

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CAROLINA CORRÊA DURCE

**NORMALIZAÇÃO COMPLEXA E CÁLCULO DE FLUXO DE
POTÊNCIA PARA SISTEMAS ELÉTRICOS EMERGENTES**

Dissertação de Mestrado

CURITIBA
2012

CAROLINA CORRÊA DURCE

**NORMALIZAÇÃO COMPLEXA E CÁLCULO DE FLUXO DE
POTÊNCIA PARA SISTEMAS ELÉTRICOS EMERGENTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre. Área de Concentração: Sