| \sin(\phi_{ki} + \theta_i - \theta_k) \quad (66)$$

Uma vez que a magnitude de tensão $|V_k|$ de uma barra k de geração é especificada e, portanto, mantida constante, a sua equação de injeção de potência reativa $Q_{ger_k}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ não aparece na equação (28). Por outro lado, embora o número de equações em (58) seja o mesmo que em (28), $Q_{ger_k}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ aparece implicitamente em $\Delta G_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$, por meio de $|S_{calc_k}|$ e ϕ_k .

Para as barras de tensão controlada, considera a injeção de potência reativa $Q_{ger_k}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ como função do estado (OLIVEIRA, et. al. 2016). Dessa forma, quando efetuado o cálculo das derivadas parciais das submatrizes $\mathbf{J}_1$ e $\mathbf{J}_2$, as quais compõem a matriz Jacobiana $\mathbf{J}_I$, o termo oriundo da derivada da função $Q_{ger_k}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$, no caso das barras de geração, passam a ser calculados pelas seguintes expressões:

Submatriz $\mathbf{J}'_1$:

$$\mathbf{J}'_1 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Delta G_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \theta_i} = |Y_{ki} V_i| \sin(\phi_{ki} + \theta_i) - |Y_{ki} V_i| \cos(\phi_{ki} + \theta_i - \theta_k) \sin(\theta_k) \text{ parak} \neq i \\ \frac{\partial \Delta G_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \theta_k} = |Y_{kk} V_k| \sin(\phi_{kk} + \theta_k) - \frac{|S_{spk}|}{|V_k|} [\sin(-\varphi_k + \theta_k)] + \\ \left[\frac{(P_{gerk} - P_{cgk})}{|V_k|} - |Y_{kk} V_k| \cos(\phi_{kk}) \right] \sin(\theta_k) \end{array} \right\} \quad (67)$$

Submatriz $\mathbf{J}'_2$:

$$\mathbf{J}'_2 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Delta G_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial |V_i|} = |Y_{ki}| \cos(\phi_{ki} + \theta_i) + |Y_{ki}| \sin(\phi_{ki} + \theta_i - \theta_k) \sin(\theta_k) \text{ parak} \neq i \\ \frac{\partial \Delta G_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial |V_k|} = |Y_{kk}| \cos(\phi_{kk} + \theta_k) + \frac{|S_{spk}|}{|V_k|^2} \cos(-\varphi_k + \theta_k) - \\ \left[\frac{(Q_{gerk} - Q_{cgk})}{|V_k|} - |Y_{kk} V_k| \sin(\phi_{kk}) \right] \sin(\theta_k) \end{array} \right\} \quad (68)$$

As submatrizes $\mathbf{J}_3$ e $\mathbf{J}_4$ não sofrem modificações, pois são derivadas realizadas somente para as barras de carga. Logo a nova forma de representar a matriz compacta, utilizada para atualizar a solução do estado (magnitude e ângulo de tensão), é dada por:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) \\ \Delta \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{J}'_1 & \mathbf{J}'_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta |\mathbf{V}| \end{bmatrix} = -\mathbf{J}'_1 \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta |\mathbf{V}| \end{bmatrix} \quad (69)$$

3.2.2 Formulação via Injeção de Corrente Híbrido – Método FPICH

Em (58), $|S_k^{esp}|$ e φ_k são, respectivamente, a potência complexa especificada e a magnitude do ângulo da tensão injetada na barra k , são expressos por:

$$S_k^{sp} = |S_k^{sp}| \cos(\phi_k) + j |S_k^{sp}| \sin(\phi_k) = (P_{ger,k}^{sp} - P_{cg,k}^{sp}) + j(Q_{ger,k}^{sp} - Q_{cg,k}^{sp}) = P_k^{sp} + jQ_k^{sp} \quad (70)$$

No qual, $P_{ger,k}^{sp}$ é a potência ativa especificada gerada para as barras de carga e geração, enquanto que, $P_{cg,k}^{sp}$ é a potência ativa especificada consumida para as barras de carga.

A equação (58) é apropriada para sistemas com barras de carga, mas não para sistemas com a presença de barras de geração, cuja potência reativa gerada está dentro de seus limites, pois neste caso a potência reativa gerada ($Q_{ger,k}$), a priori, não é conhecida a priori. Dessa forma, para contornar esse problema, esta variável pode ser eliminada de (58) reescrevendo-a da seguinte forma:

$$\left. \begin{aligned} \Delta G_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) &= \frac{P_k^{sp}}{|V_k|} \cos(\theta_k) + \frac{Q_k^{sp}}{|V_k|} \sin(\theta_k) - |Y_{kk}| |V_k| \cos(\varphi_{kk} + \theta_k) - \sum_{i \in \Omega_k} |Y_{ki}| |V_i| \cos(\varphi_{ki} + \theta_i) = 0 \\ \Delta H_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) &= \frac{P_k^{sp}}{|V_k|} \sin(\theta_k) - \frac{Q_k^{sp}}{|V_k|} \cos(\theta_k) - |Y_{kk}| |V_k| \sin(\varphi_{kk} + \theta_k) - \sum_{i \in \Omega_k} |Y_{ki}| |V_i| \sin(\varphi_{ki} + \theta_i) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (71)$$

sendo Ω_k o conjunto de todas as barras da rede, exceto a própria barra k . Adicionando a primeira equação de (71), multiplicada por $\cos(\theta_k)$, à segunda multiplicada por $\sin(\theta_k)$, e fazendo as manipulações algébricas, obtém-se:

$$\Delta P_k' = \frac{\Delta P_k}{|V_k|} = \frac{P_k^{sp}}{|V_k|} - \sum_{i \in \kappa} |Y_{ki}| |V_i| \cos(\varphi_{ki} - \theta_{ki}) = 0 \quad (72)$$

e que corresponde ao *mismatch* de potência ativa da formulação do Fluxo de Potência Injeção de potência (FPIP) normalizado por tensão. Assim, na formulação alternativa de N-R proposta, denominada Fluxo de Potência de Injeção de Corrente Híbrido (FPICH), (72) será usado para as barras PV, enquanto (71) para as barras PQ.

Em (ABHYANKAR, CUI, FLUECK; 2014) foi proposta uma formulação de FP baseada em equações de injeção de corrente e injeção de potência, escritas em termos de coordenadas retangulares. Este método é considerado uma formulação híbrida, uma vez que, para sua formulação utilizam-se as equações de balanço de injeção de corrente (79) para as barras de carga, enquanto que para as barras de geração são utilizadas as equações de balanço de injeção de potência ativa (80) e de restrição de magnitude de tensão, equação (81).

$$\Delta G_k(\mathbf{E}, \mathbf{F}) = \frac{(P_k^{sp} E_k + Q_k^{sp} F_k)}{(E_k^2 + F_k^2)} - \sum_{m \in \kappa} (G_{km} E_m - B_{km} F_m) = 0 \quad (73)$$

$$\Delta H_k(\mathbf{E}, \mathbf{F}) = \frac{(P_k^{sp} F_k - Q_k^{sp} E_k)}{(E_k^2 + F_k^2)} - \sum_{m \in \kappa} (G_{km} F_m + B_{km} E_m) = 0 \quad (74)$$

$$\Delta P_k(\mathbf{E}, \mathbf{F}) = P_k^{sp} - \sum_{m \in \kappa} [E_k (G_{km} E_m - B_{km} F_m) + F_k (G_{km} F_m + B_{km} E_m)] = 0 \quad (75)$$

$$(V_k^{sp})^2 = E_k^2 + F_k^2 \quad (76)$$

Destaca-se que essa formulação pode ser obtida a partir de manipulações algébricas de (73) e (74). Em (KAMEL, 2013) foi proposto um método que faz uso da combinação de ambas as formulações, a de injeção de potência e a de corrente. Usa-se as equações de balanço de injeção de corrente (73) e (74) para as barras PQ e a equação de balanço de injeção de potência ativa (28) para calcular o ângulo de fase da tensão (θ_k) das barras P-V's, omitindo neste caso a equação (76). Na equação de balanço de potência ativa, as tensões das barras são escritas em termos de coordenadas polares, enquanto que as potências injetadas e os

elementos da matriz de admitância nodal são representados em termos de coordenadas retangulares.

Em (DA COSTA, MARTINS, PEREIRA, 1999; DA COSTA, MARTINS, PEREIRA, 2001) é proposto o uso de *mismatches* de injeção de corrente considerando ΔQ como variável dependente, juntamente com a equação de restrição de magnitude de tensão (76), ambas escritas em termos de coordenadas retangulares.

A linearização do método proposto FPICH é dada da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{G}_{pq} \\ \Delta \mathbf{P}_{pv} \\ \frac{\Delta \mathbf{P}_{pv}}{|\mathbf{V}_{pv}|} \\ \Delta \mathbf{H}_{pq} \end{bmatrix} = -\mathbf{J}_H \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}_{pq} \\ \Delta \boldsymbol{\theta}_{pv} \\ \frac{\Delta |\mathbf{V}|_{pq}}{|\mathbf{V}|_{pq}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}_{pq} \\ \Delta \boldsymbol{\theta}_{pv} \\ \frac{\Delta |\mathbf{V}|_{pq}}{|\mathbf{V}|_{pq}} \end{bmatrix} \quad (77)$$

onde a matriz Jacobiana ($\mathbf{J}_H$) tem a mesma estrutura de $\mathbf{J}$, com npq barras de carga e npv barras de geração.

Os elementos das submatrizes $\mathbf{J}_1$ para as barras PQ e PV são dadas, respectivamente, por:

$$\mathbf{J}_1 \left\{ \begin{array}{l} \frac{-\partial \Delta G_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \theta_i} = -|V_i| |Y_{ki}| \sin(\varphi_{ki} + \theta_i) \quad \text{for } k \neq i \\ \frac{-\partial \Delta G_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \theta_k} = -|V_k| |Y_{kk}| \sin(\varphi_{kk} + \theta_k) + \frac{|S_k^{sp}|}{|V_k|} \sin(-\phi_k + \theta_k) \end{array} \right\} \quad (78)$$

$$\mathbf{J}_1 \left\{ \begin{array}{l} \frac{-\partial (\Delta P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)/|V_k|)}{\partial \theta_i} = -|V_i| |Y_{ki}| \sin(\varphi_{ki} - \theta_{ki}) \quad \text{for } k \neq i \\ \frac{-\partial (\Delta P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)/|V_k|)}{\partial \theta_k} = -|V_k| |Y_{kk}| \sin(\varphi_{kk}) - \frac{|Q_k|}{|V_k|} \end{array} \right\} \quad (79)$$

Os elementos das submatrizes $\mathbf{J}_2$ para as barras PQ e PV são dadas, respectivamente, por:

$$\mathbf{J}_2 \left\{ \begin{array}{l} \frac{-\partial \Delta G_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial |V_i|} = |Y_{ki}| \cos(\varphi_{ki} + \theta_i) \quad \text{for } k \neq i \\ \frac{-\partial \Delta G_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial |V_k|} = |Y_{kk}| \cos(\varphi_{kk} + \theta_k) + \frac{|S_k^{sp}|}{|V_k^2|} \cos(-\phi_k + \theta_k) \end{array} \right\} \quad (80)$$

$$\mathbf{J}_2 \left\{ \begin{array}{l} \frac{-\partial (\Delta P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)/|V_k|)}{\partial |V_i|} = |Y_{ki}| \cos(\varphi_{ki} - \theta_{ki}) \quad \text{for } k \neq i \\ \frac{-\partial (\Delta P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)/|V_k|)}{\partial |V_k|} = |Y_{kk}| \cos(\varphi_{kk} + \theta_k) + \frac{|S_k^{sp}|}{|V_k^2|} \cos(-\phi_k + \theta_k) \end{array} \right\} \quad (81)$$

Os elementos das submatrizes $\mathbf{J}_3$ para as barras PQ

$$\mathbf{J}_3 \left\{ \begin{array}{l} \frac{-\partial \Delta H_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \theta_i} = |V_i| |Y_{ki}| \cos(\varphi_{ki} + \theta_i) \quad \text{for } k \neq i \\ \frac{-\partial \Delta H_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \theta_k} = |V_i| |Y_{kk}| \cos(\varphi_{kk} + \theta_k) - \frac{|S_k^{sp}|}{|V_k|} \cos(-\phi_k + \theta_k) \end{array} \right\} \quad (82)$$

Os elementos das submatrizes $\mathbf{J}_4$ para as barras PQ

$$\mathbf{J}_4 \left\{ \begin{array}{l} \frac{-\partial \Delta H_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial |V_i|} = |Y_{ki}| \sin(\varphi_{ki} + \theta_i) \quad \text{for } k \neq i \\ \frac{-\partial \Delta H_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial |V_k|} = |Y_{kk}| \sin(\varphi_{kk} + \theta_k) - \frac{|S_k^{sp}|}{|V_k|} \cos(-\phi_k + \theta_k) \end{array} \right\} \quad (83)$$

Para valores iniciais escolhidos arbitrariamente de $\boldsymbol{\theta}$ e $|\mathbf{V}|$, os *mismatches* são calculadas por (58) para barras PQ e por (72) para barras PV. Se seus valores absolutos máximos forem menores que uma tolerância adotada, a solução foi obtida. Caso contrário, resolva (77) para obter os vetores de correção ($\Delta\boldsymbol{\theta}$ e $\Delta|\mathbf{V}|$) e atualize seus valores da seguinte forma:

$$\left. \begin{array}{l} \boldsymbol{\theta}^{v+1} = \boldsymbol{\theta}^v + \Delta\boldsymbol{\theta}^v \\ |\mathbf{V}_{pq}|^{v+1} = |\mathbf{V}_{pq}|^v + \Delta|\mathbf{V}_{pq}|^v \end{array} \right\} \quad (84)$$

no qual v é um contador de iteração.

Em ambas formulações, enquanto as potências reativas geradas das barras PV estão dentro dos limites estabelecidos, suas respectivas equações $\Delta H_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ e elementos de $\mathbf{J}_3$ e $\mathbf{J}_4$ não estão incluídos em (77), assim como os elementos de $\mathbf{J}_2$ e $\mathbf{J}_4$ correspondentes às derivadas em relação às magnitudes de tensão das barras PV, uma vez que suas magnitudes de tensão são especificadas. Dessa forma, o número total de equações e a seguir a estrutura e o tamanho da matriz Jacobiana permanecem o mesmo que no método padrão.

3.3 FLUXO DE POTÊNCIA: MÉTODO DESACOPLADO

As características mais importantes (convergência, armazenamento e velocidade) na análise dos métodos numéricos para a resolução de sistemas elétricos estão constantemente sendo aperfeiçoadas, uma vez que em suas formulações leva-se em consideração aspectos

físicos do sistema. Considerando as características físicas da rede, o método de Newton é um exemplo desse aprimoramento, quando se utiliza da esparsidade da matriz Jacobiana durante a eliminação de G-S. Seguindo essa linha, foi desenvolvido os métodos desacoplados e, posteriormente, o método desacoplado rápido. Como o próprio nome sugere, os métodos estão baseados no desacoplamento $P\theta - QV$, isto é, são obtidos considerando o fato de as sensibilidades $\partial P/\partial\theta$ e $\partial Q/\partial V$ serem mais intensas que as sensibilidades $\partial P/\partial V$ e $\partial Q/\partial\theta$ (MONTICELLI, 1983). Assim, diz-se que existe um acoplamento forte quando a sensibilidade é grande e, um acoplamento fraco (desacoplamento) caso a sensibilidade seja pequena.

3.3.1 Desacoplado: Formulação via Injeção de Potência

No método Desacoplado as submatrizes Jacobianas $\mathbf{N}$ e $\mathbf{M}$ são desprezadas, uma vez que seus valores são menores que os da submatrizes $\mathbf{H}$ e $\mathbf{L}$. Ressalta-se que foram introduzidas aproximações na matriz Jacobiana, sendo os vetores de *mismatches* calculados da mesma maneira que no método de N-R. Sendo assim, essas aproximações acabam alterando o processo de convergência, ou seja, a trajetória percorrida entre o ponto de partida e a solução final é diferente de um método para o outro, mas não alteraram a solução final, pois o problema resolvido permanece o mesmo e também depende das tolerâncias preespecificadas (MONTICELLI, 1983). Nesse método o desacoplamento permite o uso de duas técnicas de resolução: simultânea e a alternada para os subproblemas.

3.3.1.1 Método Desacoplado: Algoritmo Simultâneo

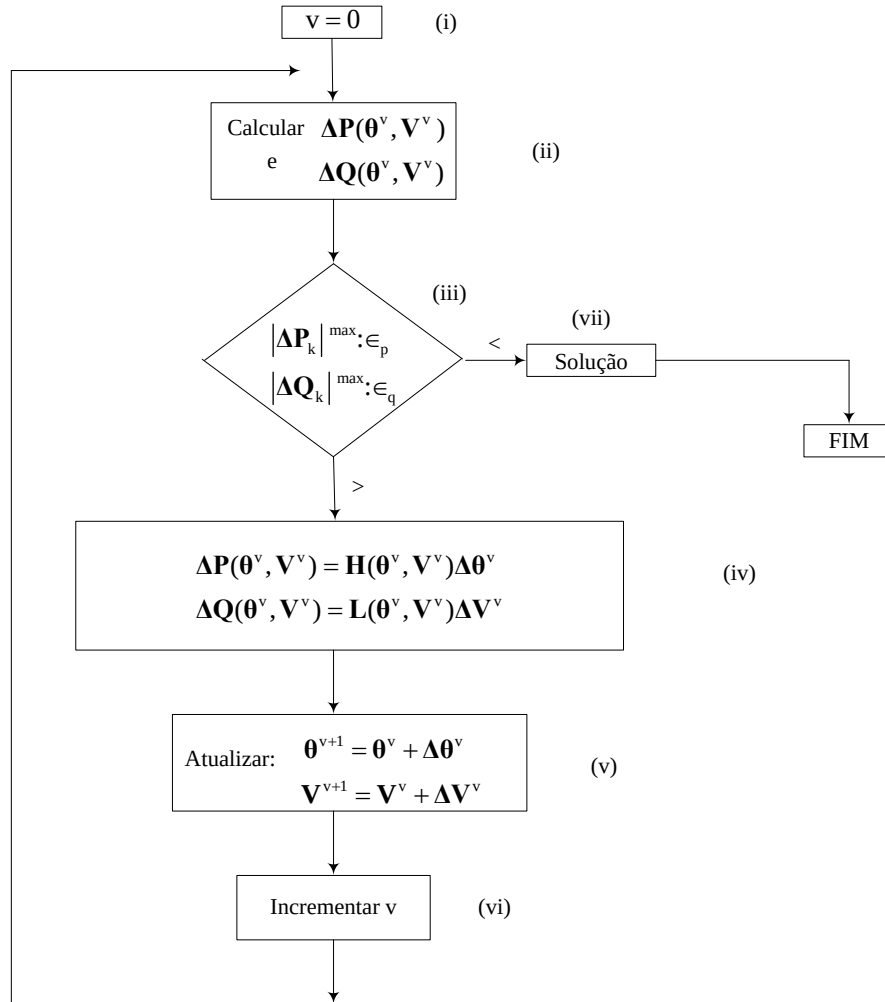
Como no método Desacoplado as submatrizes $\mathbf{N}$ e $\mathbf{M}$ são ignoradas, tem-se que as equações na forma de resolução simultânea são dadas por:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}^v, |\mathbf{V}|^v) = \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}^v, |\mathbf{V}|^v) \Delta \boldsymbol{\theta}^v \\ \Delta \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}^v, |\mathbf{V}|^v) = \mathbf{L}(\boldsymbol{\theta}^v, |\mathbf{V}|^v) \Delta |\mathbf{V}|^v \end{cases} \quad (85)$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\theta}^{v+1} = \boldsymbol{\theta}^v + \Delta \boldsymbol{\theta}^v \\ |\mathbf{V}|^{v+1} = |\mathbf{V}|^v + \Delta |\mathbf{V}|^v \end{cases} \quad (86)$$

Neste método de resolução simultânea θ e V são atualizados simultaneamente e, os *mismatches* de potência ativa e reativa são calculados baseados nos valores do estado da iteração anterior. Abaixo tem-se o fluxograma do algoritmo.

Figura 15: Algoritmo método Desacoplado resolução simultânea



Fonte: Elaboração da própria autora

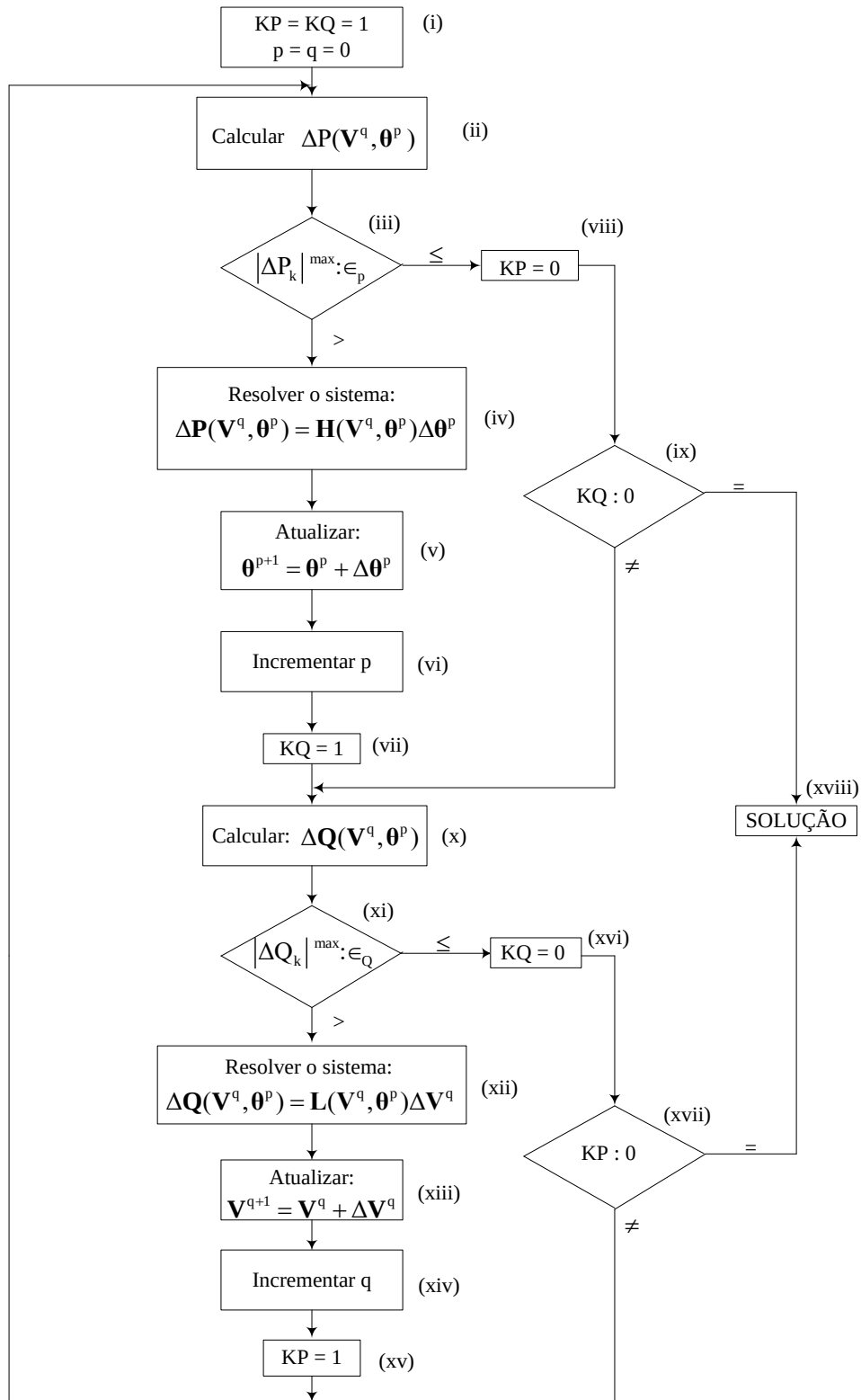
3.3.1.2 Método Desacoplado: Algoritmo Alternado

Para melhorar o desempenho por meio da característica de convergência do método utiliza-se a resolução alternada, no qual as equações são dadas na seguinte forma:

$$\begin{cases} \Delta P(\theta^v, |V|^v) = H(\theta^v, |V|^v) \Delta \theta^v \\ \theta^{v+1} = \theta^v + \Delta \theta^v \end{cases} \quad (87)$$

$$\begin{cases} \Delta Q(\theta^{v+1}, |V|^v) = L(\theta^{v+1}, |V|^v) \Delta |V|^v \\ |V|^{v+1} = |V|^v + \Delta |V|^v \end{cases} \quad (88)$$

Figura 16: Algoritmo método Desacoplado resolução alternada



Fonte: Elaboração da própria autora

No sistema (87) constitui-se meia-iteração ativa, através da qual é feita a atualização dos ângulos de fase das tensões, relacionados aos resíduos de potência ativa. O sistema (82) é a meia-iteração reativa, na qual é feita a atualização das magnitudes das tensões, relacionadas

aos resíduos de potência reativa. Na resolução alternada, tem-se, uma atualização de variáveis de estado a cada meia-iteração.

3.3.2 Desacoplado Rápido: Formulação via Injeção de Potência – Método FPIPDR

O método desacoplado rápido tem o mesmo algoritmo básico que o método desacoplado representando na Figura 16. A principal diferença entre eles é que no método desacoplado rápido são utilizadas as seguintes equações:

$$\begin{cases} \frac{\Delta \mathbf{P}}{\mathbf{V}} = \mathbf{B}' \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \frac{\Delta \mathbf{Q}}{\mathbf{V}} = \mathbf{B}'' \Delta \mathbf{V} \end{cases} \quad (89)$$

nas quais aparecem as matrizes constantes $\mathbf{B}'$ e $\mathbf{B}''$, respectivamente:

$$\begin{cases} B'_{kk} = -B_{kk} \\ B'_{km} = -B_{km} \\ B'_{mk} = -B_{mk} \end{cases} \quad (90)$$

$$\begin{cases} B''_{kk} = -B_{kk} \\ B''_{km} = -B_{km} \\ B''_{mk} = -B_{mk} \end{cases} \quad (91)$$

Essas matrizes não dependem das variáveis de estado do sistema (magnitudes e ângulos das tensões nodais) mas sim dos parâmetros da rede (impedâncias e susceptâncias dos ramos e elementos shunt). Essas matrizes são constantes ao longo do processo iterativo, caracterizando uma redução no esforço computacional e a quantidade de memória utilizada para calcular e inverter as matrizes $\mathbf{H}$ e $\mathbf{L}$ a cada iteração (MONTICELLI, 1983).

De acordo com as equações (89) as equações do método passam a ser dadas por:

$$\begin{cases} \Delta \boldsymbol{\theta} = (\mathbf{B}')^{-1} * \frac{\Delta \mathbf{P}}{\mathbf{V}} \\ \Delta \mathbf{V} = (\mathbf{B}'')^{-1} * \frac{\Delta \mathbf{Q}}{\mathbf{V}} \end{cases} \quad (92)$$

As equações acima passam a substituir os passos (iv) e (xii) da Figura 16. Já as matrizes constantes $\mathbf{B}'$ e $\mathbf{B}''$ e suas inversas são calculadas uma única vez logo no passo 1 durante todo o processo iterativo.

3.3.2.1 Desacoplado Rápido: Versão XB

De acordo com Stott (1974) para melhorar as características de convergência do método, nas formulações das matrizes $\mathbf{B}'$ e $\mathbf{B}''$ deve-se: omitir em $\mathbf{B}'$ os elementos predominantemente relacionados ao fluxo de potência reativa (elementos *shunt* e transformadores em fase com tap fora do nominal); omitir em $\mathbf{B}''$ os elementos predominantemente relacionados ao fluxo de potência ativa (como os transformadores); desprezar as resistências série dos ramos na formação de $\mathbf{B}'$. Realizando essas mudanças, obtém-se o método XB, no qual $\mathbf{B}'$ e $\mathbf{B}''$ são reais, esparsas e com estruturas semelhantes às matrizes $\mathbf{H}$ e $\mathbf{L}$, respectivamente. Assim tem-se que:

$$\begin{cases} B'_{kk} = \sum_{m \in \Omega_k} \frac{1}{x_{km}} \\ B'_{km} = -\frac{1}{x_{km}} \\ B'_{mk} = -\frac{1}{x_{km}} \end{cases} \quad (93)$$

$$\begin{cases} B''_{kk} = -B_{kk} \\ B''_{km} = -B_{km} \\ B''_{mk} = -B_{km} \end{cases} \quad (94)$$

3.3.2.2 Desacoplado Rápido: Versão BX

Uma nova proposta é apresentada por Amerongen (1989) para a construção das matrizes $\mathbf{B}'$ e $\mathbf{B}''$, que sugere que as resistências dos ramos sejam desprezadas na Matriz $\mathbf{B}''$ e não mais na matriz $\mathbf{B}'$. De acordo com a proposta tem-se:

$$\begin{cases} B'_{kk} = -\sum_{m \in \Omega_k} b_{km} \\ B'_{km} = b_{km} \\ B'_{mk} = b_{km} \end{cases} \quad (95)$$

$$\begin{cases} B_{kk}'' = \sum_{m \in \Omega_k} \frac{1}{x_{km}} - 2 \left(b_k^{sh} + \sum_{m \in \Omega_k} b_{km}^{sh} \right) \\ B_{km}'' = -\frac{1}{x_{km}} \\ B_{mk}'' = -\frac{1}{x_{km}} \end{cases} \quad (96)$$

Neste método o número de iterações, é bastante próximo daquele para o método XB. As vantagens da versão BX ficam evidentes para redes com relações R/X (resistência/reatância) mais altas. Em geral, o número de iterações necessárias para a convergência do problema utilizando a versão XB é levemente superior ao do método BX. Outro dado importante discutido na literatura é a versão BX ser mais robusta, convergindo em casos que a versão XB diverge ou apresenta comportamento cíclico.

3.3.3 Desacoplado Rápido: Formulação via Injeção de Corrente – Método FPICDR

Simplificações introduzidas na matriz Jacobiana por Stott e Alsac (1974) levaram à versão XB do método Fluxo de Potência Desacoplado Rápido (FPDR). Em Van (1989) a versão BX para Fluxo de Potência via Injeção de Potência Desacoplado Rápido (FPIPDR-BX) foi implementada e testada. A diferença básica entre as versões são os elementos das matrizes **B'** e **B''** (MONTICELLI, 1990).

A metodologia proposta para o Fluxo de Potência via Injeção de Corrente Desacoplado Rápido (versão BX), denominada FPICDR, é obtida considerando o estado *flat-start* ($|V_k| = |V_i| = 1,0$ p.u. e $\theta_k = \theta_i = 0$) e P_k^{sp} e Q_k^{sp} iguais às suas respectivas potências ativa (97) e reativa (98).

$$P_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) = G_{kk}|V_k|^2 + |V_k| \sum_{i \in \Omega_k} |Y_{ki}| |V_i| \cos(\varphi_{ki} - \theta_{ki}) \quad (97)$$

$$Q_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) = -B_{kk}|V_k|^2 - |V_k| \sum_{i \in \Omega_k} |Y_{ki}| |V_i| \sin(\varphi_{ki} - \theta_{ki}) \quad (98)$$

Aplicando essas considerações às equações (60) a (63), os elementos das submatrizes **J**₁, **J**₂, **J**₃ e **J**₄ são:

Submatriz **J**₁ para as barras PQ e PV:

$$\mathbf{J}_1 \left\{ \begin{array}{l} J_1(k, i) = -B_{ki} \quad \text{para } k \neq i \\ J_1(k, k) = -B_{kk} - Q_k^{sp} = -B_{kk} - \left(-B_{kk} - \sum_{i \in \Omega_k} B_{ki} \right) = \sum_{i \in \Omega_k} B_{ki} \end{array} \right\} \quad (99)$$

Submatrizes $\mathbf{J}_2$ para as barras PQ:

$$\mathbf{J}_2 \left\{ \begin{array}{l} J_2(k, i) = G_{ki} \quad \text{para } k \neq i \\ J_2(k, k) = G_{kk} + P_k^{sp} = G_{kk} + (G_{kk} + \sum_{i \in \Omega_k} G_{ki}) = G_{kk} \end{array} \right\} \quad (100)$$

Para as barras PV:

$$J_2(k, i) = G_{ki} \quad \text{para } k \neq i \quad (101)$$

Submatrizes $\mathbf{J}_3$ para as barras PQ:

$$\mathbf{J}_3 \left\{ \begin{array}{l} J_3(k, i) = G_{ki} \quad \text{para } k \neq i \\ J_3(k, k) = G_{kk} - P_k^{sp} = G_{kk} - (G_{kk} + \sum_{i \in \Omega_k} G_{ki}) = - \sum_{i \in \Omega_k} G_{ki} = G_{kk} \end{array} \right\} \quad (102)$$

Submatrizes $\mathbf{J}_4$ para as barras PQ:

$$\mathbf{J}_4 \left\{ \begin{array}{l} J_4(k, i) = B_{ki} \quad \text{para } k \neq i \\ J_4(k, k) = B_{kk} - Q_k^{sp} = 2B_{kk} + \sum_{i \in \Omega_k} B_{ki} = - \sum_{i \in \Omega_k} B_{ki} + 2(b_k^{sh} + \sum_{i \in \Omega_k} b_{ki}^{sh}) \end{array} \right\} \quad (103)$$

onde G_{ki} , G_{kk} , B_{ki} e B_{kk} são as partes reais e imaginárias da matriz de admitância nodal $\mathbf{Y}$, Ω_k é o conjunto de barras diretamente conectados a barra k , b_{ki}^{sh} é a susceptância *shunt* da linha de transmissão entre as barras $k-i$, e b_k^{sh} é o *shunt* de barra (p. ex: banco de reatores e de capacitores). A versão BX proposta do método FPICDR é dada por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{c} \Delta \mathbf{G}_{pq} \\ (\Delta \mathbf{P}_{pv}) \\ \frac{1}{|\mathbf{V}_{pv}|} \end{array} \right] = \mathbf{B}' \left[\begin{array}{c} \Delta \theta_{pq} \\ \Delta \theta_{pv} \end{array} \right] \\ [\Delta \mathbf{H}_{pq}] = \mathbf{B}'' [\Delta |\mathbf{V}_{pq}|] \end{array} \right\} \quad (104)$$

sendo os elementos de fora da diagonal e da diagonal da matriz $\mathbf{B}'$ dados por:

$$\left\{ \begin{array}{l} B'(k, i) = -B_{ki} \quad \text{para } k \neq i \\ B''(k, k) = \sum_{i \in \Omega_k} B_{ki} \end{array} \right\} \quad (105)$$

Para sistemas radiais e sistemas em malha com razão R/X constante, os elementos da matriz $\mathbf{B}'' = \mathbf{J}_4 - \mathbf{J}_3 (\mathbf{J}_1)^{-1} \mathbf{J}_2$, considerados da condição *flat-start*, são dados por:

$$\left. \begin{aligned} B''(k, i) &= x_{ki}^{-1} && \text{para } k \neq i \\ B''(k, k) &= - \sum_{i \in \Omega_k} x_{ki}^{-1} + 2(b_k^{sh} + \sum_{i \in \Omega_k} b_{ki}^{sh}) \end{aligned} \right\} \quad (106)$$

Observe em (105) que os elementos *shunt* não aparecem nas derivações dos elementos da diagonal de $\mathbf{B}'$, enquanto que na diagonal de $\mathbf{B}''$ eles aparecem naturalmente com as derivações.

3.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS MÉTODOS

Com o intuito de comparar os desempenhos para todos os métodos, foi adotado como critério de convergência, o máximo valor absoluto do vetor de resíduos de 10^{-4} p.u. como mostra a equação abaixo:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (107)$$

no qual, tem-se que:

$$\|\mathbf{R}\|_{\infty} = \max\{|R_i|\} \quad (108)$$

A adoção de um mesmo critério de convergência visa uma comparação mais justa dos desempenhos dos métodos, posto que os resíduos referentes ao balanço de injeção de corrente diferem dos de balanço de injeção de potência.

Para realizar os testes nos sistemas do IEEE de 14, 30, 57, 118 e 300 barras, partiram-se do banco de dados (BD). O tratamento dos limites de potência reativa (Q) nas barras de tensão controlada segue o procedimento descrito em Monticelli (1983). Em cada iteração a geração de reativo de cada barra PV é comparada com seus respectivos limites. No caso de violação, a barra PV é alterada para tipo PQ. Estas barras podem voltar a ser PV nas iterações futuras. A fim de destacar as semelhanças de convergência entre os métodos de fluxo de potência desacoplado rápido, um número maior de meias iterações P θ e QV foi permitido nas simulações. Já para os métodos de N-R, foi adotado um máximo de 20 iterações completas. Para as versões desacopladas, foi utilizado o esquema de iteração padrão, conforme Stott e Alsac (1974). Além disso, todos os testes com o FPICDR-BX foram conduzidos usando *mismatches* normalizados ($\Delta P/V$ e $\Delta Q/V$) (MONTICELLI, 1990).

A avaliação de desempenho é realizada considerando diferentes relações R/X dos ramos. Como apresenta Monticelli (1990), variaram-se os valores dos parâmetros R e X de todos os ramos de acordo com os multiplicadores apresentados nas primeiras colunas das tabelas.

Os estados convergidos apresentados nas figuras são referentes a relação $(1,0 \cdot R/1,0 \cdot X)$, no qual os multiplicadores da relação R/X são iguais a um. O resíduo total de potência, definido como sendo a soma dos valores absolutos dos resíduos de potência ativa e reativa, foi usado como critério de convergência para os quatro métodos. O desempenho dos métodos foi realizado no software MATLAB (do inglês *Matrix Laboratory*).

3.4.1 Análise de desempenho dos sistemas

Nesta seção, apresentam-se os resultados obtidos por meio dos testes realizados para os seguintes métodos:

- Fluxo de Potência via Injeção de Potência: Método **FPIP**;
- Fluxo de Potência via Injeção de Corrente Modificado: Método **FPICM**;
- Fluxo de Potência via Injeção de Corrente Híbrido: Método **FPICH**;
- Fluxo de Potência via Injeção de Potência Desacoplado Rápido: Método **FPIPDR**;
- Fluxo de Potência via Injeção de Corrente Desacoplado Rápido: Método **FPICDR**.

Para realizar os testes foram utilizados vários carregamentos (λ), assim como diferentes relações R/X dos ramos. Destaca-se que todos os métodos desacoplados aqui estudados, foram implementados na versão BX.

Nas Tabelas de 2 a 8 tem-se o desempenho dos cinco métodos numéricos analisados para diferentes condições de carregamento. As escolhas dos valores de carregamento (λ) que constam nas primeiras colunas das tabelas foram realizadas a partir do conhecimento do valor máximo de carregamento ($\lambda_{\text{máx}}$) dos sistemas apresentados. O fator de carregamento (λ) é utilizado para simular incrementos de carga ativa e reativa, considerando fator de potência constante. Cada incremento de carga vem acompanhado de um aumento na geração equivalente (AJJARAPU, 2010). As respectivas curvas P-V das barras críticas que aparecem nesse capítulo foram previamente obtidas utilizando um método de FPC que serão apresentados no capítulo 4 desta Tese. Estes métodos possibilitam a obtenção de toda a curva P-V, incluindo o próprio ponto de máximo carregamento, o que já não ocorre com os métodos de FP em geral, devido à singularidade da matriz Jacobiana das equações do FP nesse ponto.

Observa-se que os três métodos de N-R tiveram para todos os sistemas, exatamente o mesmo desempenho. Já os métodos desacoplados rápidos, apresentaram algumas diferenças no desempenho. Para os sistemas IEEE-14, 30 e 57 barras, o método desacoplado rápido convencional (FPIPDR) e o desacoplado rápido proposto (FPICDR) apresentaram um resultado muito próximo. Entretanto, para o sistema IEEE-118 barras Tabela (5), o método proposto FPICDR, apresentou um desempenho superior ao método convencional, para condições de carregamento igual ou acima de $\lambda = 1,86$. Ambos divergem a partir de $\lambda = 1,9$. Observa-se que para o sistema 638 barras, o método FPICDR não convergiu para nenhuma condição de carregamento. Como já era esperado há um aumento no número de iterações à medida que o carregamento se aproxima do máximo carregamento. A última linha das tabelas corresponde a uma condição ligeiramente maior que a máxima possível. Assim, para essa condição, como esperado, todos os métodos Não Convergem (NC) ou divergem.

Observa-se que todos os métodos de N-R apresentaram um bom desempenho e que também foi possível obter soluções para condições de carregamento até muito próximas do PMC. Já no caso dos desacoplados, estes apresentaram um número relativamente maior de iterações que os de N-R para valores próximos do PMC. Esse comportamento também já era esperado visto que esses métodos apresentam problemas de mau condicionamento nas proximidades do PMC (ALVES, 2003).

Tabela 2: Desempenho dos métodos para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-14 barras

λ (p.u.)	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter0 - iterV	FPICDR BX Iter0 - iterV
1,0	3	3	3	7-6	7-6
1,4	5	5	5	9-8	9-8
1,7	6	6	6	15-14	17-14
1,75	6	6	6	20-19	21-20
1,767	7	7	7	23-22	25-24
1,78	NC	NC	NC	NC	NC

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 3: Desempenho dos métodos para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-30 barras

λ (p.u.)	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter0 - iterV	FPICDR BX Iter0 - iterV
1,0	4	4	4	7-7	8-7
1,4	6	6	6	12-11	14-13
1,5	9	9	9	20-19	22-21
1,53	10	10	10	38-37	42-40
1,533	10	10	10	58-57	62-60
1,54	NC	NC	NC	NC	NC

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 4: Desempenho dos métodos para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-57 barras

λ (p.u.)	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter0 - iterV	FPICDR BX Iter0 - iterV
1,0	4	4	4	8-8	8-8
1,4	5	5	5	10-9	11-11
1,5	5	5	5	12-11	13-13
1,58	6	6	6	21-20	23-22
1,596	7	7	7	41-40	44-43
1,6	NC	NC	NC	NC	NC

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 5: Desempenho dos métodos para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-118 barras

λ (p.u.)	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter0 - iterV	FPICDR BX Iter0 - iterV
1,0	4	4	4	8-8	9-8
1,4	5	5	5	9-9	9-9
1,7	6	6	6	12-12	13-13
1,86	8	8	8	51-50	41-40
1,865	8	8	8	82-81	49-48
1,9	NC	NC	NC	NC	NC

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 6: Desempenho dos métodos para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-300 barras

λ (p.u.)	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter0 - iterV	FPICDR BX Iter0 - iterV
1,0	4	4	4	13-12	13-12
1,02	4	4	4	16-15	15-14
1,04	5	5	5	24-23	22-21
1,05	5	5	5	36-35	32-32
1,055	7	7	7	80-80	74-73
1,056	NC	NC	NC	NC	NC

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 7: Desempenho dos métodos para diferentes condições de carregamentos - Sistema 638 barras

λ (p.u.)	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter0 - iterV	FPICDR BX Iter0 - iterV
1,0	5	5	5	32-31	NC
1,002	5	5	5	32-31	NC
1,005	5	5	5	43-42	NC
1,008	6	6	6	81-80	NC
1,0087	7	7	7	ND e NC	NC
1,0088	NC	NC	NC	NC	NC

NC: Não Converte - ND: Não Diverge - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 8: Desempenho dos métodos para diferentes condições de carregamentos - Sistema 787 barras

λ (p.u.)	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter0 - iterV	FPICDR BX Iter0 - iterV
1,000	3	3	3	8-8	10-9
1,080	4	4	4	14-15	15-15
1,100	5	5	5	18-19	18-18
1,120	4	4	4	26-26	26-26
1,127	6	6	6	95-94	92-93
1,1274	NC	NC	NC	NC	NC

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Nas Tabelas 9 a 15, compara-se o desempenho dos cinco métodos para os sistemas, considerando as respectivas relações de R/X. As escolhas dos valores dos multiplicadores de R que constam nas primeiras colunas das tabelas foram realizadas a partir do conhecimento do valor máximo de carregamento ($\lambda_{\max}$) dos sistemas apresentados, na condição de relação R/X em questão. Como se pode observar na última coluna das tabelas, à medida que se incrementa a relação R/X, o valor do PMC reduz, sendo que a última linha de cada uma das tabelas corresponde a uma condição de não solução uma vez que $\lambda_{\max}$ da respectiva relação apresenta um valor menor do que o valor considerado nas simulações como sendo o caso base ($\lambda = 1$). Também, as respectivas curvas P-V das barras críticas que aparecem nesse capítulo foram previamente obtidas utilizando um dos métodos de FPC que serão apresentados no Capítulo 4 desta Tese.

Analisando as informações, verifica-se que o número de iterações necessário para a convergência do problema é bem próximo para os métodos de N-R, mostrando assim o bom desempenho do método proposto (FPICH). Por outro lado, o método FPICDR teve um desempenho similar ao do FPIPDR para várias relações R/X, porém apresentou um desempenho inferior em alguns casos isolados para os sistemas do IEEE, em especial, nos sistemas de grande porte de 638 e 787 barras.

Tabela 9: Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-14 barras

Relação R/X	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter θ - iterV	FPICDR BX Iter θ - iterV	$\lambda_{\max}$ (p.u.)
1,0×R/0,5×X	4	4	4	8-7	10-9	2,6714
1,0×R/1,0×X	3	3	3	7-6	7-6	1,7940
2,0×R/1,0×X	4	4	4	9-8	9-8	1,4917
3,0×R/1,0×X	5	5	5	10-10	29-28	1,2485
4,0×R/1,0×X	6	6	6	12-14	48-47	1,0556
4,5×R/1,0×X	NC	NC	NC	NC	NC	0,9760

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 10: Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-30 barras

Relação R/X	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter θ - iterV	FPICDR BX Iter θ - iterV	$\lambda_{\max}$ (p.u.)
1,0×R/0,5×X	6	6	6	9-9	12-11	2,2349
1,0×R/1,0×X	4	4	4	7-7	8-7	1,5335
2,0×R/1,0×X	5	5	5	10-9	13-12	1,2805
3,0×R/1,0×X	6	6	6	15-14	19-18	1,0758
3,5×R/1,0×X	NC	NC	NC	NC	NC	0,9898

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 11: Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-57 barras

Relação R/X	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter θ - iterV	FPICDR BX Iter θ - iterV	$\lambda_{\max}$ (p.u.)
1,0×R/0,5×X	3	3	4	11-10	13-12	2,2296
1,0×R/1,0×X	4	4	4	8-8	8-8	1,5972
2,0×R/1,0×X	5	5	5	10-10	17-16	1,3444
3,0×R/1,0×X	8	8	7	13-21	44-44	1,1104
3,5×R/1,0×X	8	8	9	17-29	NC	1,0166
4,0×R/1,0×X	NC	NC	NC	NC	NC	0,9339

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 12: Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-118 barras

Relação R/X	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter θ - iterV	FPICDR BX Iter θ - iterV	$\lambda_{\max}$ (p.u.)
1,0×R/0,5×X	5	5	5	11-10	10-10	2,5868
1,0×R/1,0×X	4	4	4	8-8	9-8	1,8664
2,0×R/1,0×X	5	5	5	10-9	10-10	1,6228
3,0×R/1,0×X	5	5	6	10-10	13-13	1,2371
3,5×R/1,0×X	5	5	6	17-16	21-20	1,0601
4,0×R/1,0×X	NC	NC	NC	NC	NC	0,9154

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 13: Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-300 barras

Relação R/X	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter θ - iterV	FPICDR BX Iter θ - iterV	$\lambda_{\max}$ (p.u.)
1,0×R/0,5×X	5	6	4	7-7	16-18	1,4303
1,0×R/1,0×X	4	4	4	13-12	12-12	1,0553
1,2×R/1,0×X	5	5	4	17-16	15-15	1,0292
1,4×R/1,0×X	6	5	5	28-27	25-25	1,0086
1,47×R/1,0×X	7	7	6	79-77	70-69	1,0002
1,473×R/1,0×X	NC	NC	NC	NC	NC	0,9998

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 14: Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema 638 barras

Relação R/X	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter θ - iterV	FPICDR BX Iter θ - iterV	$\lambda_{\max}$ (p.u.)
1,0×R/0,5×X	5	5	5	17-45 14-20 (8)	22-31 21-24(12)	1,5692
1,0×R/1,0×X	5	5	5	32-31	NC	1,0087
1,08×R/1,0×X	6	6	6	61-60	NC	1,0016
1,095×R/1,0×X	6	6	6	110-109	NC	1,0003
1,098×R/1,0×X	8	8	8	NC	ND e NC	1,0000
1,1×R/1,0×X	NC	NC	NC	NC	NC	0,9998

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

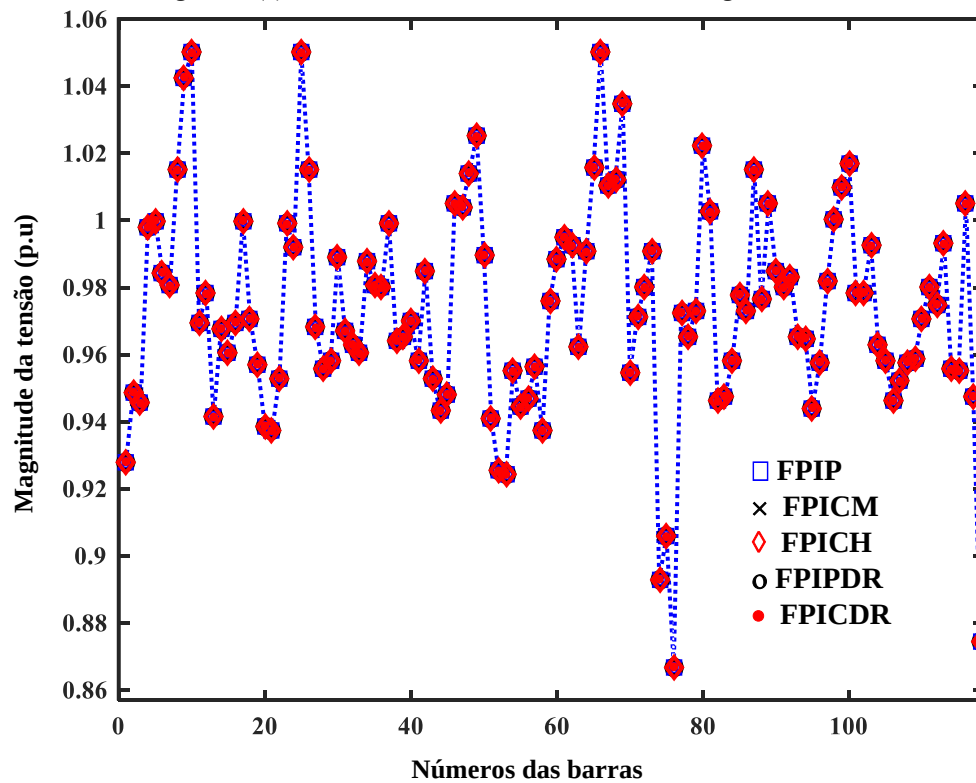
Tabela 15: Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema 787 barras

Relação R/X	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter θ - iterV	FPICDR BX Iter θ - iterV	$\lambda_{\max}$ (p.u.)
1,0×R/0,5×X	4	4	4	15-17	16-17	1,7863
1,0×R/1,0×X	3	3	3	8-8	10-9	1,1272
2,0×R/1,0×X	4	4	4	14-17	38-34	1,0596
2,4×R/1,0×X	5	5	5	35-34	NC	1,0113
2,45×R/1,0×X	6	6	6	51-51	NC	1,0047
2,48×R/1,0×X	7	7	7	80-80	NC	1,0008
2,486×R/1,0×X	NC	NC	NC	NC	NC	0,99996

NC: Não Converge - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Com o objetivo de ilustrar que os estados obtidos pelos métodos ao final do processo iterativo são os mesmos, nas Figuras 17(a) e 17(b) são apresentados os estados convergidos (θ , $|V|$) obtidos para a condição 3,0×R/1,0×X do sistema de 118 barras. Na Figura 17(c) têm-se as trajetórias dos *mismatches* totais para os cinco métodos. Comparando a evolução dos *mismatch* dos métodos propostos com a de seus respectivos métodos padrão, pode-se verificar que os propostos apresentam boas características de convergência.

Figura 17(a): Sistema IEEE-118 barras - Perfil de magnitude da tensão



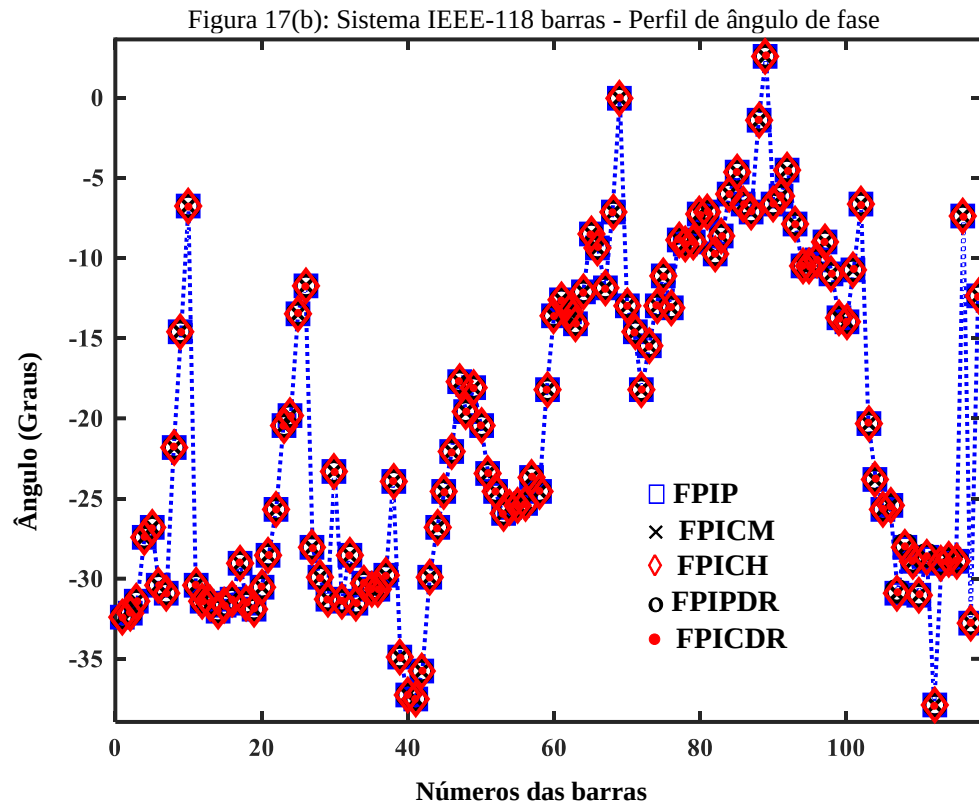
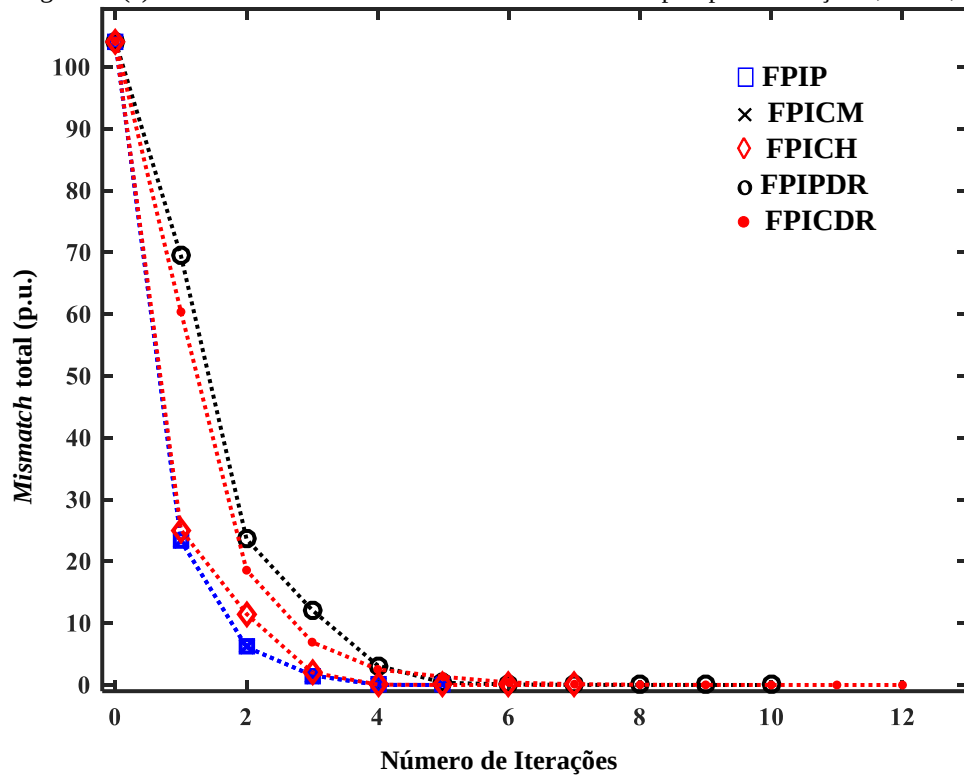


Figura 17(c): Sistema IEEE-118 barras - *Mismatch* total em p.u. para a relação $3,0 \times R/1,0 \times X$



Fonte: Dados da pesquisa da própria autora

3.4.2 Desacoplado Rápido: Uma proposta de melhoria para o Método FPICDRM

Analisando o desempenho dos métodos (Tabelas 14 e 15) para diferentes relações R/X , nota-se que o método convencional (FPIPDR) mostrou-se mais vantajoso do que o método proposto (FPICDR). Para abordar a ideia da nova proposta, será considerado o sistema real de grande porte com 787 barras e 1395 ramais.

Os efeitos do incremento no fator de carregamento do sistema 787 barras são mostrados na Tabela 8. Para este sistema, o PMC é um pouco maior que 1,1272 p.u.. A Figura 18(a) mostra as magnitudes de tensão convergida da barra crítica (576) plotadas na curva P-V, para cada condição de carregamento apresentada na primeira coluna da Tabela 8. Os resultados confirmam que o estado convergente obtido por cada método é o mesmo. A Figura 18(b) mostra as trajetórias do *mismatch* total de potência para $\lambda = 1,12$ p.u. e $1,0 \times R/1,0 \times X$. Observe que os métodos de N-R, incluindo o método proposto FPICH, precisam de apenas quatro iterações para obter a solução, enquanto os métodos desacoplados requerem 26 iterações P θ e QV para convergência. A Figura 18(c) mostra as trajetórias do *mismatch* total de potência para $\lambda = 1,127$ p.u. e $1,0 \times R/1,0 \times X$, ou seja, para um pequeno incremento de 0,007 p.u. em relação ao anterior.

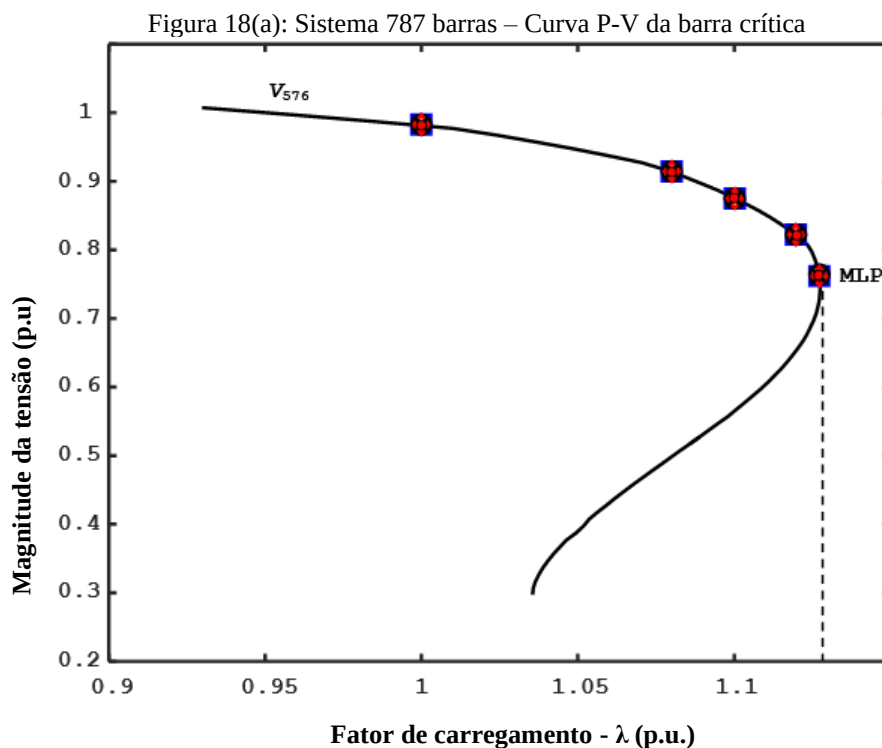


Figura 18(b): Sistema 787 barras - *Mismatch* total em p.u. para a relação $1,0 \times R/1,0 \times X$ e $\lambda = 1,12$ p.u

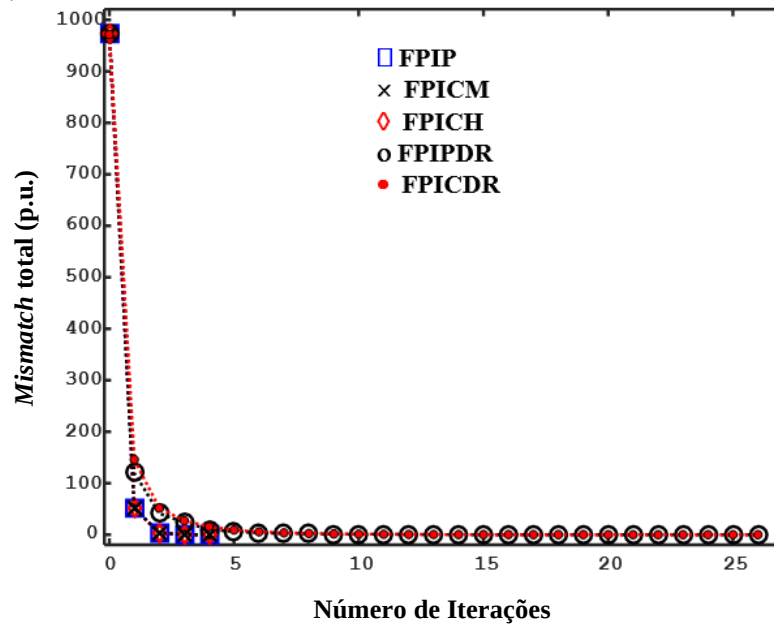
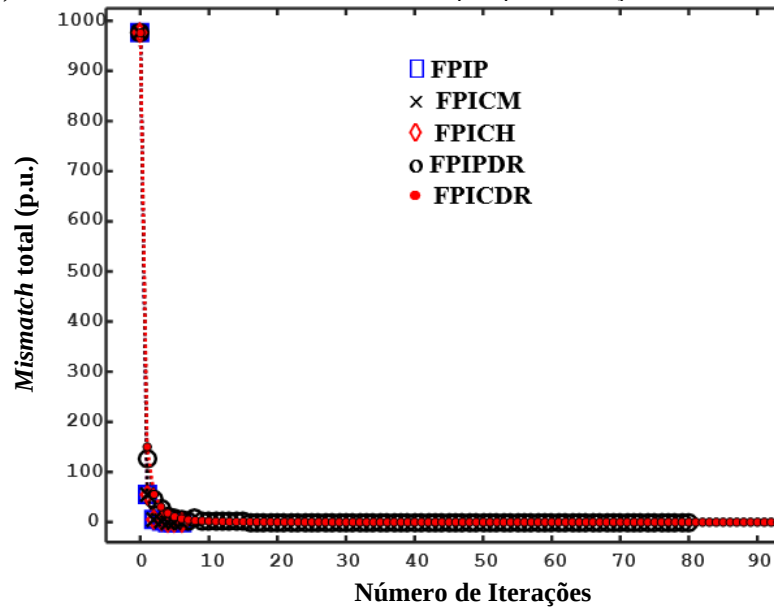


Figura 18(c): Sistema 787 barras - *Mismatch* total em p.u. para a relação $1,0 \times R/1,0 \times X$ e $\lambda = 1,127$ p.u



Fonte: Dados da pesquisa da própria autora

A partir da análise das evoluções do *mismatch* total de potência apresentada na Figura 18(b), pode-se ver que, assim como os métodos de N-R, os métodos desacoplados também se aproximam rapidamente da solução com menos de cinco iterações, mas depois, gastam a maior parte do total de iterações para obter a solução com a precisão desejada. Da Figura 18(c), constata-se que isso também acontece para o fator de carregamento de 1,127 p.u., mas à custa de um aumento considerável no número de iterações por estar mais próximo do PMC. Os efeitos do incremento na relação R/X , do sistema 787 barras, são mostrados na Tabela 15, onde se observa que à medida que a relação R/X aumenta, o FPICH apresenta o mesmo

desempenho dos outros métodos de N-R, enquanto que os métodos desacoplados convergem mais lentamente, sendo o FPICDR o mais afetado, não convergindo para o multiplicador R igual ou superior a 2,4. Uma das razões que afetam a convergência, conforme já comentado anteriormente, é o fato do valor do PMC reduzir à medida que se incrementa a relação R/X, o que se pode confirmar na última coluna da tabela. Outra razão para a não convergência do método de injeção de corrente proposto (FPICDR) está relacionada à dependência de suas equações (conjunto de equações (77)) para com o ângulo de fase da tensão nodal (θ_k para uma barra k qualquer), ao invés da diferença angular entre as tensões nodais do ramo $k-i$ (θ_{ki}), como é o caso das equações do método de injeção de potência.

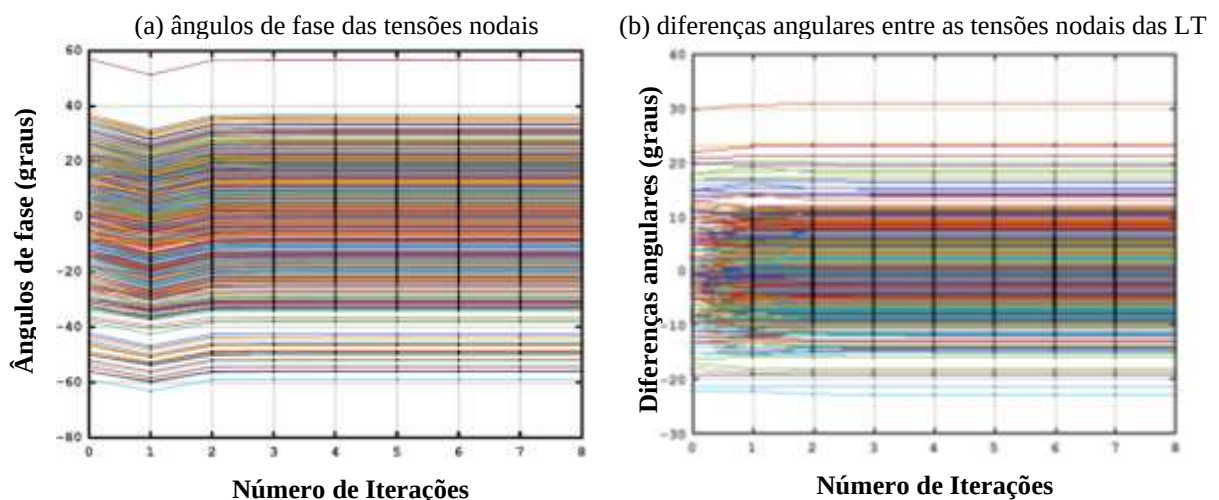
As Figuras 19(a) e 19(b) apresentam para o caso base ($\lambda = 1,0$ p.u. e $1,0 \times R/1,0 \times X$) os ângulos de fase das tensões nodais e as diferenças angulares entre as tensões nodais das LT, respectivamente. Observe que neste caso, conforme consta na tabela 15, os métodos apresentaram um número baixo de meia-iterações, 8-8 para o FPIPDR e 10-9 para o FPICDR. O mesmo já não acontece para $\lambda = 1,0$ p.u. e $2,4 \times R/1,0 \times X$, para o qual o FPIPDR apresentou um número maior de meia-iterações (35-34), enquanto que o FPICDR não convergiu. As Figuras 20(a) e 20(b) apresentam os respectivos ângulos de fase das tensões nodais e das diferenças angulares entre as tensões nodais das LT, para $\lambda = 1,0$ p.u. e $2,4 \times R/1,0 \times X$. Comparando esses valores com os respectivos valores do caso base apresentados nas Figuras 19(a) e 19 (b), verifica-se uma sensível mudança nos valores dos ângulos de fase das tensões nodais e uma pequena alteração nos valores das diferenças angulares entre as tensões nodais das LT. Assim, resumidamente, a partir das análises das Figuras 19(a) e 20(a) e da última coluna da Tabela 15, pode-se observar que à medida que a relação R/X aumenta, maiores serão os ângulos de fase da tensão da barra e menor o correspondente PMC. Como consequência, o sistema é levado a um estado no qual as condições para convergência dos fluxos de potência desacoplados rápidos podem não ser satisfeitas, resultando em uma convergência lenta.

Diversos trabalhos foram propostos para melhorar a convergência do fluxo de potência desacoplado rápido convencional nos casos em que as relações R/X assumem valores mais elevados, prejudicando sensivelmente o desempenho do método. As técnicas denominadas rotação de eixos foram propostas a fim de tornar as relações R/X menores de forma que as características da rede fiquem mais próximas daquelas adotadas quando da dedução do FCDRIP. Na técnica proposta em Garcia et al. (1984), o valor do ângulo (ϕ) é arbitrado e aplicado a toda rede. Já na técnica desenvolvida em Medeiros e Lucas (2002) o ângulo de

rotação não mais é arbitrado, mas sim ajustado de forma a atender à hipótese do desacoplamento minimizando os acoplamentos entre P e V e entre Q e θ . A estratégia proposta apresentada em Tortelli et al. (2015) baseia-se na evidência de que, quanto menor a relação R/X , melhor o desempenho dos métodos de FP desacoplado baseados em injeção de potência (já que mais forte é o desacoplamento P - θ e Q - V). Também é apresentado o conceito de normalização complexa por unidade como uma generalização do procedimento convencional, por meio da adoção de uma base de potência complexa. A influência da relação R/X e do fator de potência da carga no ângulo de base (ϕ_{base}) da potência é discutida e incorporada na determinação do ângulo base. Essa estratégia foi aplicada apenas para resolver a análise de FP de sistemas de distribuição, enquanto que a abordagem inovadora apresentada em Portelinha et al. (2019) permite a representação e análise completa de alimentadores de distribuição e transmissão. Para melhorar a convergência do FP desacoplado rápido convencional, Singh, Raju e Rao (1991) propõe um critério para selecionar uma nova barra de folga a fim de resultar numa menor diferença angular entre as tensões nodais das LT's.

A estratégia proposta neste trabalho para melhorar o desempenho do FCICDR é baseada na análise que segue. Das Figuras 19(a) e 20(a), observa-se que o FPICDR apresenta um melhor desempenho quando os ângulos permanecem em uma faixa mais restrita ($\pm 60^\circ$) e há uma simetria em relação ao eixo das abscissas. Além disso, as análises de evoluções do *mismatch* total mostraram que, em geral, o método desacoplado proposto gasta de cinco a dez iterações para atender ao critério de convergência adotado.

Figura 19: Sistema 787 barras – Ângulos de fase e diferenças angulares das tensões nodais para o caso base ($\lambda = 1,0$ p.u. e $1,0 \times R/1,0 \times X$):



Fonte: Dados da pesquisa da própria autora

Figura 20: Sistema 787 barras – Ângulos de fase e diferenças angulares das tensões nodais para $\lambda = 1,0$ p.u. e condição $2,4 \times R/1,0 \times X$:

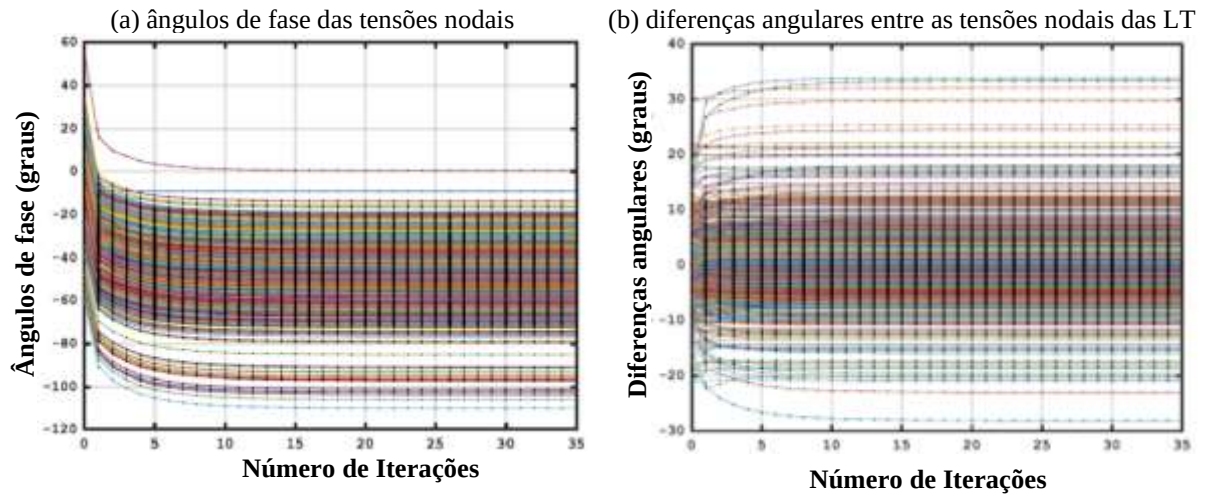
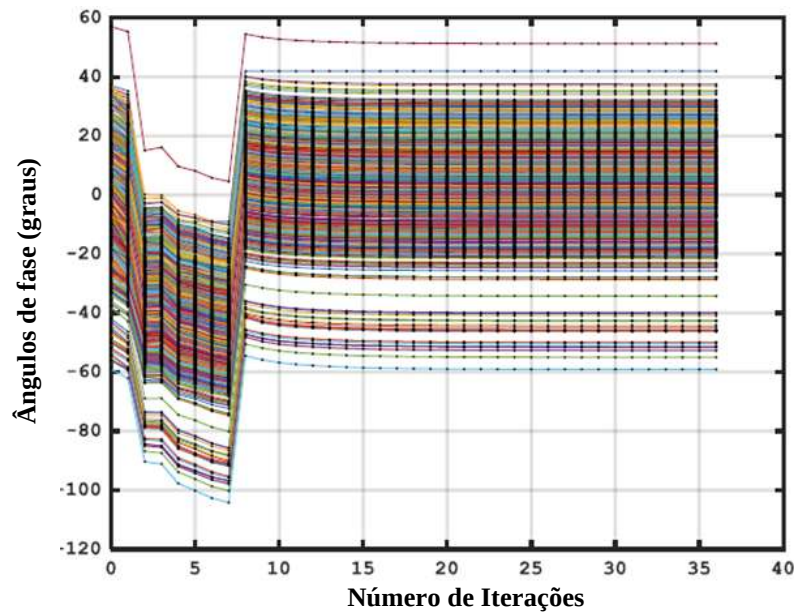


Figura 20(c): Ângulos de fase das tensões nodais do sistema 787 barras para $\lambda = 1,0$ p.u. e condição $2,4 \times R/1,0 \times X$, com a adição, na oitava iteração, de $50,93^\circ$ em todos os ângulos de fase das tensões nodais.



Fonte: Dados da pesquisa da própria autora

Dessa forma, para melhorar o desempenho do método FPICDR, como estratégia, propõe-se adicionar um ângulo α a todos os ângulos de fase das tensões nodais (θ) em uma determinada iteração (v), visando obter uma simetria em relação ao eixo horizontal e também restringir a faixa dos ângulos de fase das tensões nodais, conforme ilustrado na Figura 20(c) para $\lambda = 1,0$ p.u. e condição $2,4 \times R/1,0 \times X$ da Tabela 15. Para tanto, o valor do ângulo α será dado por (109):

$$\alpha = \frac{|\theta_{min}^v - \theta_{max}^v|}{2} - \theta_{max}^v \quad (109)$$

onde θ_{min}^v e θ_{max}^v são, respectivamente, os ângulos mínimo e máximo da tensão da barra na iteração v . Após a convergência, os valores corrigidos dos ângulos de fase das tensões nodais são calculados por:

$$\theta_i^{corrigido} = \theta_i^{convergido} - \alpha, \text{ for } i = 1, \dots, \text{NB} \quad (110)$$

onde NB é o número total de barras do sistema. Esta nova metodologia proposta será denominada Fluxo de Potência via Injeção de Corrente Desacoplado Rápido Modificado (FPICDRM). Considerando essa nova proposta para melhoria do desempenho do método FPICDR, apresenta-se a Tabela 16 (Tabela 15, mas agora com uma nova coluna) que considera a técnica proposta.

Na Tabela 16 apresenta-se o desempenho dos seis métodos para diferentes relações R/X para o sistema real 787 barras. Observa-se que a técnica proposta (penúltima coluna), diferente do método FPICDR, conseguiu convergir para relações igual e superiores a relação $2.2 \times R/1.0 \times X$, tendo o FPIPDR, uma leve vantagem para relações a partir do caso base.

Tabela 16: Desempenho dos métodos para diferentes relações R/X - Sistema 787 barras

Relação R/X	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter θ - iterV	FPICDR BX Iter θ - iterV	FPICDRM BX Iter θ - iterV (α°)	λ_{max} (p.u.)
1,0×R/0,5×X	4	4	4	15-17	16-17	15-16 (4,535)	1,7863
1,0×R/1,0×X	3	3	3	8-8	10-9	10-9 (1,003)	1,1272
2,0×R/1,0×X	4	4	4	14-17	38-34	16-15 (31,604)	1,0596
2,2×R/1,0×X	4	4	4	19-18	NC	21-20 (40,28)	1,0361
2,4×R/1,0×X	5	5	5	35-34	NC	36-36 (50,925)	1,0113
2,45×R/1,0×X	6	6	6	51-51	NC	52-52 (54,03)	1,0047
2,48×R/1,0×X	7	7	7	80-80	NC	111-111 (56,02)	1,0008
2,486×R/1,0×X	NC	NC	NC	NC	NC	NC	0,99996

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Na Tabela 17 tem-se o desempenho dos seis métodos numéricos analisados para diferentes condições de carregamento para o sistema real 787 barras. Observa-se que a técnica proposta (última coluna) possibilitou um desempenho igual ou ligeiramente superior ao FPIPDR.

Tabela 17: Avaliação de desempenho para diferentes condições de carregamentos - Sistema 787 barras

λ (p.u.)	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter θ - iterV	FPICDR BX Iter θ - iterV	FPICDRM BX Iter θ - iterV (α°)
1,000	3	3	3	8-8	10-9	10-9 (1,0028)
1,080	4	4	4	14-15	15-15	15-15 (5,2067)
1,100	5	5	5	18-19	18-18	18-18 (6,9370)
1,120	4	4	4	26-26	26-26	25-24 (7,1790)
1,127	6	6	6	95-94	92-93	91-90 (7,6958)
1,1274	NC	NC	NC	NC	NC	NC

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

3.4.3 Análise de desempenho dos sistemas

Nesta seção, apresentam-se os resultados obtidos para os seguintes métodos:

- Fluxo de Potência via Injeção de Potência: Método **FPIP**;
- Fluxo de Potência via Injeção de Corrente Modificado: Método **FPICM**;
- Fluxo de Potência via Injeção de Corrente Híbrido: Método **FPICH**;
- Fluxo de Potência via Injeção de Potência Desacoplado Rápido: Método **FPIPDR**;
- Fluxo de Potência via Injeção de Corrente Desacoplado Rápido: Método **FPICDR**;
- Fluxo de Potência via Injeção de Corrente Desacoplado Rápido Modificado: Método **FPICDRM**;

Nas Tabelas 18 a 23 tem-se o desempenho dos seis métodos numéricos para diferentes condições de carregamento. Observa-se que todos os métodos desacoplados, apresentam um desempenho similar para os sistemas IEEE-14, 30 e 57. Para o sistema IEEE-118, IEEE-300 e 638 barras, as metodologias propostas apresentaram um desempenho, levemente superior.

Tabela 18: Avaliação de desempenho para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-14 barras

λ (p.u.)	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter θ - iterV	FPICDR BX Iter θ - iterV	FPICDRM BX Iter θ - iterV (α°)
1,0	3	3	3	7-6	7-6	7-6 (8,6669)
1,4	5	5	5	9-8	9-8	9-8 (11,8247)
1,7	6	6	6	15-14	17-14	16-15 (14,1501)
1,75	6	6	6	20-19	21-20	20-19 (14,5454)
1,767	7	7	7	23-22	25-24	24-23 (14,6804)
1,78	NC	NC	NC	NC	NC	NC

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 19: Avaliação de desempenho para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-30 barras

λ (p.u.)	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter θ - iterV	FPICDR BX Iter θ - iterV	FPICDRM BX Iter θ - iterV (α°)
1,0	4	4	4	7-7	8-7	8-7 (9,6631)
1,4	6	6	6	12-11	14-13	13-12 (12,6074)
1,5	9	9	9	20-19	22-21	21-20 (13,3149)
1,53	10	10	10	38-37	42-40	39-38 (13,5284)
1,533	10	10	10	58-57	62-60	59-58 (13,5498)
1,54	NC	NC	NC	NC	NC	NC

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 20: Avaliação de desempenho para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-57 barras

λ (p.u.)	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter θ - iterV	FPICDR BX Iter θ - iterV	FPICDRM BX Iter θ - iterV (α°)
1,0	4	4	4	8-8	8-8	9-8 (8,8227)
1,4	5	5	5	10-9	11-11	11-11 (11,9348)
1,5	5	5	5	12-11	13-13	13-12 (12,6827)
1,58	6	6	6	21-20	23-22	22-21 (13,2686)
1,596	7	7	7	41-40	44-43	43-42 (13,3846)
1,6	NC	NC	NC	NC	NC	NC

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 21: Avaliação de desempenho para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-118 barras

λ (p.u.)	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter θ - iterV	FPICDR BX Iter θ - iterV	FPICDRM BX Iter θ - iterV (α°)
1,0	4	4	4	8-8	9-8	8-8 (5.7225)
1,4	5	5	5	9-9	9-9	9-9 (9.3781)
1,7	6	6	6	12-12	13-13	13-12 (13.0404)
1,86	8	8	8	51-50	41-40	40-39 (15.8134)
1,865	8	8	8	82-81	49-48	48-47 (15.8994)
1,9	NC	NC	NC	NC	NC	NC

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 22: Avaliação de desempenho para diferentes condições de carregamentos - Sistema IEEE-300 barras

λ (p.u.)	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter θ - iterV	FPICDR BX Iter θ - iterV	FPICDRM BX Iter θ - iterV (α°)
1,0	4	4	4	13-12	13-12	13-12 (2,3120)
1,02	4	4	4	16-15	15-14	15-14 (2,9133)
1,04	5	5	5	24-23	22-21	22-21 (3,5669)
1,05	5	5	5	36-35	32-32	33-32 (3,9235)
1,055	7	7	7	80-80	74-73	73-72 (4,1212)
1,056	NC	NC	NC	NC	NC	NC

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 23: Avaliação de desempenho para diferentes condições de carregamentos - Sistema 638 barras

λ (p.u.)	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter θ - iterV	FPICDR BX Iter θ - iterV	FPICDRM BX Iter θ - iterV (α°)
1,0	5	5	5	32-31	NC	33-32 (39,4386)
1,002	5	5	5	32-31	NC	36-35 (39,9201)
1,005	5	5	5	43-42	NC	43-42 (40,6860)
1,008	6	6	6	81-80	NC	80-78 (41,5130)
1,0087	7	7	7	ND e NC	NC	ND e NC
1,0088	NC	NC	NC	NC	NC	NC

NC: Não Converte; ND: Não Diverge - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Nas Tabelas 24 a 29, compara-se o desempenho dos seis métodos numéricos analisados para os sistemas, considerando as respectivas relações de R/X. Analisando as informações, verifica-se que, em linhas gerais, para os sistemas IEEE-14, 30, 57 e 118 barras, os métodos desacoplados tem um perfil similar no que diz respeito ao número de iterações necessárias para a convergência do problema, tendo o FPICDR uma leve desvantagem em relação aos demais métodos. Já os sistemas maiores, IEEE-300 e 638 barras, as metodologias propostas apresentaram um desempenho, levemente superior, com destaque para o método FPICDRM.

Tabela 24: Avaliação de desempenho para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-14 barras

Relação R/X	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPDR BX Iter θ - iterV	FPICDR BX Iter θ - iterV	FPICDRM BX Iter θ - iterV (α°)	$\lambda_{\max}$ (p.u.)
1,0×R/0,5×X	4	4	4	8-7	10-9	9-8 (4,3247)	2,6714
1,0×R/1,0×X	3	3	3	7-6	7-6	7-6 (8,6669)	1,7940
2,0×R/1,0×X	4	4	4	9-8	9-8	10-9 (9,1154)	1,4917
3,0×R/1,0×X	5	5	5	10-10	29-28	13-13 (9,9167)	1,2485
4,0×R/1,0×X	6	6	6	12-14	48-47	16-16 (12,2986)	1,0556
4,5×R/1,0×X	NC	NC	NC	NC	NC	NC	0,9760

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 25: Avaliação de desempenho para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-30 barras

Relação R/X	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPD _R BX Iter θ - iterV	FPICD _R BX Iter θ - iterV	FPICD _{RM} BX Iter θ - iterV (α°)	$\lambda_{\max}$ (p.u.)
1,0×R/0,5×X	6	6	6	9-9	12-11	10-9 (5,0182)	2,2349
1,0×R/1,0×X	4	4	4	7-7	8-7	8-7 (9,6631)	1,5335
2,0×R/1,0×X	5	5	5	10-9	13-12	10-9 (10,1663)	1,2805
3,0×R/1,0×X	6	6	6	15-14	19-18	15-14 (12,0959)	1,0758
3,5×R/1,0×X	NC	NC	NC	NC	NC	NC	0,9898

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 26: Avaliação de desempenho para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-57 barras

Relação R/X	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPD _R BX Iter θ - iterV	FPICD _R BX Iter θ - iterV	FPICD _{RM} BX Iter θ - iterV (α°)	$\lambda_{\max}$ (p.u.)
1,0×R/0,5×X	3	3	4	11-10	13-12	11-11 (4,5191)	2,2296
1,0×R/1,0×X	4	4	4	8-8	8-8	9-8 (8,8227)	1,5972
2,0×R/1,0×X	5	5	5	10-10	17-16	11-12 (10,0049)	1,3444
3,0×R/1,0×X	8	8	7	13-21	44-44	13-14 (17,2159)	1,1104
3,5×R/1,0×X	8	8	9	17-29	NC	20-19 (22,4385)	1,0166
4,0×R/1,0×X	NC	NC	NC	NC	NC	NC-NC	0,9339

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 27: Avaliação de desempenho para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-118 barras

Relação R/X	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPD _R BX Iter θ - iterV	FPICD _R BX Iter θ - iterV	FPICD _{RM} BX Iter θ - iterV (α°)	$\lambda_{\max}$ (p.u.)
1,0×R/0,5×X	5	5	5	11-10	10-10	11-10 (2,3602)	2,5868
1,0×R/1,0×X	4	4	4	8-8	9-8	8-8 (5,7225)	1,8664
2,0×R/1,0×X	5	5	5	10-9	10-10	10-10 (8,3237)	1,6228
3,0×R/1,0×X	5	5	6	10-10	13-13	12-12 (14,4411)	1,2371
3,5×R/1,0×X	5	5	6	17-16	21-20	18-19 (24,2811)	1,0601
4,0×R/1,0×X	NC	NC	NC	NC	NC	NC	0,9154

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 28: Avaliação de desempenho para diferentes relações R/X - Sistema IEEE-300 barras

Relação R/X	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPD _R BX Iter θ - iterV	FPICD _R BX Iter θ - iterV	FPICD _{RM} BX Iter θ - iterV (α°)	$\lambda_{\max}$ (p.u.)
1,0×R/0,5×X	5	6	4	7-7	16-18	13-11 (0,8315)	1,4303
1,0×R/1,0×X	4	4	4	13-12	12-12	13-12 (2,3120)	1,0553
1,2×R/1,0×X	5	5	4	17-16	15-15	16-15 (6,9354)	1,0292
1,4×R/1,0×X	6	5	5	28-27	25-25	25-24 (12,2037)	1,0086
1,47×R/1,0×X	7	7	6	79-77	70-69	70-69 (14,0571)	1,0002
1,473×R/1,0×X	NC	NC	NC	NC	NC	NC	0,9998

NC: Não Converte - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Tabela 29: Avaliação de desempenho para diferentes relações R/X - Sistema 638 barras

Relação R/X	FPIP	FPICM	FPICH	FPIPD _R BX Iter θ - iterV	FPICD _R BX Iter θ - iterV	FPICD _{RM} BX Iter θ - iterV (α°)	$\lambda_{\max}$ (p.u.)
1,0×R/0,5×X	5	5	5	17-45 14-20 (8)	22-31 21-24(12)	25-42 (13,6938) 21-27 (13,7211) (12)	1,5692
1,0·R/1,0·X	5	5	5	32-31	NC	33-32 (39,4386)	1,0087
1,08·R/1,0·X	6	6	6	61-60	NC	61-59 (42,4311)	1,0016
1,095·R/1,0·X	6	6	6	110-109	NC	108-106 (43,0635)	1,0003
1,098·R/1,0·X	8	8	8	NC	ND e NC	ND e NC	1,0000
1,1·R/1,0·X	NC	NC	NC	NC	NC	NC	0,9998

NC: Não Converte; ND: Não Diverge - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Novamente, com o objetivo de ilustrar que os estados obtidos pelos métodos ao final do processo iterativo são os mesmos, mas agora incluindo também os resultados do FPICDRM, nas Figuras 21(a) e 21(b) são apresentados os estados convergidos (θ , $|V|$) obtidos para a condição 3×R/1×X do sistema de 118 barras.

Ao final do processo iterativo, verifica-se que todos os métodos convergiram para a mesma solução. A respectiva característica de convergência das diferenças de potência total pode ser vista na Figura 21(c). Comparando a evolução dos *mismatch* dos métodos propostos com a de seus respectivos métodos padrão, pode-se verificar que os propostos apresentam boas características de convergência.

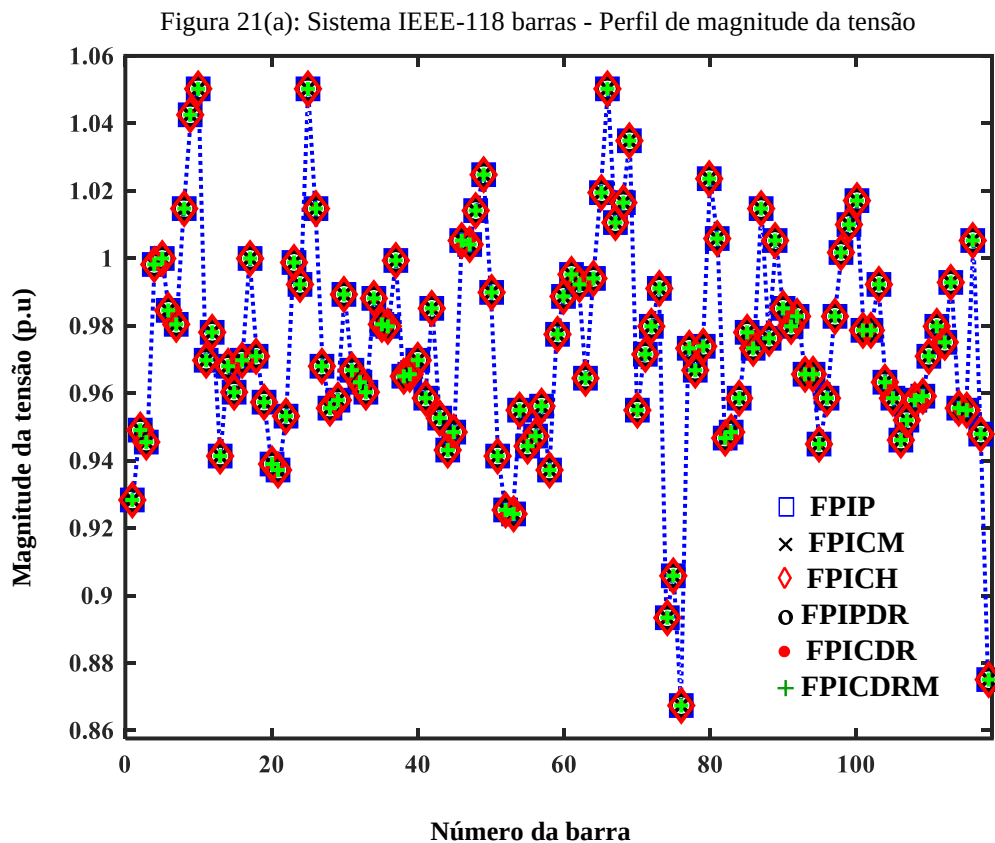
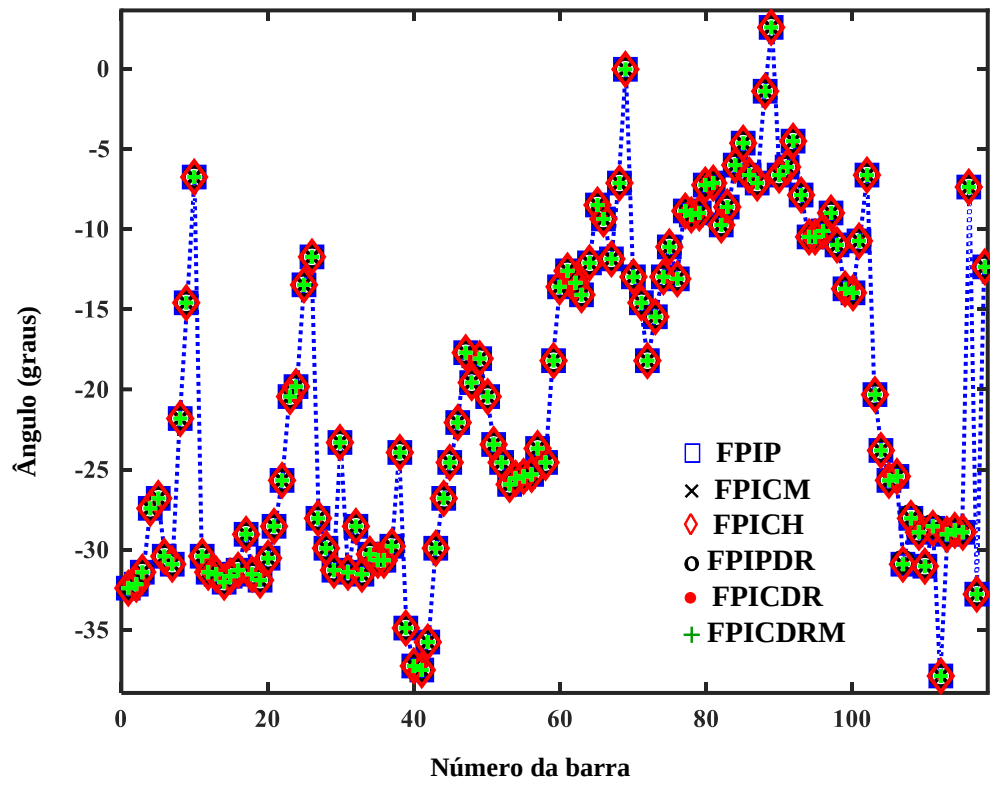
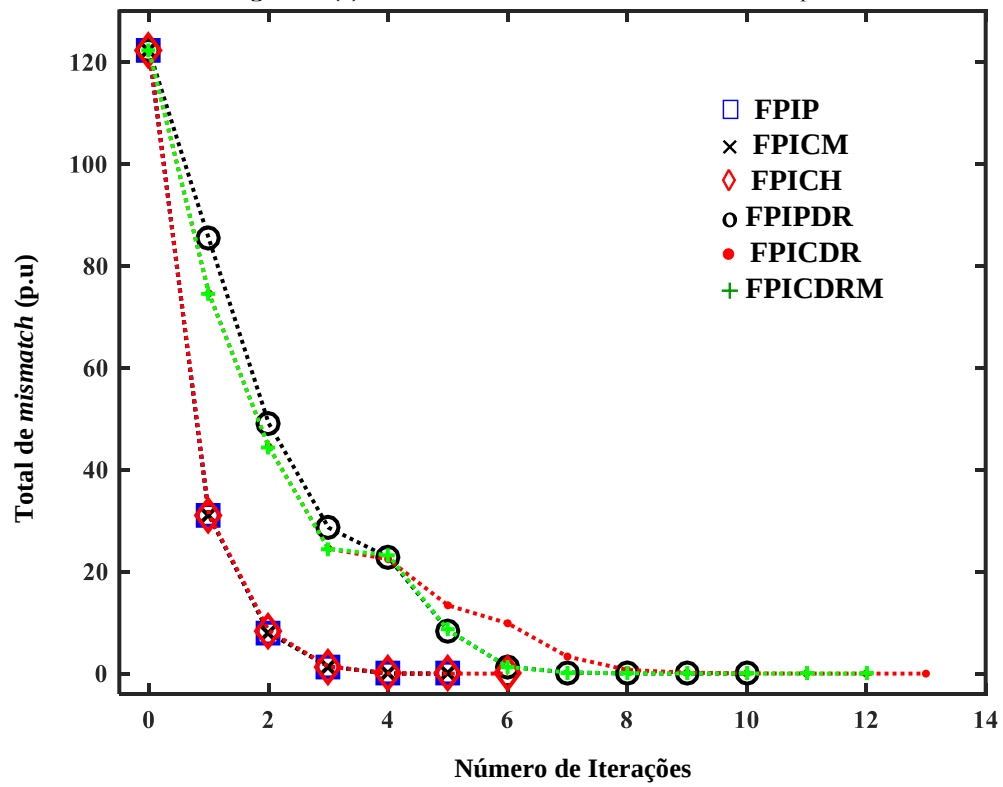


Figura 21(b): Sistema IEEE-118 barras - Perfil de ângulo de fase

Figura 22(c): Sistema IEEE-118 - *Mismatch* total em p.u.

Fonte: Dados da pesquisa da própria autora

4 FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO

Este capítulo apresenta uma técnica que permite ampliar a trajetória de soluções para obtenção da MC e, conseqüentemente, a remoção da singularidade da matriz Jacobiana do FP. Ao invés do plano comumente empregado para o traçado da curva P-V, a técnica proposta faz uso de um novo plano definido pelas variáveis magnitude da tensão de uma barra k qualquer e perdas totais de potência ativa do sistema. A seguir, são apresentadas as versões do FPC das respectivas formulações de FP vistas no Capítulo 3, bem como também a análise comparativa de desempenho destes quando do traçado completo das curvas P-V e a obtenção do PMC de SEP, em duas condições: (1) considerando os mesmos pontos previstos, isto é, o mesmo preditor, e (2) considerando os seus respectivos preditores. Nas análises adotou-se o preditor tangente associado à técnica de parametrização local (Ajjarapu e Christy, 1992) para a determinação do parâmetro mais apropriado para a eliminação da singularidade da matriz Jacobiana. Os métodos de FPC derivados são aplicados aos sistemas IEEE-14, 30, 57, 118 e 300 barras e duas versões reais de grande porte do sistema elétrico de potência Sul/Sudeste brasileiro de 638 e 787 barras.

4.1 FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO: TÉCNICA DE PARAMETRIZAÇÃO PROPOSTA EM OLIVEIRA, BONINI NETO E ALVES (2020)

No procedimento padrão para obtenção das curvas P-V modifica-se o conjunto de equações do FC convencional adicionando um parâmetro usado para alterar a carga e a geração, em uma direção preespecificada (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; CHIANG et al. 1995). Nesses casos, calculam-se muitos pontos de operação de forma a permitir a determinação do PMC com maior precisão, no entanto, há um alto custo computacional.

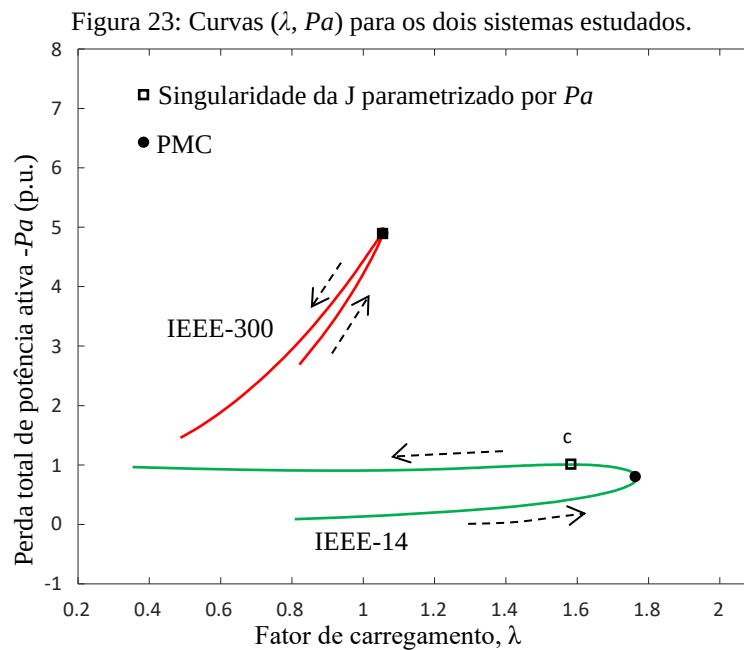
Conforme apresentado no Capítulo 2, na técnica de parametrização local proposta em Ajjarapu e Christy (1992) o processo inicia utilizando λ como parâmetro, sendo o seu valor incrementado gradualmente a partir do caso base ($\lambda_0 = 1$) até às proximidades do PMC, onde ocorre uma troca de parâmetro. Neste caso, a variável escolhida como novo parâmetro é aquela que apresentar a maior variação. Nessa técnica, $|V_k|$ ou θ_k é escolhida, enquanto λ passa a ser considerado como variável dependente. Depois de alguns pontos da curva, o parâmetro volta novamente a ser λ .

No FPC apresentado em Bonini e Alves (2010), a singularidade da matriz $\mathbf{J}$ é removida pela adição de uma reta que passa através de um ponto escolhido $(\lambda^0, |V_k^0|)$ no plano determinado pelas variáveis magnitude da tensão do barramento $(|V_k|)$ e o fator de carregamento (λ) .

$$R(|V_k|, \lambda, \alpha) = \alpha(\lambda - \lambda^0) - (|V_k| - |V_k^0|) = 0 \quad (111)$$

onde α é o coeficiente angular da reta. Com a adição dessa nova equação, em que α é considerado como o parâmetro da continuação, λ pode ser tratado como uma variável dependente. Um preditor trivial com um incremento fixo no parâmetro α pode ser adotado.

As técnicas de parametrização global propostas em Garbelini et al. (2007), Alves et al. (2003a) e Alves et al. (2003b) utilizam o plano determinado pelas variáveis fator de carregamento (λ) e a perda total de potência ativa (Pa) para obtenção da curva P-V. A Figura 23 apresenta as curvas (λ, Pa) para cada sistema estudado.



Fonte: Elaboração da própria autora

Embora essas técnicas tenham proporcionados bons resultados, para sistemas de grande porte, há necessidade de reformulação do método para obtenção do PMC (Bonini e Alves, 2010), como consequência das trajetórias das curvas (λ, Pa) apresentarem uma característica aguda (parte estável e instável da curva apresentam a mesma inclinação), conforme se pode observar da curva (λ, Pa) do sistema IEEE-300 apresentado na Figura 23. Neste caso, a singularidade das matrizes Jacobianas utilizando tanto λ quanto Pa como parâmetro são praticamente coincidentes no ponto PMC.

Para evitar tais problemas, nessa proposta é acrescentada ao sistema de equações básicas do FC, a equação de uma reta no plano $(|V_k|, Pa)$, tornando-se:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|, \lambda) &= 0 \\ \Delta R(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|, \alpha, \beta) &= \alpha(V_k - V_k^0) - \beta[Pa(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) - Pa^0] = 0 \end{aligned} \right\} \quad (112)$$

onde α e β são coeficientes angulares que definem a reta a ser utilizada. Neste caso $\alpha = 1$ e β variando (β corresponde ao parâmetro no novo plano $(|V_k|, Pa)$). Em que $Pa(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)$ corresponde a perda total de potência ativa do sistema dada pela equação:

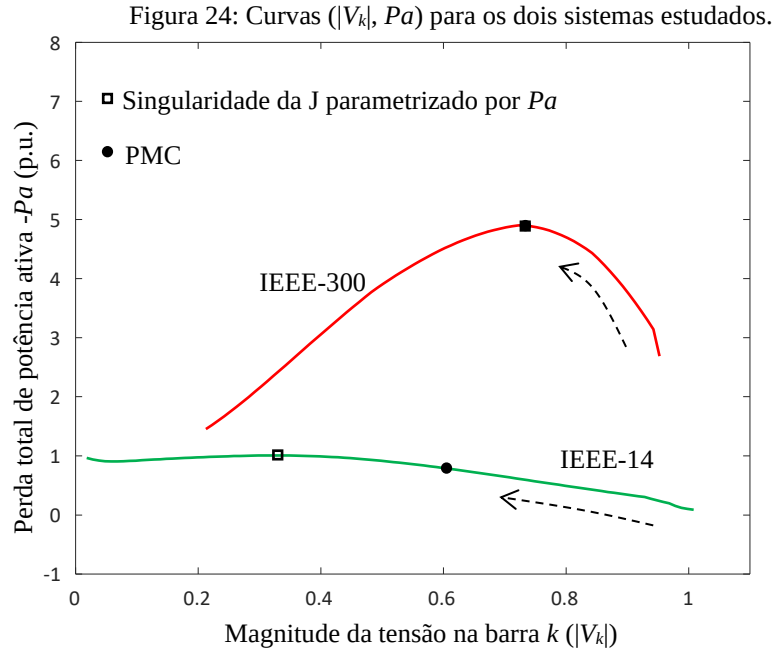
$$Pa(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|) = \sum_{i \in \Omega} \sum_{j \in \Omega} g_{ij} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (113)$$

Linearizando (112) pelos dois primeiros termos da série de Taylor tem-se na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \\ \Delta \mathbf{R} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} -\frac{\partial \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \boldsymbol{\theta}} & -\frac{\partial \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \mathbf{V}} & -\frac{\partial \mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial V_k} & \mathbf{P}^{\text{esp}} \\ -\frac{\partial \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \boldsymbol{\theta}} & -\frac{\partial \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \mathbf{V}} & -\frac{\partial \mathbf{Q}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial V_k} & \mathbf{Q}^{\text{esp}} \\ -\beta \frac{\partial Pa(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \boldsymbol{\theta}} & -\beta \frac{\partial Pa(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial \mathbf{V}} & (\alpha - \beta) \frac{\partial Pa(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|)}{\partial V_k} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta |\mathbf{V}| \\ \Delta |V_k| \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (114)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \\ \Delta \mathbf{R} \end{bmatrix} = -\mathbf{J}_m \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta |\mathbf{V}| \\ \Delta |V_k| \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (115)$$

A Figura 24 apresenta a curva da trajetória de soluções utilizando a nova técnica.



Fonte: Elaboração da própria autora

Pode-se observar que não há singularidade da matriz J no PMC utilizando β como parâmetro no plano $(|V_k|, Pa)$.

Esta nova técnica permite obter toda a curva P-V sem problemas relacionados a singularidades das matrizes Jacobianas quando das parametrizações por λ (no PMC) e Pa .

4.1.1 Algoritmo do Método Proposto

1º passo: Escolha uma barra i qualquer do sistema e inicie o método no plano $(\lambda, |V_i|)$, ver Figura 25;

2º passo: A partir do caso base (parametrizado por λ , $\lambda^1 = 1$) usando o preditor trivial, calcule quatro pontos ($\lambda^{v+1} = \lambda^v + \Delta\lambda$; com passo igual a 0,05 p.u.) ou até o processo iterativo do FP diverja ou não convirja (considerando um máximo de 10 iterações). Durante esse passo, monitore todas as magnitudes de tensão das barras $|V|$ do sistema para descobrir qual barra k apresenta ou a menor $|V_k|$ no último ponto encontrado no plano $(\lambda, |V_i|)$, ou a maior variação do valor $\Delta|V_k|$ entre os dois últimos pontos encontrados.

3º passo: Mude para o novo plano $(|V_k|, Pa)$ de forma a obter os demais pontos que posteriormente serão usados para o traçado da curva P-V; esta mudança de plano possibilita a remoção da singularidade da matriz Jacobiana durante o traçado da curva P-V (Figura 25(a)).

4º passo: Em seguida, obtenha para a barra k o ponto b no plano $(|V_k|, Pa)$ (Figura 25(b)), o qual corresponde ao ponto a no plano $(\lambda, |V_i|)$. Escolhe-se um ponto $(|V_k^0|, Pa^0)$ correspondente ao centro do feixe de retas e calcula-se o parâmetro β inicial:

$$\beta^0 = \frac{(|V_k^b| - |V_k^0|)}{[Pa(\theta, |V|)^b - Pa^0]} \quad (116)$$

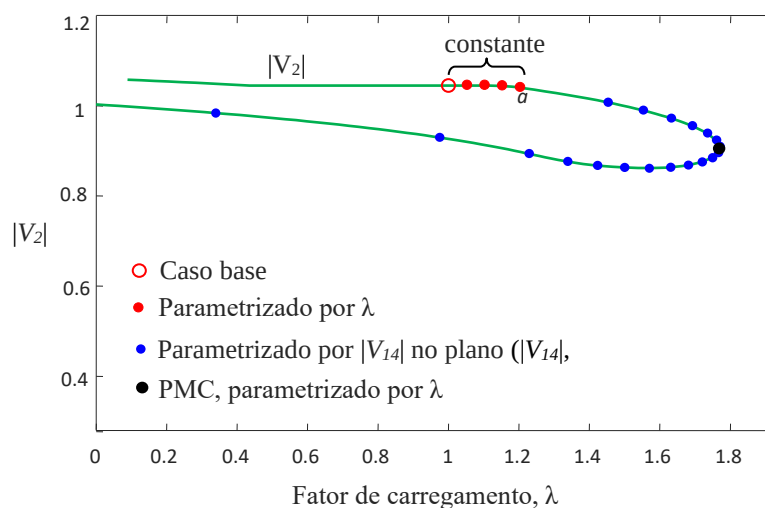
e com um passo de 0,05 no parâmetro β , isto é, $\beta^0 + \Delta\beta$, calcula-se os demais pontos da curva P-V no plano $(|V_k|, (0,5 Pa))$. Os valores das coordenadas do ponto escolhido para o centro do feixe de retas foi $(|V_k^0|, Pa^0) = (0,0)$, pois para todos os sistemas analisados, esse ponto localiza-se praticamente no meio da curva da trajetória de soluções.

4.1.2 Análise de desempenho do sistema IEEE-14 barras

Para todos os testes, a tolerância adotada para os mismatches foi de 10^{-5} p.u. Os limites de potência reativa (Q) em barras PV são os mesmos que os utilizados no FP convencional. Em cada iteração, as gerações reativas em todas as barras PV são comparadas com seus respectivos limites. Em caso de violação, a barra PV é mudada para PQ. Esta barra pode retornar a ser PV em iterações futuras.

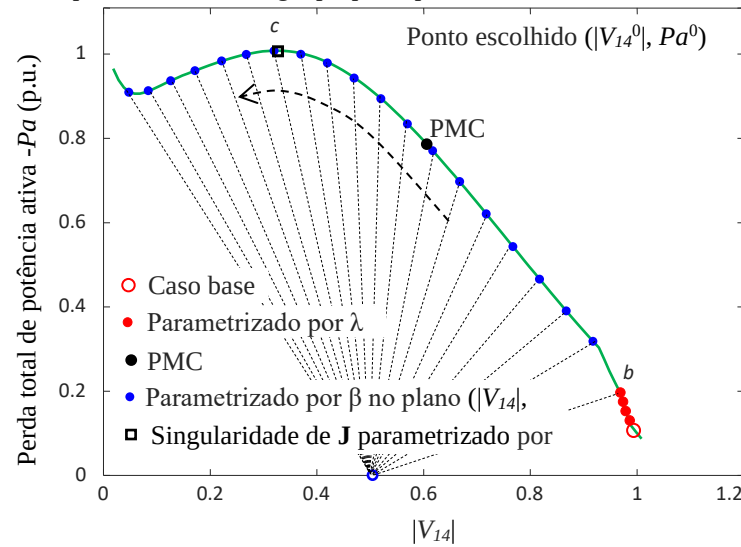
A Figura 25 apresenta o desempenho do método proposto aplicado ao sistema IEEE-14 barras. A barra i escolhida aleatoriamente para iniciar o traçado da curva P-V foi a barra 2 ($|V_2|$) conforme a Figura 25(a). Foi calculado o caso base ($\lambda = 1$) e depois com passo de 0,05 p.u., utilizando λ como parâmetro, foram calculados mais quatro pontos conforme algoritmo apresentado no item 4.1.1. Na Figura 25(b), a barra k que apresentou o menor valor em sua magnitude de tensão foi a barra crítica 14 ($|V_{14}|$), neste caso, mudou-se de plano ($\lambda, |V_2|$) para o plano ($|V_{14}|, Pa$), ou seja, do último ponto obtido no plano ($\lambda, |V_2|$) (ponto a) para o ponto correspondente a ele no plano ($|V_{14}|, Pa$) ponto b e com o mesmo passo inicialmente adotado para λ , mas agora para o parâmetro β ($\Delta\beta = 0.05$), obtém-se o restante da curva P-V conforme os pontos em azul na curva P-V da Figura 25(a). Foi possível obter toda a curva P-V sem problemas relacionados à singularidade da matriz Jacobiana.

Figura 25(a): Desempenho da metodologia proposta para o sistema IEEE 14 barras - Curva P-V da barra de geração 2 ($\lambda, |V_2|$)



Fonte: Elaboração da própria autora

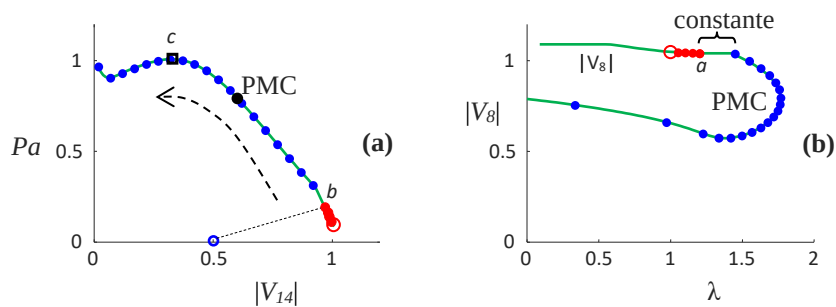
Figura 25(b): Desempenho da metodologia proposta para o sistema IEEE 14 barras - Curva $(|V_{14}|, Pa)$.



Fonte: Elaboração da própria autora

A Figura 26(b) apresenta resultados para outra barra aleatoriamente escolhida do sistema IEEE-14 barras, neste caso a barra 8 ($|V_8|$).

Figura 26: Desempenho da metodologia proposta para o sistema IEEE-14 barras - (a) Curva P-V da barra de geração 8 ($\lambda, |V_8|$) - (b) Curva $(|V_{14}|, Pa)$.

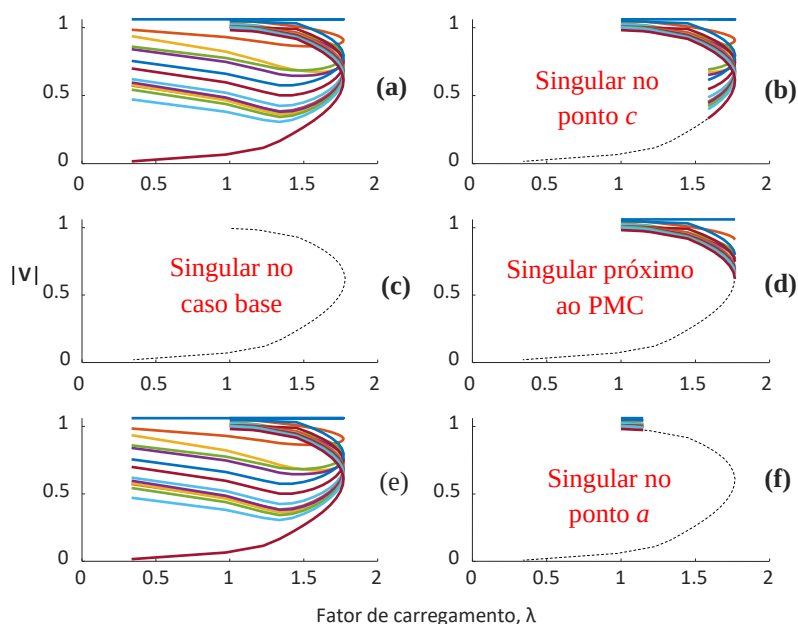


Fonte: Elaboração da própria autora

A Figura 27 apresenta uma comparação em relação à obtenção das curvas P-V via metodologia proposta e outras técnicas apresentadas na literatura, no caso as técnicas de parametrização por Pa , λ e $|V_k|$, com $k = 2, 14$ e 8 ($|V_2|$, $|V_{14}|$ e $|V_8|$).

Nota-se que nas Figuras 27(a) e 27(e) apenas a técnica proposta e a parametrizada por $|V_{14}|$ conseguiram obter completamente a curva P-V do sistema. A Figura 27(b) apresenta as curvas P-V obtida pela técnica a qual utiliza a perda total de potência ativa (Pa) como parâmetro. Nota-se que houve singularidade no ponto c logo após o PMC, conforme Figura 23. Nas Figuras 27(c) e (f) são apresentados os resultados utilizando $|V_2|$ e $|V_8|$ como parâmetros.

Figura 27: Curvas P-V do sistema IEEE-14 barras obtidas por:
 (a) metodologia proposta - (b) parametrizado por Pa - (c) parametrizado por $|V_2|$ - (d) parametrizado por λ - (e)
 parametrizado por $|V_{14}|$ (crítica) - (f) parametrizado por $|V_8|$.



Fonte: Elaboração da própria autora

A barra 2 é uma barra PV e assim, como se pode observar na Figura 25(a), no entorno do caso base ela apresenta um trecho de curva em que a magnitude de tensão permanece constante. A técnica de parametrização por $|V_2|$ utiliza retas perpendiculares ao eixo das ordenadas, assim, quando do uso da parametrização por $|V_2|$, a matriz Jacobiana apresentará determinante nulo em consequência da introdução em (112) de uma equação linearmente dependente e, conseqüentemente, o método não encontra solução, como se pode ver na Figura 27(c). A Tabela 30 apresenta os valores do determinante da matriz Jacobiana parametrizado por $|V_2|$ correspondente ao trecho de curva em que a magnitude de tensão permanece constante, também são apresentados na tabela os correspondentes valores do fator de carregamento λ e da magnitude da tensão $|V_2|$. Nota-se que o valor do determinante da matriz J parametrizado por $|V_2|$ é nulo em todos os pontos entorno do ponto caso base $\lambda = 1$, região onde os valores da magnitude da tensão da barra $|V_2|$ permanecem constante no valor 1,0450.

Tabela 30: Determinante da matriz Jacobiana parametrizado por $|V_2|$

Fator de carregamento λ	Determinante de J parametrizado por $ V_2 $	$ V_2 $
0,9716	0,000	1,0450
0,9780	0,000	1,0450
0,9926	0,000	1,0450
1,0123	0,000	1,0450
1,0319	0,000	1,0450
1,0513	0,000	1,0450

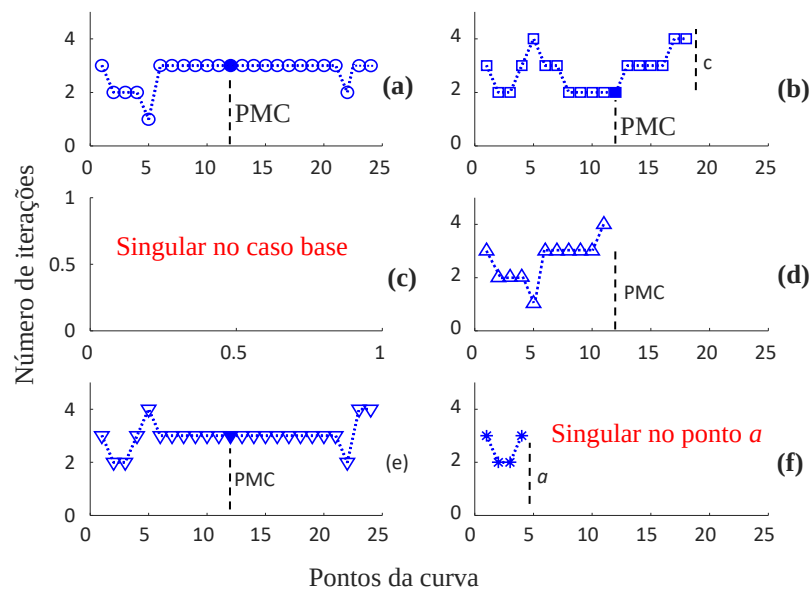
Fonte: Dados da pesquisa da própria autora

O mesmo ocorre ao se utilizar $|V_8|$ como parâmetro (Figura 27(f)), apenas quatro pontos foram obtidos até o ponto a, onde também devido ao trecho da curva P-V em que a magnitude de tensão permanece constante (Figura 26(b)). Já a Figura 27(d) mostra as curvas P-V obtidas utilizando λ como parâmetro. Como era de se esperar, existe uma singularidade da matriz $\mathbf{J}$ no PMC, o que restringe o uso da parametrização por λ apenas para o traçado da parte superior das curvas P-V, até as proximidades do PMC.

A Figura 28 apresenta o número de iterações utilizadas para o traçado das mesmas via metodologia proposta e outras técnicas apresentadas na literatura, no caso as técnicas de parametrização por Pa , λ e $|V_k|$, com $k = 2, 14$ e 8 ($|V_2|$, $|V_{14}|$ e $|V_8|$).

O critério utilizado para troca de parâmetro e a mudança de plano ($|V_k|$, Pa) é baseado na barra que apresentar menor valor em sua magnitude de tensão ou maior variação do valor da magnitude de tensão entre os dois últimos pontos encontrados. O objetivo deste teste é comparar o desempenho (número de iterações) dos métodos. Para isso, calculam-se os mesmos pontos da curva P-V utilizando cada um dos métodos, de forma a garantir que os mesmos possam ser corretamente comparados. Observa-se que cada ponto da curva P-V corresponde a uma solução do problema de fluxo de carga para um valor especificado de λ , $|V_k|$, Pa entre outros. Assim, obtiveram-se primeiramente os pontos através da metodologia proposta.

Figura 28: Número de iterações necessárias para obtenção das curvas P-V do sistema IEEE 14 barras: (a) metodologia proposta, (b) parametrizado por Pa , (c) parametrizado por $|V_2|$, (d) parametrizado por λ , (e) parametrizado por $|V_{14}|$ (crítica), (f) parametrizado por $|V_8|$



Fonte: Elaboração da própria autora

Uma vez obtidos todos os estados, os respectivos valores λ , $|V_k|$ e Pa de cada ponto foram computados. A seguir estes valores foram usados para obter suas respectivas curvas de forma a garantir-se que o sistema caminhe de um mesmo estado inicial para o mesmo estado final.

A Tabela 31 apresenta o NTI para obtenção MC do sistema IEEE-14 barras para cada método apresentado.

Tabela 31: Número Total de Iterações (IEEE 14 barras)

Método	Iterações
Método proposto	31
Parametrizado por Pa	26
Parametrizado por $ V_2 $	falhou no caso base
Parametrizado por λ	falhou próximo ao PMC
Parametrizado por $ V_{14} $	35
Parametrizado por $ V_8 $	falhou no ponto a

Fonte: Dados da pesquisa da autora

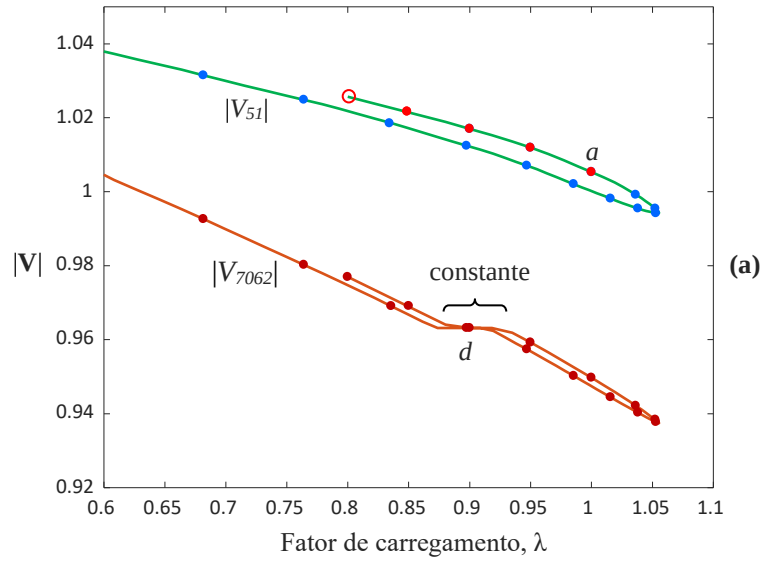
Utilizando um passo de 0,05 estabelecido, e garantindo que o sistema caminhe de um mesmo estado inicial para o mesmo estado final, o método que apresentou o menor número de iterações foi o parametrizado por Pa com 26 iterações, seguido pela metodologia proposta e pela técnica que apresenta a tensão da barra crítica $|V_{14}|$ como parâmetro, com 31 e 35 iterações respectivamente. Embora a técnica que utiliza Pa como parâmetro tenha proporcionado melhores resultados, para sistemas de grande porte, há necessidades de reformulação do método para obtenção do PMC, isto é necessário devido as curvas (λ , Pa) apresentarem uma trajetória com característica aguda no entorno do PMC.

4.1.3 Análise de desempenho do sistema IEEE-300 barras

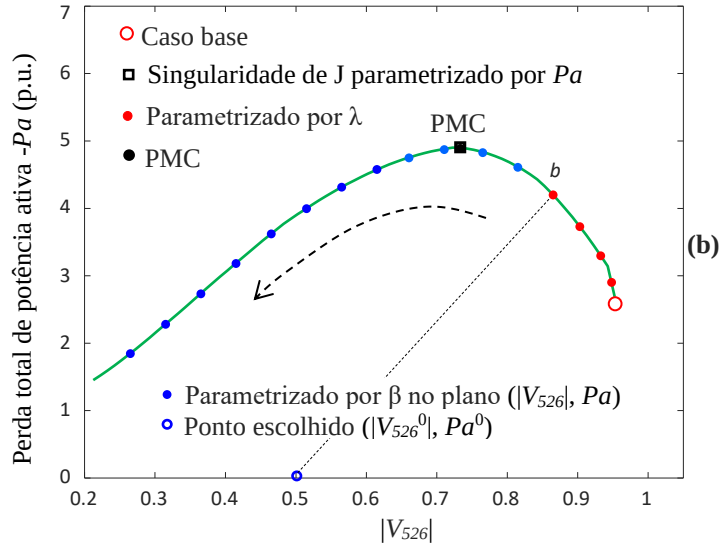
A Figura 29 apresenta resultados para o sistema IEEE-300 barras. A barra escolhida aleatoriamente para o traçado das curvas P-V foi a barra 51 e depois a 7062, Figura 29(a). Em ambos os casos, após o caso base mais quatro pontos foram encontrados utilizando λ como parâmetro, identificou-se a barra crítica 526 como a que apresentou a maior variação do valor da magnitude de tensão entre os dois últimos pontos encontrados.

Neste caso, houve a mudança do ponto a no plano (λ , $|V_{51}|$) para o ponto b no plano ($|V_{526}|$, Pa). A Figura 29(b) apresenta a curva com todos os pontos calculados, sem os problemas numéricos relacionados à singularidade da matriz.

Figura 29(a): Curvas P-V das barras 51 e 7062



Fonte: Elaboração da própria autora

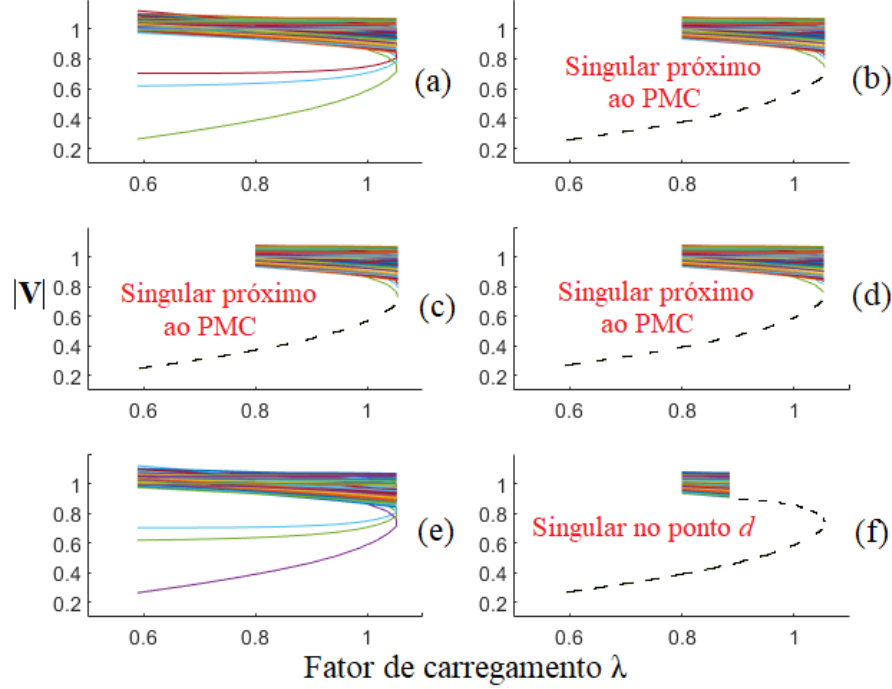
Figura 29(b): Curva $(|V_{526}|, Pa)$.

Fonte: Elaboração da própria autora

As Figuras 30 e 31 apresentam resultados similares aos apresentados para o sistema IEEE-14 barras.

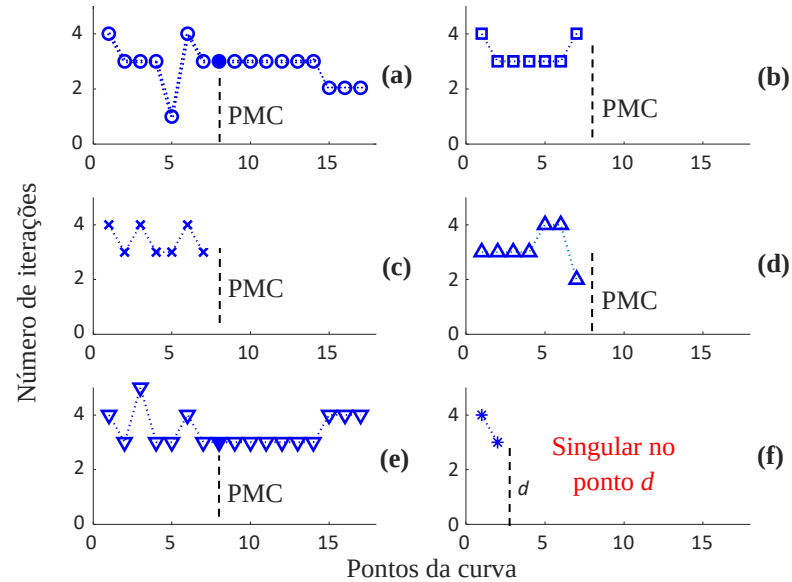
Apenas a técnica proposta e a parametrizada pela tensão da barra crítica conseguiram obter as curvas P-V completas do sistema IEEE-300 barras e, conseqüentemente, a determinação da MC. As demais técnicas ficaram restritas à parte superior das curvas P-V, inclusive a técnica parametrizada por Pa , que apresentou um menor número de iterações para cada ponto obtido na curva P-V, Figura 30 (b).

Figura 30: Curvas P-V do sistema IEEE-300 barras obtidas por: (a) metodologia proposta, (b) parametrizado por Pa , (c) parametrizado por $|V_{51}|$, (d) parametrizado por λ , (e) parametrizado por $|V_{526}|$ (crítica), (f) parametrizado por $|V_{7062}|$.



Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 31: Número de iterações necessárias para obtenção das curvas P-V do sistema IEEE-300 barras: (a) metodologia proposta, (b) parametrizado por Pa , (c) parametrizado por $|V_{51}|$, (d) parametrizado por λ , (e) parametrizado por $|V_{526}|$ (crítica), (f) parametrizado por $|V_{7062}|$.



Fonte: Elaboração da própria autora

Essas técnicas apresentaram problemas numéricos próximo ao PMC, consequentes da singularidade de suas matrizes Jacobiana, com exceção a técnica parametrizada por $|V_{7062}|$,

que apresentou problemas numéricos logo no início, no ponto d , devido ao trecho constante na sua curva P-V, Figura 29(a).

A Tabela 32 apresenta o NTI para obtenção da margem de carregamento do sistema IEEE-300 barras para cada método apresentado.

Tabela 32: Número Total de Iterações (IEEE 300 barras)

Método	Iterações
Método proposto	24
Parametrizado por Pa	falhou próximo ao PMC
Parametrizado por $ V_{51} $	falhou próximo ao PMC
Parametrizado por λ	falhou próximo ao PMC
Parametrizado por $ V_{526} $	28
Parametrizado por $ V_{7062} $	falhou no ponto d

Fonte: Dados da pesquisa da autora

A Tabela 33 apresenta, para a metodologia proposta parametrizada por β e a técnica parametrizada pela magnitude da tensão da barra crítica, o NTI necessário para obtenção da curva P-V completa do sistema IEEE-14 e 300 barras.

Tabela 33: Número Total de Iterações para traçado da curva P-V completa

Sistemas	Parametrizado por β (metodologia proposta)	Parametrizado por V da barra crítica Iterações
IEEE 14	66*	72
IEEE 300	48*	58

* incluindo o caso base e os quatro pontos parametrizado por λ - Fonte: Dados da pesquisa da própria autora

Ao utilizar o método proposto, o PMC e todas as curvas P-V podem ser facilmente calculadas devido à remoção da singularidade da matriz Jacobiana quando β é utilizado como parâmetro da continuação.

4.2 FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO: FORMULAÇÃO VIA INJEÇÃO DE CORRENTE

O FPC via injeção de potência (FPCIP) foi apresentado no Capítulo 2. Neste capítulo será apresentado o FPC via injeção de corrente. Também, serão apresentados os testes e resultados comparando as duas formulações para o método da continuação.

Para a formulação do FPC utilizando equações de injeção de corrente, com as tensões nodais expressas em termos de coordenadas polares, o SEP é representado por:

$$\Delta \mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|, \lambda) = 0 \quad (117)$$

em que:

- $\Delta \mathbf{F}$ é o vetor das equações dos *mismatches* de corrente complexa;
- $\boldsymbol{\theta}$ é o vetor dos ângulos de fase nodais;
- $|\mathbf{V}|$ é o vetor das magnitudes das tensões nodais;
- λ é o fator de carregamento.

Para aplicar as técnicas de parametrização local (descritas na seção anterior), as equações dos *mismatches* de corrente do FP devem ser reformuladas para incluir o parâmetro de carregamento λ . Assim, as novas equações são dadas por:

$$\left. \begin{aligned} \Delta G_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|, \lambda) &= \left| \frac{S_{spk}}{V_k} \right| \cos(-\varphi_k + \theta_k) - \sum_{i=1}^n |Y_{ki} V_i| \cos(\phi_{ki} + \theta_i) = 0 \\ \Delta H_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|, \lambda) &= \left| \frac{S_{spk}}{V_k} \right| \sin(-\varphi_k + \theta_k) - \sum_{i=1}^n |Y_{ki} V_i| \sin(\phi_{ki} + \theta_i) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (118)$$

sendo:

- $\Delta G_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|, \lambda)$ a parte real do *mismatch* de corrente na barra k ;
- $\Delta H_k(\boldsymbol{\theta}, |\mathbf{V}|, \lambda)$ a parte imaginária do *mismatch* de corrente na barra k ;
- $S_{spk} = \lambda(P_{gerk} - P_{cgk}) + j(Q_{gerk} - \lambda Q_{cgk})$

Após determinar a solução $(\theta_0, |V|_0, \lambda_0 = 1)$ da equação (117) para o caso base, através do método FP utilizando as equações de injeção de corrente, é necessário executar um passo preditor para encontrar uma estimativa para a próxima solução $(\theta_n, |V|_n, \lambda_n)$ e um passo corretor para corrigir a solução estimada. Nas próximas subseções apresentam-se os passos de predição e correção para os métodos:

- Fluxo de potência continuado por injeção de corrente (**FPCIC**),
- Fluxo de potência continuado por injeção de corrente modificado (**FPCICM**)
- Fluxo de potência continuado via injeção de corrente com Q como variável (**FPCICQ**)
- Fluxo de potência continuado via injeção de corrente híbrido (**FPCICH**)

4.2.1 Passo Preditor e Corretor para o método FPCIC

- *Passo Preditor para o FPCIC*

Para o método FPC que utiliza as equações de Injeção de Corrente (FPCIC), o vetor tangente $[d\theta^t \ d|V|^t \ d\lambda]^t$ é determinado fazendo o diferencial do sistema de equações (118). O sistema de equações linearizado, de acordo com o Método de N-R, na etapa da predição, sendo o parâmetro da continuação o fator de carregamento λ é dado por:

$$\begin{bmatrix} \boxed{J_1} & \boxed{J_2} \\ \boxed{J_3} & \boxed{J_4} \\ \boxed{0} & \boxed{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boxed{G_\lambda} \\ \boxed{H_\lambda} \\ \boxed{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ d|V| \\ d\lambda \end{bmatrix} = J_{IM} \mathbf{t} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (119)$$

no qual $J_1 = \frac{\partial \Delta G(\theta, |V|, \lambda)}{\partial \theta}$, $J_2 = \frac{\partial \Delta G(\theta, |V|, \lambda)}{\partial |V|}$, $J_3 = \frac{\partial \Delta H(\theta, |V|, \lambda)}{\partial \theta}$ e $J_4 = \frac{\partial \Delta H(\theta, |V|, \lambda)}{\partial |V|}$, são submatrizes que compõem a matriz Jacobiana J_I do FP baseado nas equações de injeção de corrente, conforme (equação 118) e $G_\lambda = \frac{\partial \Delta G(\theta, |V|, \lambda)}{\partial \lambda}$ e $H_\lambda = \frac{\partial \Delta H(\theta, |V|, \lambda)}{\partial \lambda}$. O vetor linha adicionado impõe a variação do parâmetro da continuação, no caso λ .

Após resolver a equação (119), obtém-se o vetor tangente $\mathbf{t}$, e multiplicando-o pelo tamanho do passo (σ) e somando o resultado com a solução correta atual (v) tem-se a nova solução estimada (e), ou seja:

$$\begin{bmatrix} \theta \\ |V| \\ \lambda \end{bmatrix}^e = \begin{bmatrix} \theta \\ |V| \\ \lambda \end{bmatrix}^v + \sigma \begin{bmatrix} d\theta \\ d|V| \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (120)$$

- *Passo Corretor para o FPCIC*

Sendo o parâmetro da continuação o fator de carregamento λ , o sistema de equações linearizado de acordo com o método de N-R, a ser resolvido na etapa de correção é dado por:

$$-[J_{IM}] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V| \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta G \\ \Delta H \\ 0 \end{bmatrix} \quad (121)$$

Neste caso, o passo corretor é a execução de um FPCIC a partir do ponto estimado ‘e’. Após determinar o vetor das correções atualizam-se os estados para a iteração $j+1$ de acordo com:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ |\mathbf{V}| \\ \lambda \end{bmatrix}^{j+1} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ |\mathbf{V}| \\ \lambda \end{bmatrix}^j + \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta |\mathbf{V}| \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (122)$$

e assim, ao final do processo iterativo, a solução correta é obtida a partir da solução estimada.

4.2.2 Passo Preditor e Corretor para o método FPCICM

- *Passo Preditor para o FPCICM*

Para o método FPCICM, o vetor tangente $\mathbf{t}$ é dado por:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}'_1 & \mathbf{J}'_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{G}_\lambda \\ \mathbf{H}_\lambda \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\boldsymbol{\theta} \\ d|\mathbf{V}| \\ d\lambda \end{bmatrix} = \mathbf{J}'_{IM} \mathbf{t} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (123)$$

no qual $\mathbf{J}'_1$, $\mathbf{J}'_2$, $\mathbf{J}_3$ e $\mathbf{J}_4$ são submatrizes que compõem a matriz Jacobiana $\mathbf{J}'_I$ de injeção de corrente, conforme (equação 76). Após determinar o vetor tangente, o estado (ângulos e magnitudes da tensão nodal) do sistema é atualizado de acordo com (equação 120).

- *Passo Corretor para o FPCICM*

O sistema de equações linearizado de acordo com o método de N-R, a ser resolvido na etapa de correção, em cada iteração, sendo o parâmetro da continuação o fator de carregamento λ , é dado por:

$$-\mathbf{J}'_{IM} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta |\mathbf{V}| \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{G} \\ \Delta \mathbf{H} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (124)$$

Após determinar o vetor das correções atualizam-se os estados para a iteração $j+1$ de acordo com (122)

4.2.3 Passo Preditor e Corretor para o método FPCICQ

- *Passo Preditor para o FPCICQ*

Para o método FPCICQ, o vetor tangente $\mathbf{t}$ é dado da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \boxed{\mathbf{J}_1} & \boxed{\mathbf{J}_2} & \boxed{\mathbf{J}_2''} \\ \boxed{\mathbf{J}_3} & \boxed{\mathbf{J}_4} & \boxed{\mathbf{J}_4''} \\ \boxed{\mathbf{0}} & \boxed{\mathbf{0}} & \boxed{\mathbf{0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boxed{\mathbf{G}_\lambda} \\ \boxed{\mathbf{H}_\lambda} \\ \boxed{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\boldsymbol{\theta} \\ d|\mathbf{V}| \\ d\lambda \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{\text{IM}}'' \mathbf{t} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (125)$$

no qual $\mathbf{J}_1$, $\mathbf{J}_2$, $\mathbf{J}_2''$, $\mathbf{J}_3$, $\mathbf{J}_4$ e $\mathbf{J}_4''$ são submatrizes que compõem a matriz Jacobiana $\mathbf{J}_I''$ de injeção de corrente, conforme Oliveira (2016). Atualiza-se o estado da rede conforme (equação 120).

- *Passo Corretor para o FPCICQ*

O sistema de equações linearizado de acordo com o método de N-R, a ser resolvido na etapa de correção, em cada iteração, sendo o parâmetro da continuação o fator de carregamento λ , é dado por:

$$-\mathbf{J}_{\text{IM}}'' \begin{bmatrix} \Delta\boldsymbol{\theta} \\ \Delta|\mathbf{V}| \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{G} \\ \Delta\mathbf{H} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (126)$$

A atualização do estado é realizada através da equação (122). E ao final do processo, a solução correta é atingida a partir da solução estimada.

4.2.4 Passo Preditor e Corretor para o método FPCICH

- *Passo Preditor para o FPCICH*

Para o método FPCICH, o vetor tangente $\mathbf{t}$ é dado por:

$$\begin{bmatrix} \boxed{\mathbf{J}_1} & \boxed{\mathbf{J}_2} & \boxed{\Delta\mathbf{G}_{pq,\lambda}} \\ \boxed{\mathbf{J}_3} & \boxed{\mathbf{J}_4} & \boxed{\Delta\mathbf{P}'_{pv,\lambda}} \\ \boxed{\mathbf{0}} & \boxed{\mathbf{0}} & \boxed{\Delta\mathbf{H}_{pq}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\boldsymbol{\theta} \\ d|\mathbf{V}| \\ d\lambda \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{\text{HM}} \mathbf{t} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (127)$$

no qual $\mathbf{J}_1$, $\mathbf{J}_2$, $\mathbf{J}_3$, e $\mathbf{J}_4$ são submatrizes que compõem a matriz Jacobiana $\mathbf{J}_H$ e injeção de corrente, conforme (83). Atualiza-se o estado da rede conforme (120).

- *Passo Corretor para o FPCICH*

O sistema de equações linearizado de acordo com o método de N-R, a ser resolvido na etapa de correção, em cada iteração, sendo o parâmetro da continuação o fator de carregamento λ , é dado por:

$$-J_{HM} \begin{bmatrix} \Delta\theta_{pq} \\ \Delta\theta_{pv} \\ \frac{\Delta|V|_{pq}}{\Delta\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta G_{pq} \\ \Delta P'_{pv} \\ \frac{\Delta H_{pq}}{0} \end{bmatrix} \quad (128)$$

Após obter-se a solução correta, a atualização do estado é realizada através da equação (122).

4.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS SISTEMAS

A matriz Jacobiana das equações do FP é singular no PMC e assim não é possível obter este ponto. Dessa forma, os métodos FPC tornam-se um grande recurso, pois possibilitam a obtenção de toda a curva P-V, incluindo o próprio λ_{max} . Neste item apresentam-se os resultados de desempenho dos cinco métodos (FPCIP, FPCIC, FPCICQ, FPCICM e FPCICH) para o traçado das curvas P-V, e a determinação do PMC e da tensão crítica dos sistemas do IEEE-14, 57,118 e 300 barras e duas versões reais de grande porte do sistema elétrico de potência SUL/SUDESTE brasileiro de 638 e 787 barras, partindo da condição definida no BD.

Para todos os métodos, adotou-se como critério de convergência, o máximo valor absoluto do vetor de resíduos, de acordo com a equação:

$$\mathbf{R} = [\Delta\mathbf{PT}, \Delta\mathbf{QT}]^t (||\mathbf{R}||_{\infty} = \max\{||R_i||\}) \quad (129)$$

A tolerância adotada para o máximo valor absoluto do vetor de resíduos foi de 10^{-5} p.u.

A consideração dos limites de potência reativa (Q) nas barras PV's é feito de acordo com o procedimento descrito em Monticelli (1983). A cada iteração, a geração de reativos é comparada com seus respectivos limites e no caso de violação o tipo da barra é alterado para PQ, podendo voltar a ser PV nas iterações subsequentes.

O fator de carregamento é usado para simular incrementos de carga ativa e reativa, considerando fator de potência constante e proporcional ao carregamento do caso base com

modelo de carga de potência constante, visto que este fornece a condição operacional mais segura para o sistema (WSCC, 1998). Cada aumento de carga é seguido por um aumento de geração equivalente usando λ (AJJARAPU, 2010). Considera-se que os métodos Não Convergem (NC) quando o número de iterações for maior que 20 ou processo iterativo divergir.

Observa-se que para os sistemas de 14, 30, 57, 118 e 787 barras, utilizou-se o fator de carregamento $\lambda = 1$, uma vez que o caso base encontrava-se mais distante do PMC da curva P-V. Por outro lado, para obter um número razoável de pontos, e com isso comparar o desempenho dos métodos num trecho maior no decorrer do traçado da curva P-V, para os sistemas de 300 e 638 barras foram considerados fatores de carregamento iguais a 0,6 e 0,95 p.u., respectivamente.

4.3.1 Desempenho dos Métodos para o traçado da curva P-V e obtenção do PMC considerando os mesmos pontos previstos

Para todos os métodos foi utilizado o mesmo preditor tangente, de forma a garantir que os métodos obtivessem os mesmos pontos previstos na curva P-V durante a etapa da previsão. O tamanho do passo σ^0 escolhido para realizar o controle de passo foi de 0,1.

4.3.1.1 Análise de desempenho para sistemas do IEEE

A Figura 32(a) apresenta, a partir do caso base, para o sistema de 14 barras, os pontos obtidos pelos passos preditor e corretor durante o traçado da curva P-V. Nas Figuras 32(b) e (c) têm-se as correspondentes magnitudes da tensão da barra crítica e número de iterações obtidas pelos respectivos métodos. As figuras confirmam que todos os pontos, previstos e corrigidos, são os mesmos para os cinco métodos.

As Figuras 4.33(a), 4.34(a), 4.35(a) e 4.36(a) apresentam, respectivamente, as correspondentes magnitudes da tensão da barra crítica dos sistemas IEEE-30, -57, -118 e -300 barras. Nas Figuras 4.33(b), 4.34(b), 4.35(b) e 4.36(b) têm-se o número de iterações obtidas pelos respectivos métodos.

Figura 32(a): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-14: Curva P-V da barra crítica (14)

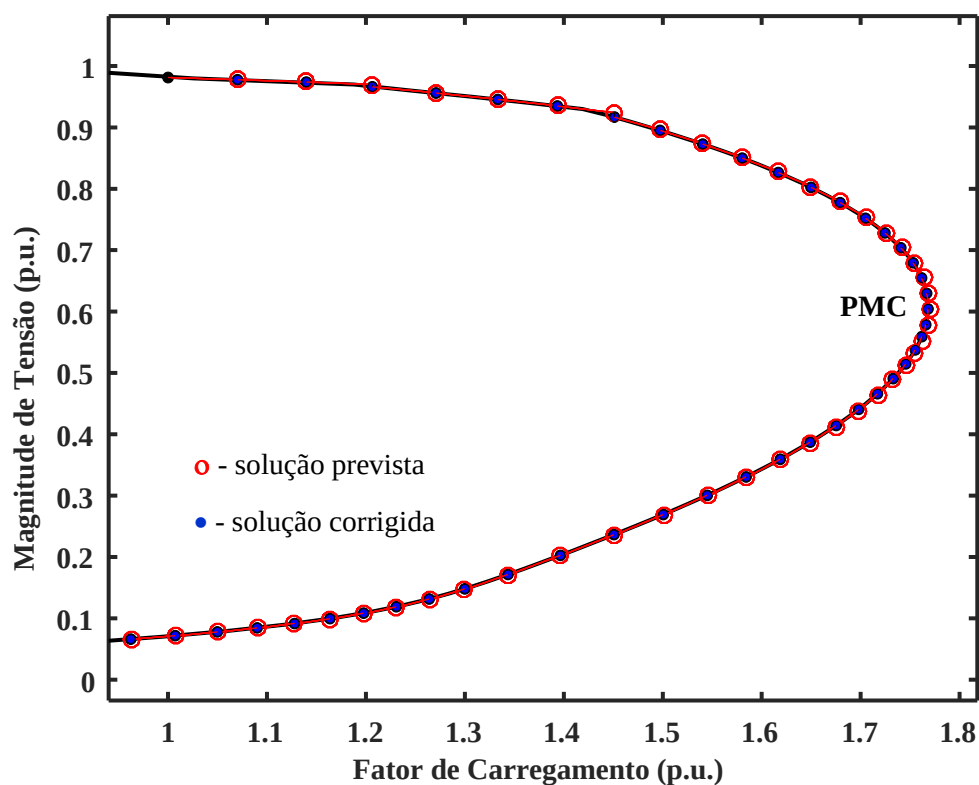
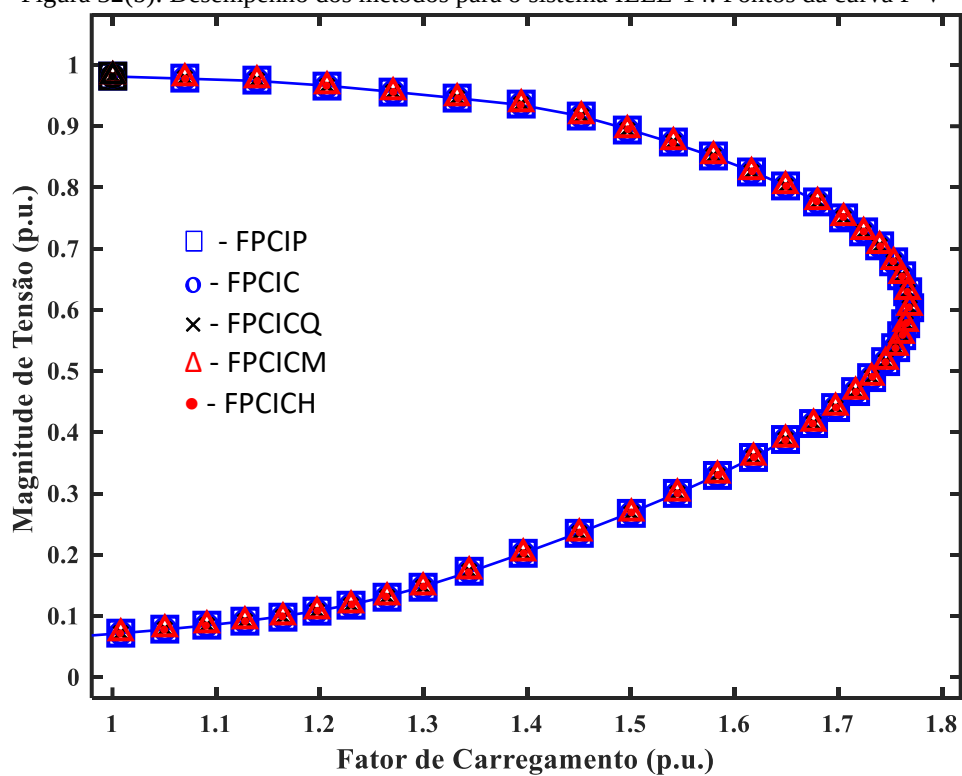
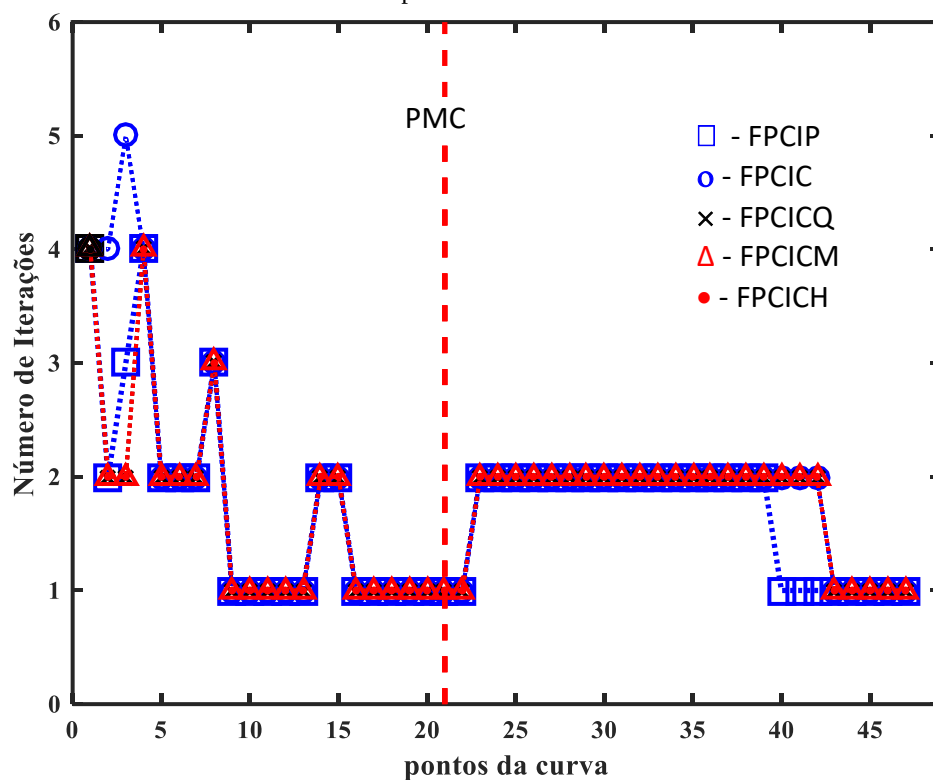


Figura 32(b): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-14: Pontos da curva P-V



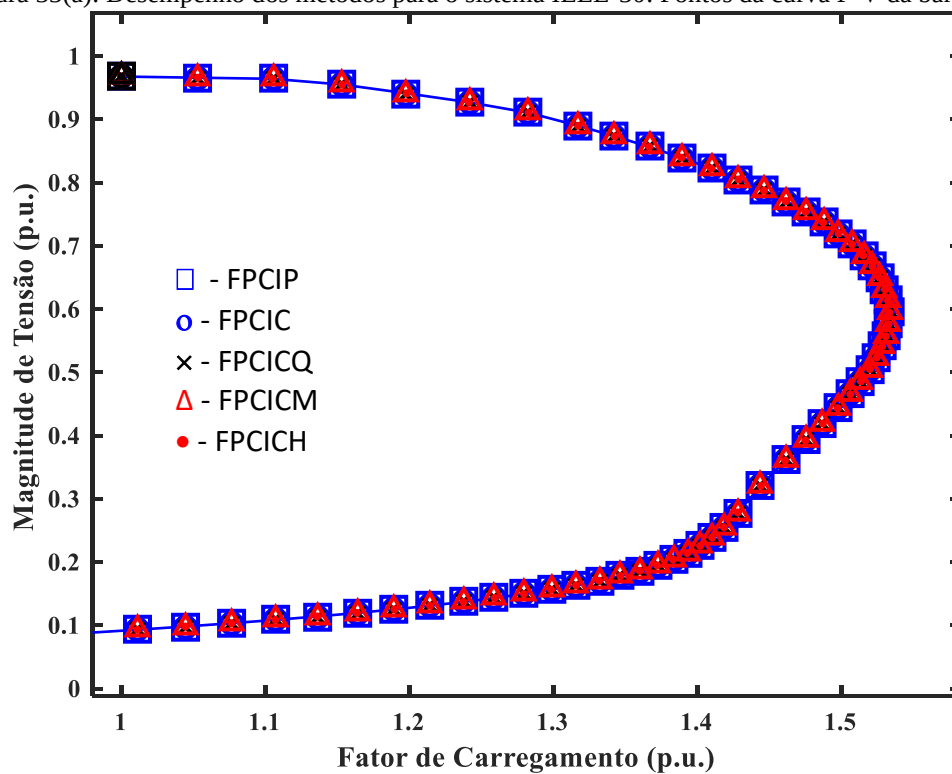
Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 32(c): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-14: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos



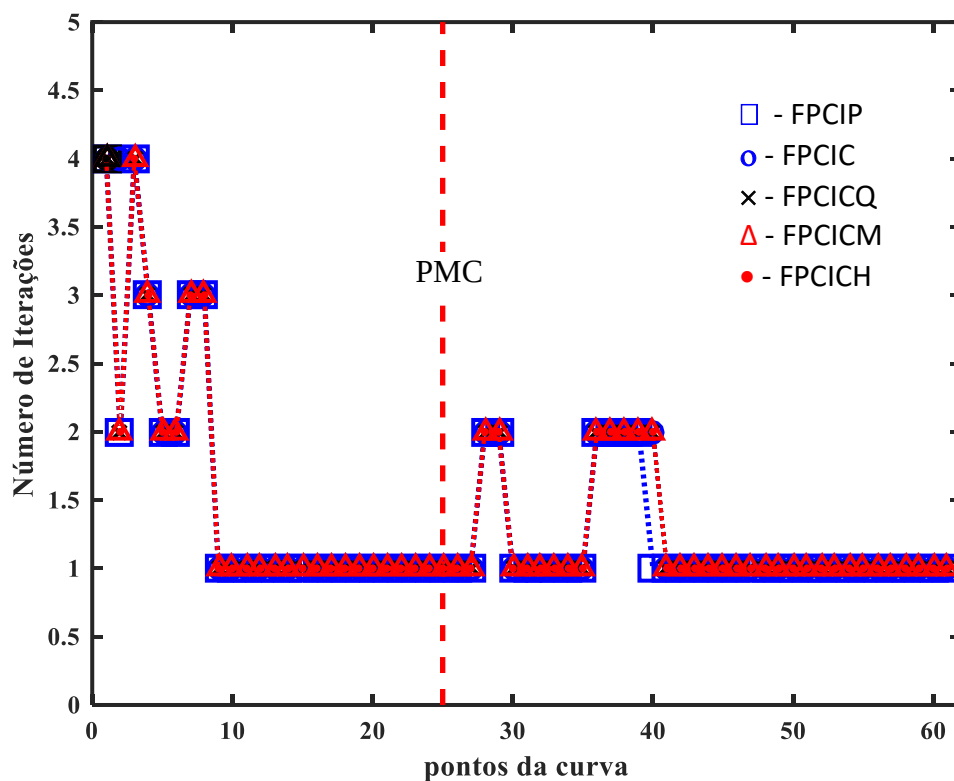
Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 33(a): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-30: Pontos da curva P-V da barra 30



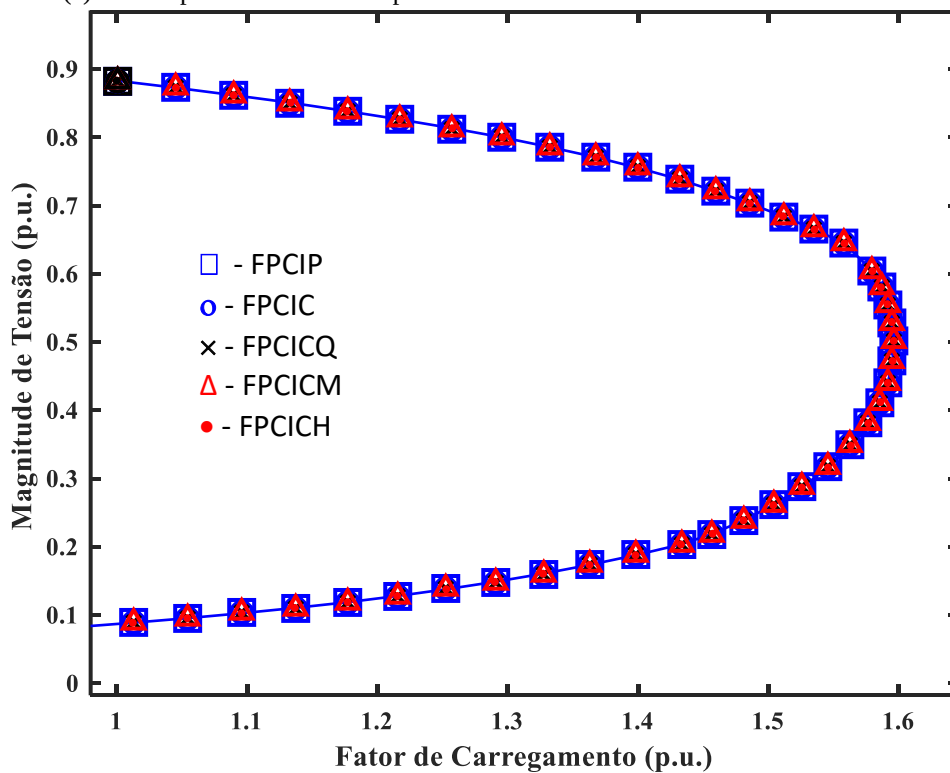
Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 33(b): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-30: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos



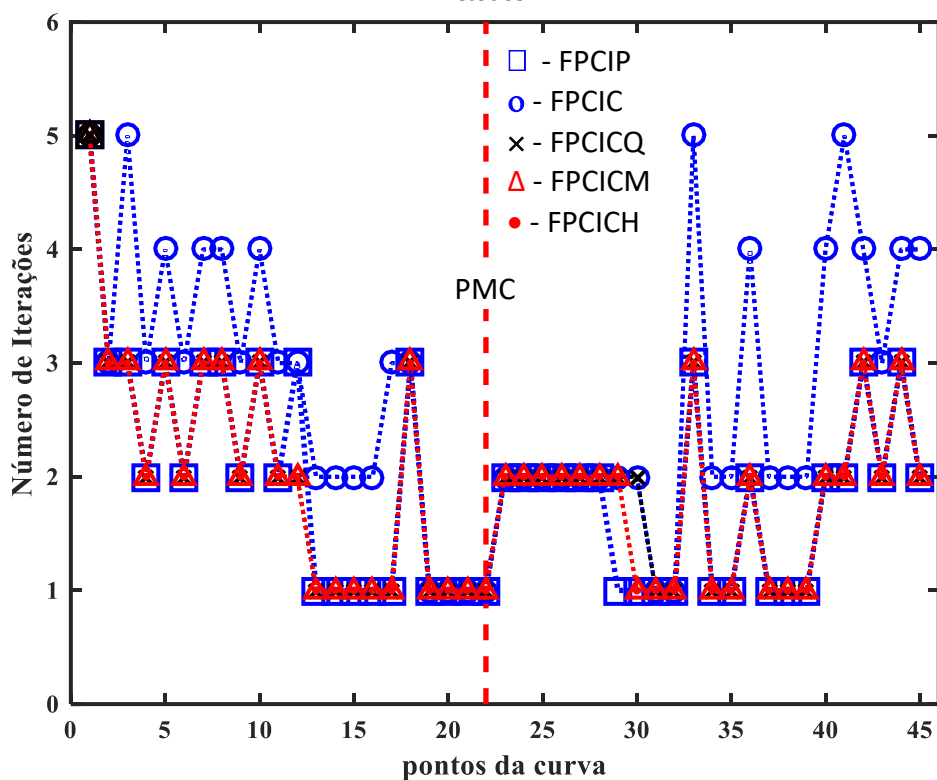
Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 34(a): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-57: Pontos da curva P-V da barra 31



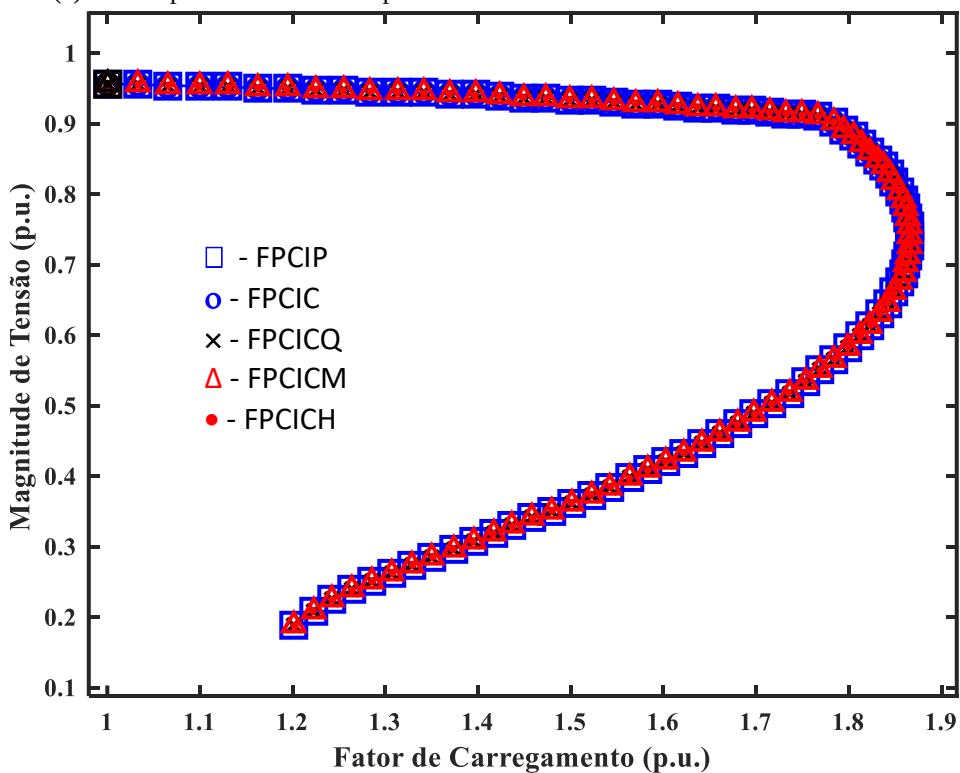
Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 34(b): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-57: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos



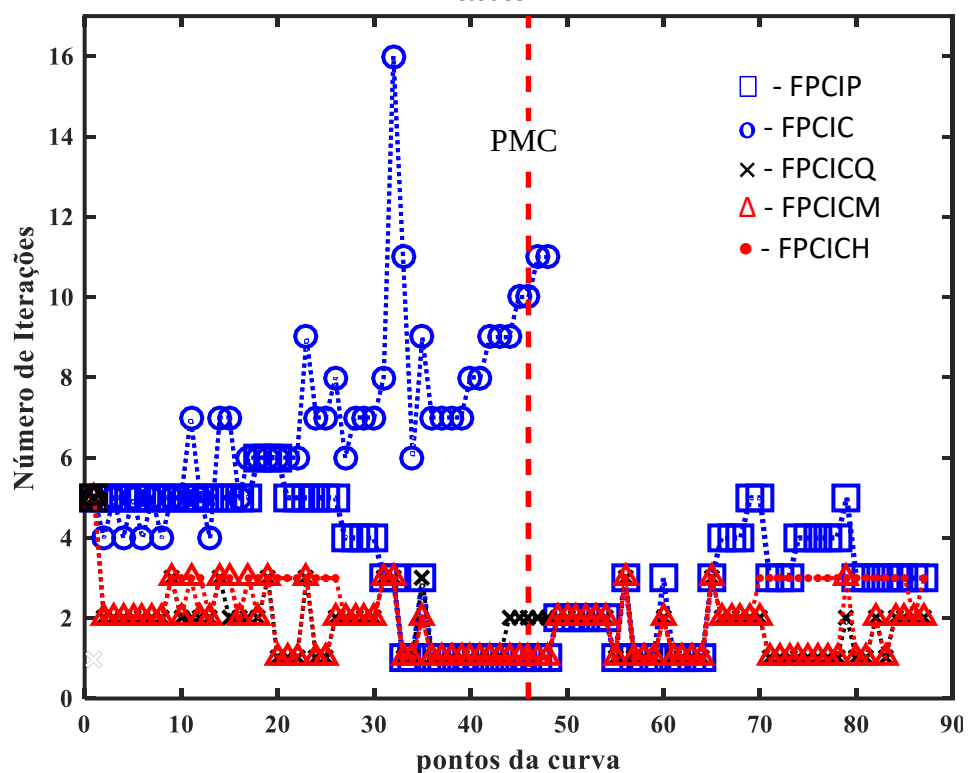
Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 35(a): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-118: Pontos da curva P-V da barra 52



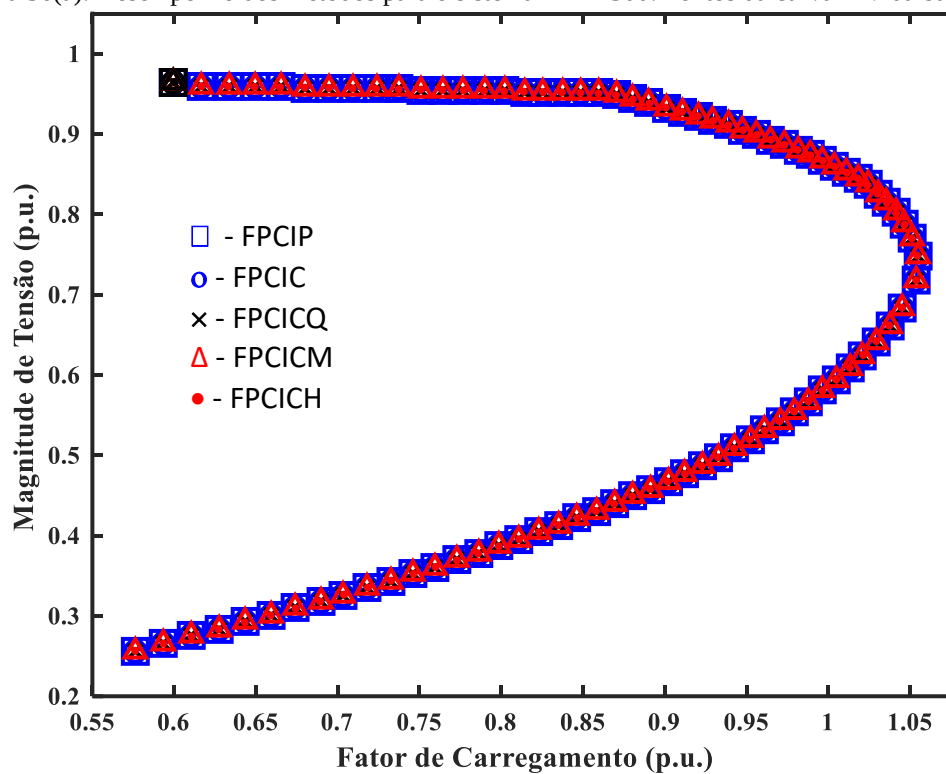
Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 35(b): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-118: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos



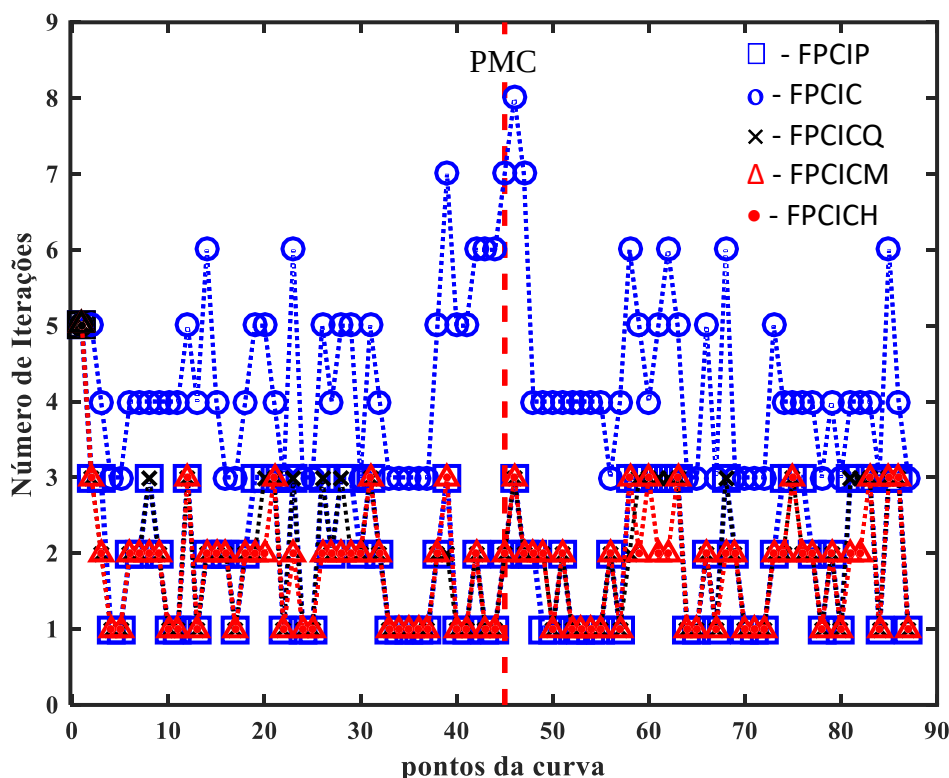
Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 36(a): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-300: Pontos da curva P-V da barra 526



Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 36(b): Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-300: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos



Fonte: Elaboração da própria autora

De forma geral, observa-se que todos os métodos convergiram para todos os sistemas. Entretanto, o método FPCIC não conseguiu realizar o traçado completo da curva P-V para o sistema 118 barras, embora tenha conseguido obter o PMC, como mostra a Figura 35(b).

Na Tabela 34 são comparados os NTI para o traçado completo da curva P-V, os Números Totais de Iterações para atingir o Ponto Máximo de Carregamento (NTIPMC) da curva P-V e os respectivos valores obtidos para o PMC e a magnitude de tensão da barra crítica (V_{crit}) de cada um dos sistemas analisados.

Aferindo os dados da Tabela 34, nota-se que para os sistemas IEEE-14, -30 e -57 barras, os NTI são muito próximos, exceto para o método FPIC que no caso do sistema IEEE-57 barras, apresentou um maior número de iterações em relação aos demais métodos. No caso do sistema IEEE-118 barras, o método PFCIC não foi capaz de traçar toda a curva P-V, enquanto que as demais metodologias apresentaram resultados mais próximos, sendo o FPCICM e o FPCICQ os métodos com melhor desempenho em comparação com os demais. Observa-se que o FPCICH apresenta um desempenho melhor que o FPCIP tanto para o IEEE-118 quanto para o -300 barras, e que o FPCICQ no caso do IEEE-300. Também, como se verá na tabela seguinte, mais próximo do desempenho dos FPCICM e o FPCICQ.

Dos resultados vê-se que o FPCIC apresentou o pior desempenho para o NTIPMC. Com relação aos demais métodos, estes praticamente apresentam o mesmo número de iterações, para a obtenção do PMC, para os sistemas IEEE-14, -30 e -57 barras, diferindo apenas para o IEEE-118. Observa-se um melhor desempenho do FPCICH quando comparado ao do FPCIP, e uma melhora quando comparado ao dos FPCICM e o FPCICQ.

Tabela 34: Desempenho dos métodos considerando o mesmo preditor tangente

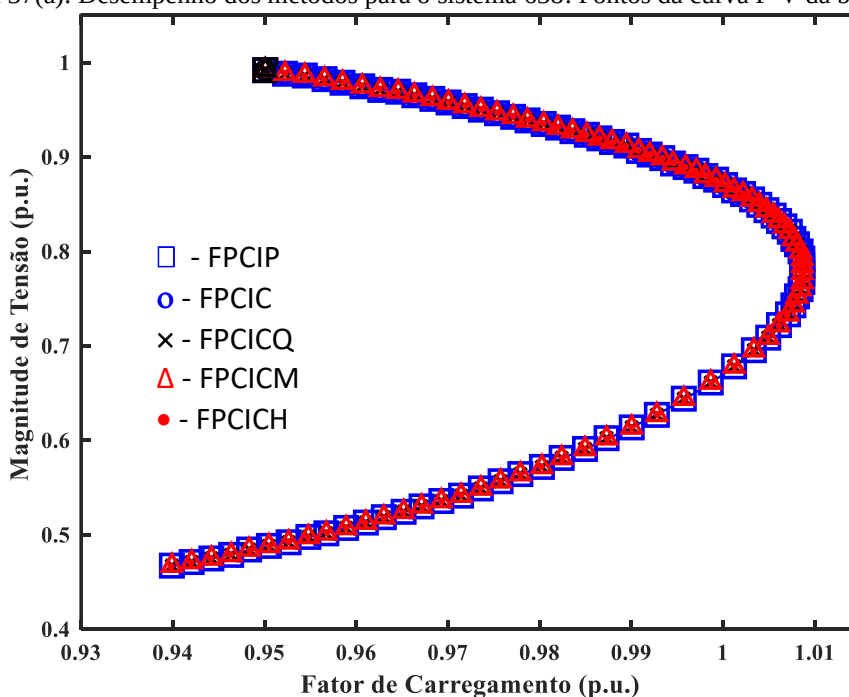
Sistemas	FPCIP	FPCIC	FPCICQ	FPCICM	FPCICH	PMC	$V_{crít.}$ (p.u.)
	NTIPMC/NTI	NTIPMC/NTI	NTIPMC/NTI	NTIPMC/NTI	NTIPMC/NTI		
14	37/80	41/87	36/82	36/82	36/82	1,7680	0,6042
30	40/82	42/85	40/83	40/83	40/83	1,5335	0,5951
57	46/86	62/123	45/87	45/86	45/86	1,5960	0,5020
118	171/282	316/338**	87/152	86/150	100/191	1,8664	0,7443
300	88/171	195/371	84/165	80/156	80/156	1,0544	0,7487

**Não traça a curva toda - Fonte: Dados da pesquisa da autora

4.3.1.2 Análise de desempenho para os sistemas de grande porte

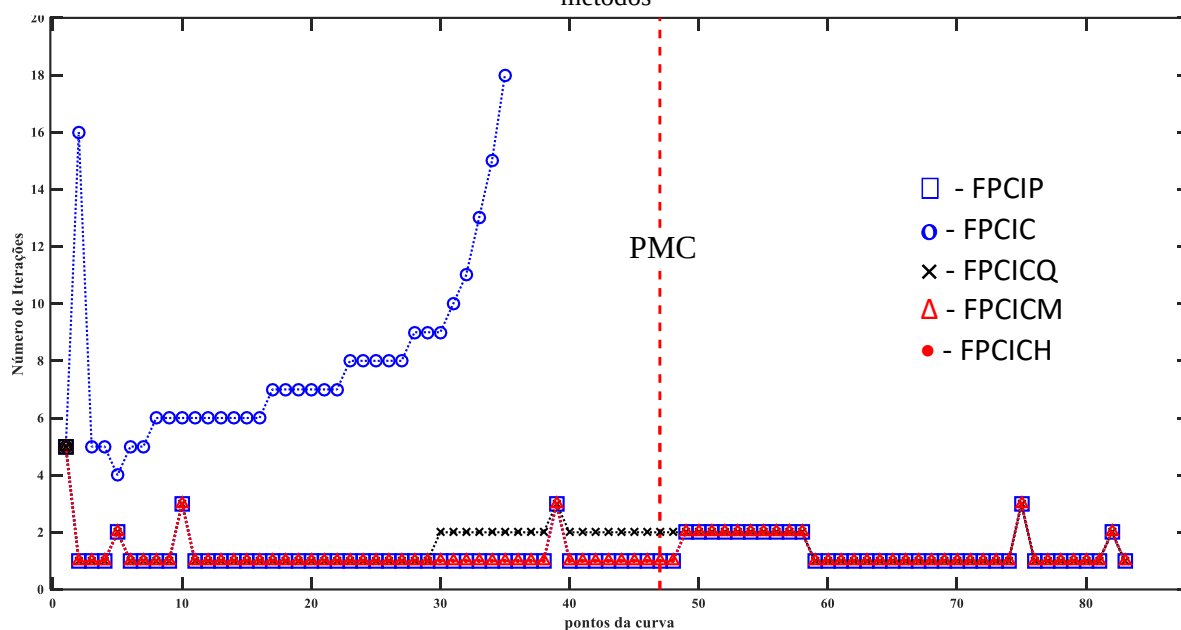
As Figuras 37(a) e 38(a) apresentam as duas versões reais do sistema elétrico de potência Sul/Sudeste brasileiro, 638 e 787 barras, respectivamente, as correspondentes magnitudes da tensão da barra crítica, enquanto que nas Figuras 37(b) e 38(b) têm-se o número de iterações obtidas pelos respectivos métodos.

Figura 37(a): Desempenho dos métodos para o sistema 638: Pontos da curva P-V da barra 150



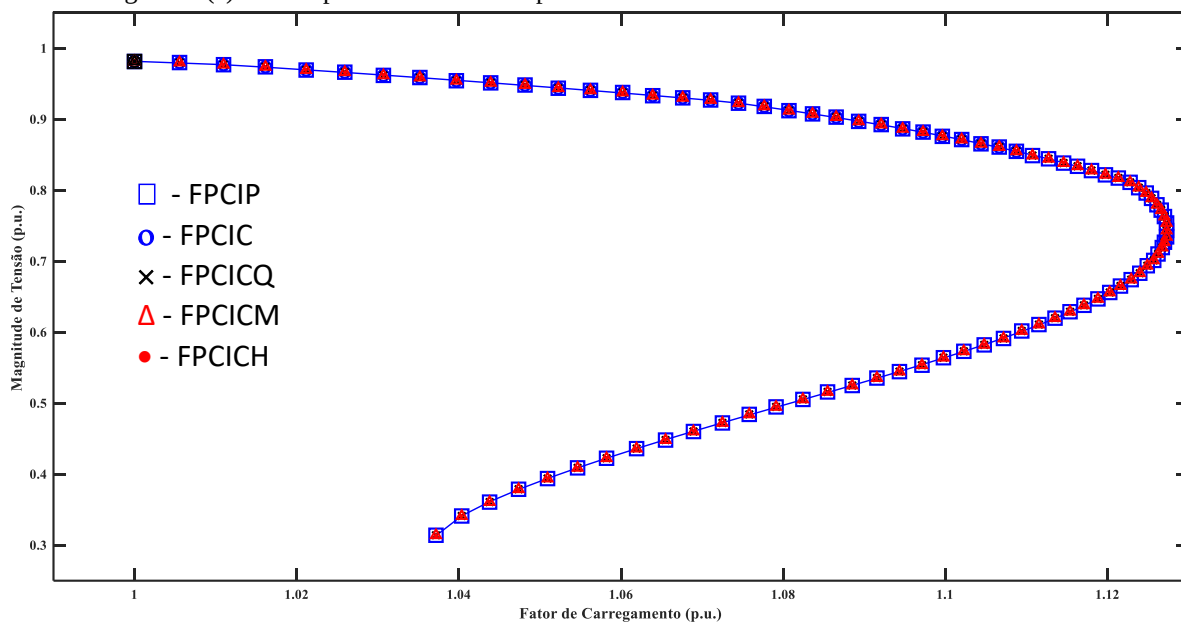
Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 37(b): Desempenho dos métodos para o sistema 638: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos



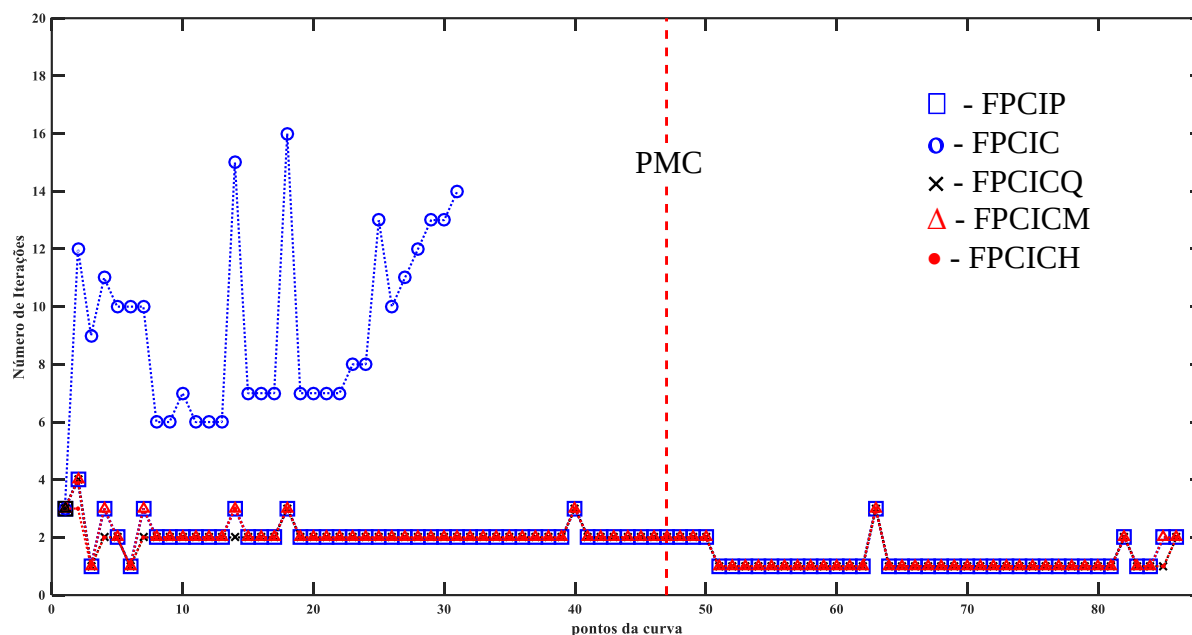
Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 38(a): Desempenho dos métodos para o sistema 787: Pontos da curva P-V da barra 576



Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 38(b): Desempenho dos métodos para o sistema 787: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos



Fonte: Elaboração da própria autora

De forma geral, analisando as Figuras (37 e 38), observa-se que os métodos FPCIP, FPCICQ, FPCICM e FPCICH convergiram para todos os sistemas. O método FPCIC não conseguiu atingir o PMC para os sistemas 638 e 787 barras, ver Figuras 37(b) e 38(b).

Na Tabela 35 são comparados os NTI para o traçado completo da curva P-V, os NTIPMC da curva P-V e os respectivos valores obtidos para o PMC e a magnitude de tensão da barra crítica (V_{crit}) para os sistemas de grande porte. Dos resultados apresentados na tabela observa-se que os métodos FPCIP, FPCICM e FPCICH obtiveram, praticamente o mesmo desempenho, sendo melhor que os dos FPCIC e FPCICQ. O FPCIC apresentou o pior desempenho para o traçado da curva P-V, não alcançando nem o PMC. Conforme os resultados, constata-se que os métodos conseguiram atingir o PMC, exceto o FPCIC que não atinge o ponto para os dois sistemas reais.

Tabela 35: Desempenho dos métodos considerando o mesmo predictor tangente

Sistemas	FPCIP	FPCIC	FPCICQ	FPCICM	FPCICH	PMC	$V_{crit.}$ (p.u.)
	NTIPMC/NTI	NTIPMC/NTI	NTIPMC/NTI	NTIPMC/NTI	NTIPMC/NTI		
638	56/105	*275	73/123	56/105	56/105	1,0087	0,7939
787	100/145	*284	97/143	100/147	97/143	1,1273	0,7543

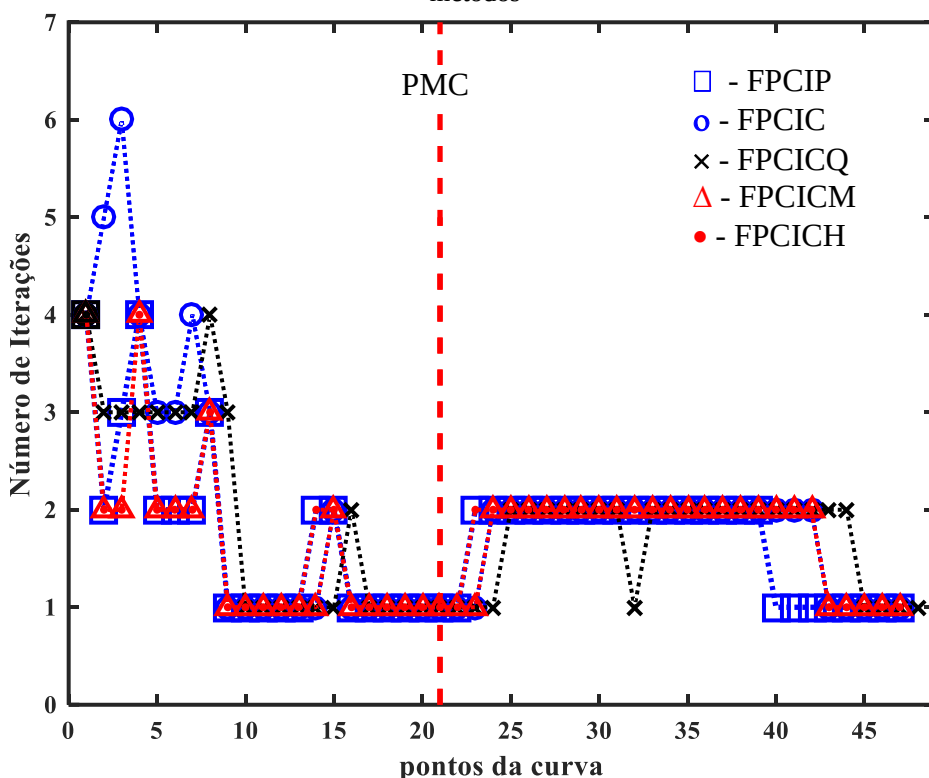
*Não obtém o PMC - Fonte: Dados da pesquisa da autora

4.3.2 Desempenho dos métodos para o traçado da curva P-V e obtenção do PMC considerando os respectivos previstos

Nesses testes utilizou-se, para cada um dos métodos, o seu respectivo preditor tangente. Para fins de comparação de desempenho ajustaram-se os passos (σ^0) de forma que durante o traçado da curva P-V os métodos obtivessem o mesmo número de pontos até atingir o PMC. Para os métodos FPCIP e FPCIC, FPCICM e FPCICH, adotou-se $\sigma = 0,1$ para todos os sistemas. Enquanto que para o método FPCICQ adotou-se $\sigma^0 = 0,1$ para os sistemas 14 e 30 barras; $\sigma^0 = 0,14$ para o de 57 barras; $\sigma^0 = 0,24$ para o de 118; $\sigma^0 = 0,4$ para o de 300; e $\sigma^0 = 0,30$ e $\sigma^0 = 0,63$ para os sistemas 638 e 787, respectivamente.

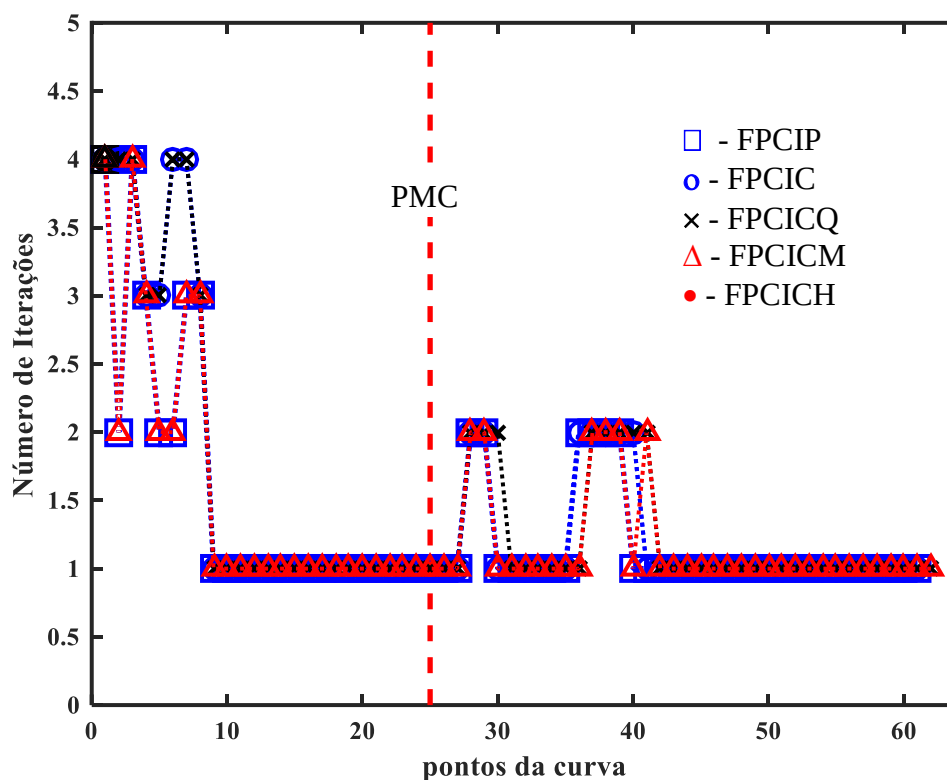
Nas Figuras de 39 a 43, e as 44(b) e 45(b) é apresentado, respectivamente, os correspondentes número de iterações obtidas pelos respectivos métodos para todos os sistemas analisados, enquanto que as Figuras 44(a) e 45(a) apresentam as respectivas magnitudes da tensão da barra crítica dos sistemas Sul/Sudeste brasileiro de 638 e 787 barras.

Figura 39: Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-14 - Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos



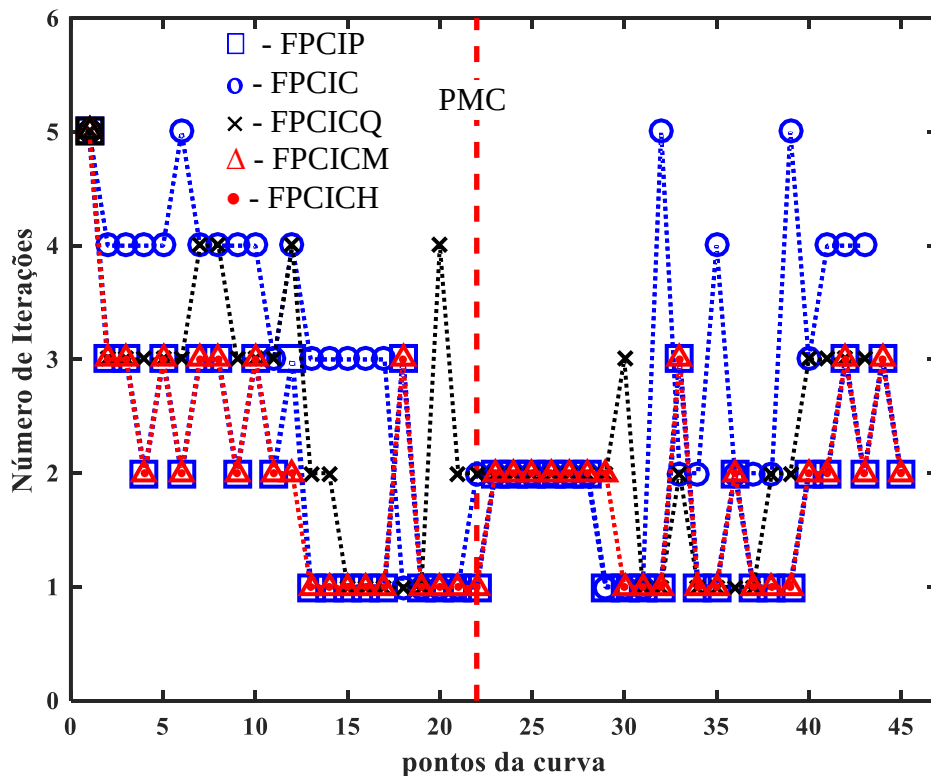
Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 40: Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-30 - Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos



Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 41: Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-57 - Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos



Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 42: Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-118 - Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos

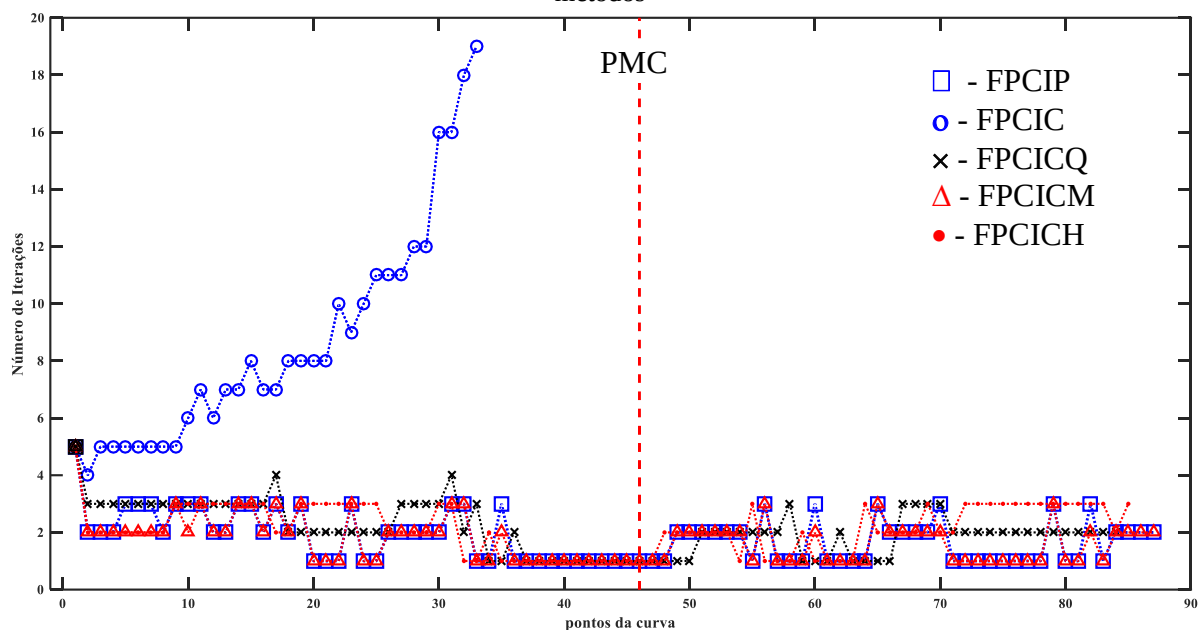


Figura 43: Desempenho dos métodos para o sistema IEEE-300 - Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos

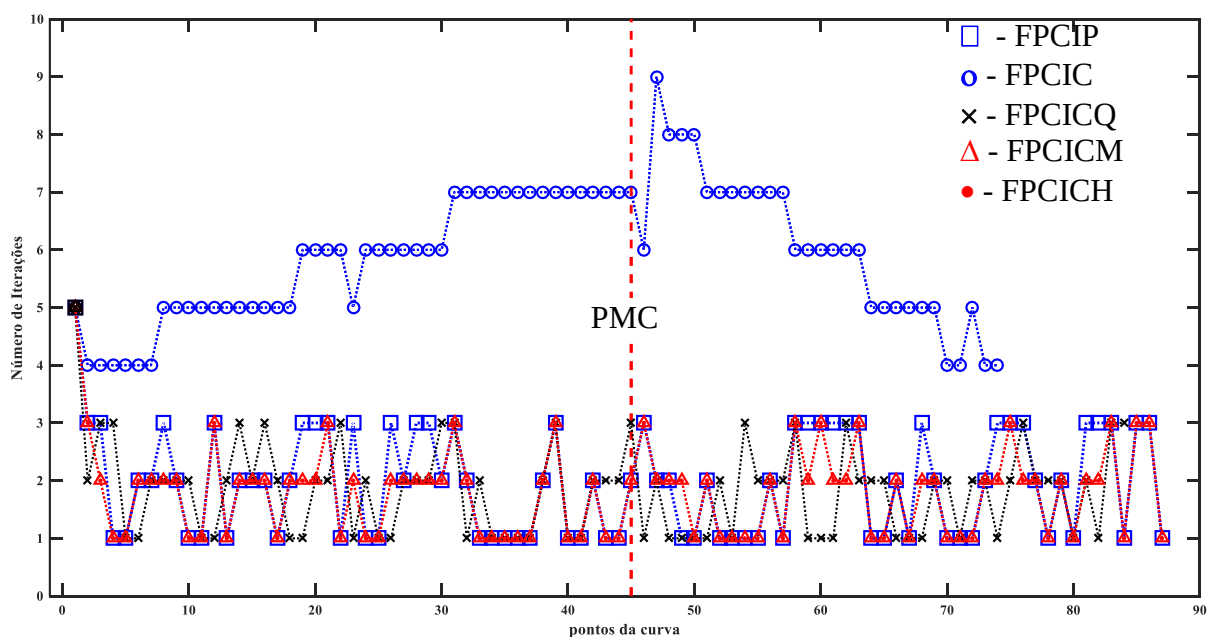
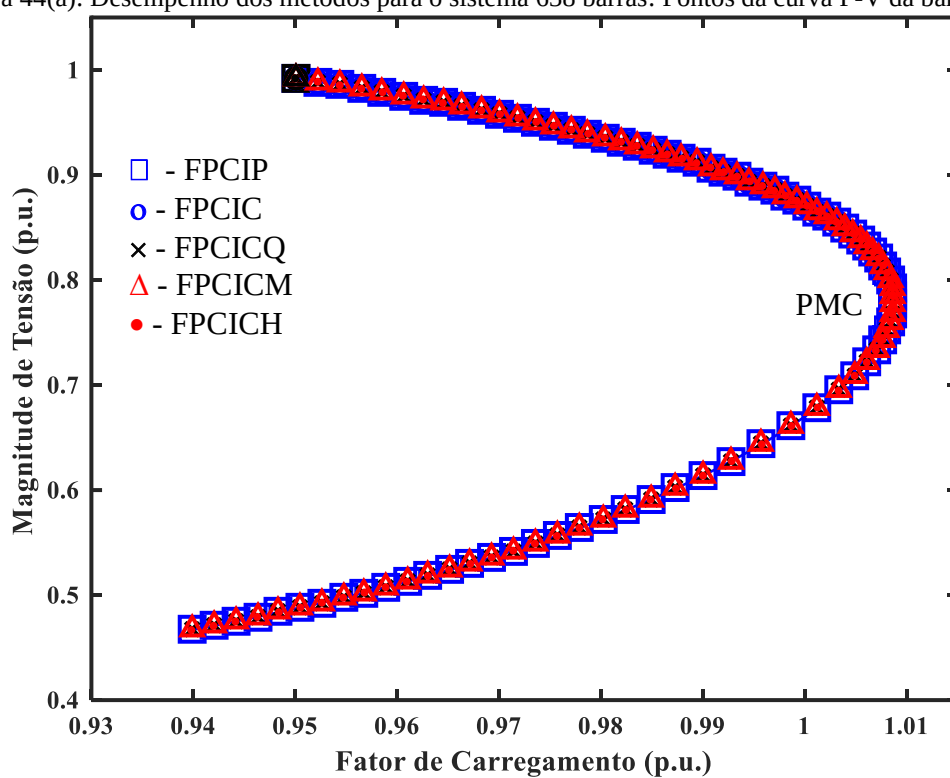
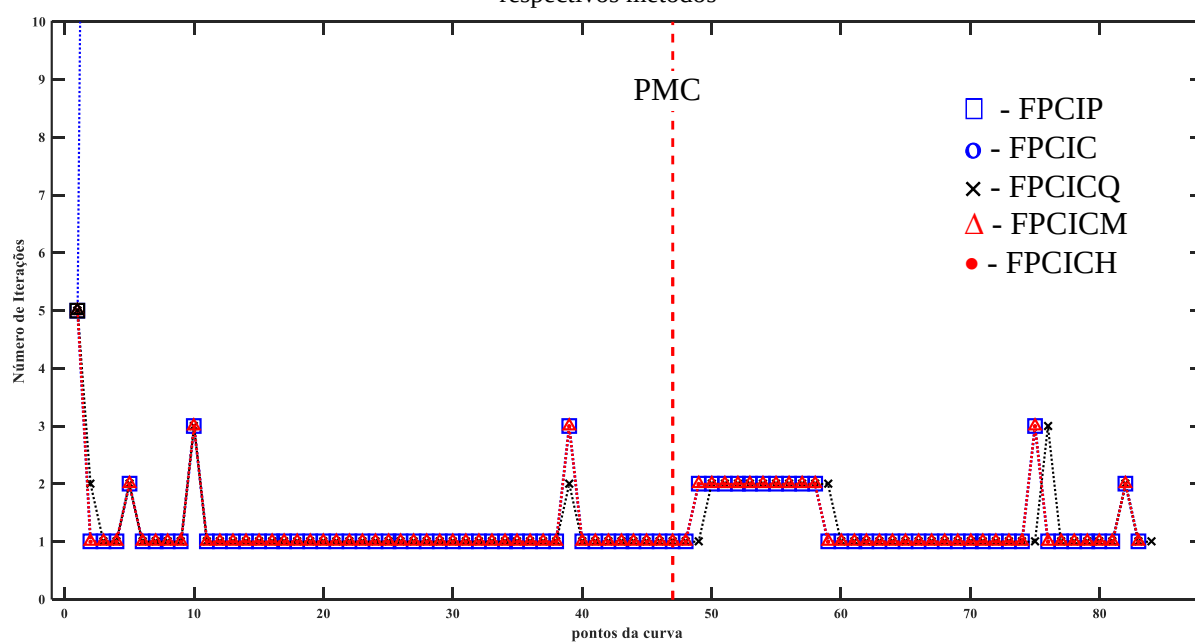


Figura 44(a): Desempenho dos métodos para o sistema 638 barras: Pontos da curva P-V da barra 150



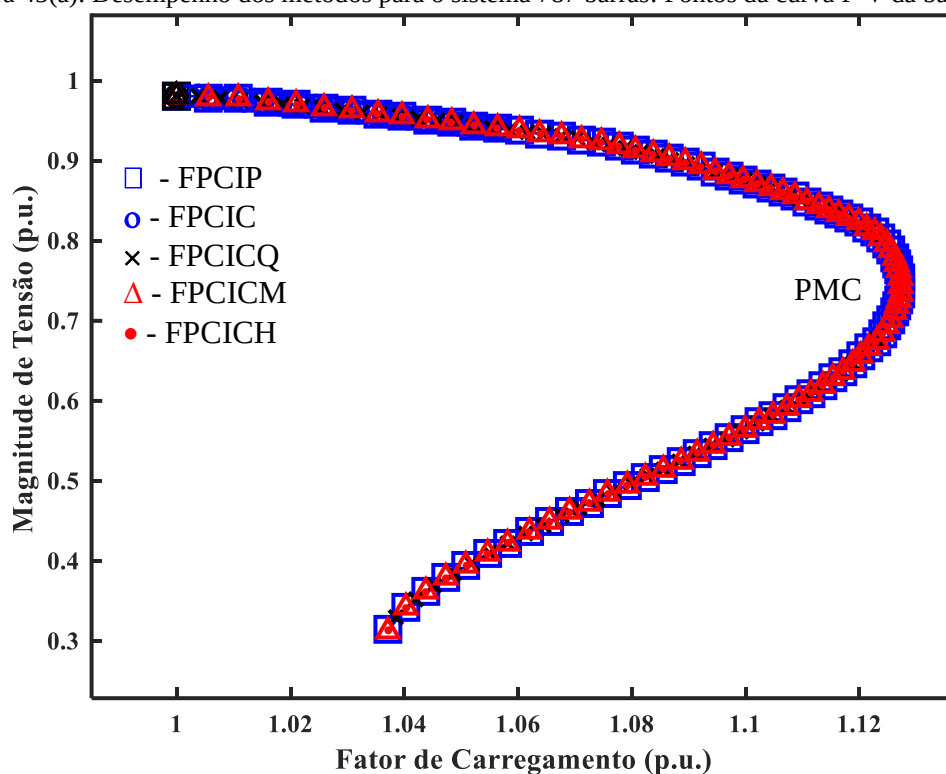
Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 44(b): Desempenho dos métodos para o sistema 638 barras: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos



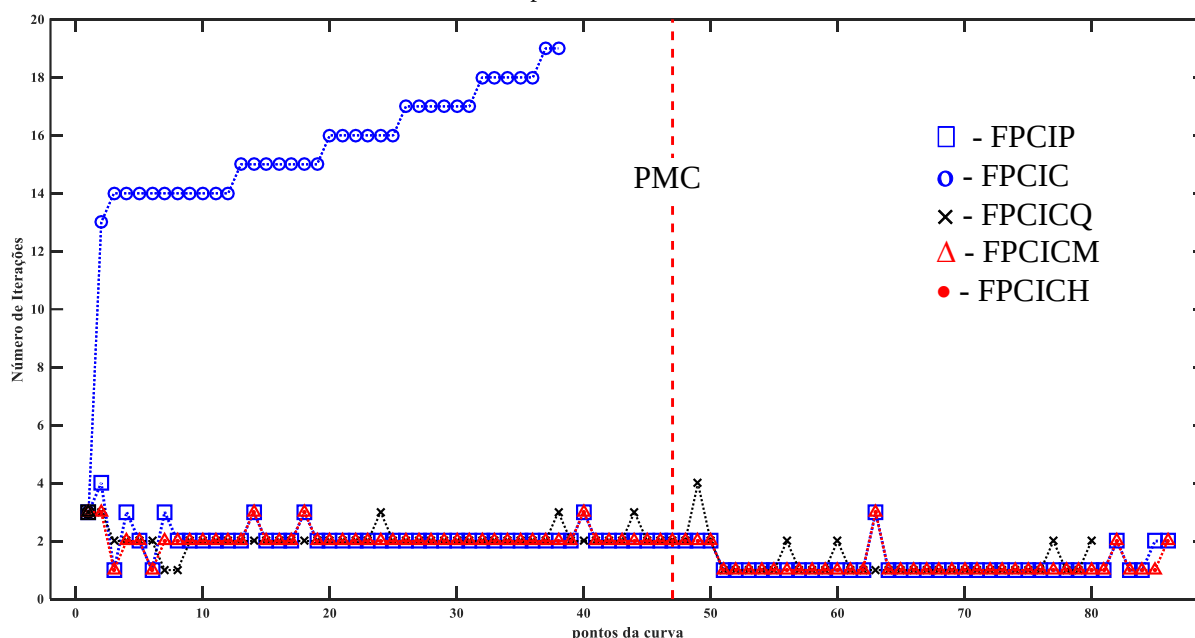
Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 45(a): Desempenho dos métodos para o sistema 787 barras: Pontos da curva P-V da barra 576



Fonte: Elaboração da própria autora

Figura 45(b): Desempenho dos métodos para o sistema 787 barras: Número de iterações obtidas pelos respectivos métodos



Fonte: Elaboração da própria autora

Na Tabela 36 apresenta-se o NTI gastos para o traçado de toda curva P-V, o NTIPMC e os respectivos valores obtidos para o PMC e a magnitude de tensão da barra crítica (V_{crit}) de cada um dos sistemas. Em geral, os valores do PMC e da magnitude da tensão da barra crítica

apresentam pequenas diferenças a partir da terceira casa decimal em virtude das pequenas diferenças entre os pontos previstos pelos respectivos preditores e assim, apresentou-se os valores obtidos pelo FPCIP apenas.

Em linhas gerais, analisando as Figuras é possível verificar que, novamente todos os métodos obtiveram sucesso no traçado da curva P-V e na obtenção do PMC para todos os sistemas analisados, a exceção do método FPCIC, que não conseguiu atingir o PMC para sistemas de 118, 638 e 787 barras.

Tabela 36: Desempenho dos métodos considerando os respectivos preditores tangente

Sistemas	FPCIP NTIPMC/NTI	FPCIC NTIPMC/NTI	FPCICQ NTIPMC/NTI	FPCICM NTIPMC/NTI	FPCICH NTIPMC/NTI	PMC	$V_{crít.}$ (p.u.)
14	37/80	46/96	43/88	35/80	36/82	1.7680	0.6042
30	40/82	46/89	41/83	41/83	40/83	1.5335	0.5951
57	46/86	68/124	58/97	45/86	45/86	1.5960	0.5020
118	91/158	121*121**	109/177	86/150	97/183	1.8664	0.7443
300	88/171	266/435	83/154	80/156	80/156	1.0544	0.7487
638	56/105	508*/508**	56/106	56/105	56//105	1.0087	0.7939
787	100/147	587*/587**	99/139	97/143	97/143	1.1273	0.7543

*Não obtém o PMC - **Não traça a curva toda - Fonte: Dados da pesquisa da autora

Observa-se que os métodos, excetuando o FPCIC, apresentaram um desempenho similar para o traçado das curvas dos sistemas. Dos resultados apresentados na Tabela 36 constata-se, no geral, um desempenho um pouco melhor para as formulações via injeção de corrente, FPCICM, que considera a potência reativa gerada como função das variáveis de estado quando da formação da matriz Jacobiana, e FPCICH, que utiliza a equação do *mismatch* de potência ativa normalizado no caso das barras PV's. Assim, com relação ao método de FPCIC, os resultados também confirmam que o cálculo dos elementos que compõem as submatrizes J_1 e J_2 da matriz Jacobiana considerando a dependência da potência reativa gerada nas barras PV's com as variáveis de estado (FPCICM), ou o uso da equação do *mismatch* de potência ativa normalizado no caso das barras PV's (FPCICH), leva a uma melhora significativa de desempenho. No entanto, observa-se o maior número de operações quando do uso do método FPCICM quando comparado ao FPCICH. Observa-se também a melhora do desempenho alcançado quando do uso no método continuado por injeção de corrente, da injeção de potência reativa da barra PV como uma nova variável. Entretanto, quando comparado aos demais este apresenta como desvantagem o acréscimo do número de equações e, portanto, da dimensão da matriz Jacobiana, proporcionalmente ao número de barras PV's.

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: practical bifurcation and stability analysis**. 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 flow. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 4, p. 760-770, 1989.

VAN CUTSEN, T.; VOURNAS, C. **Voltage stability of electric 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.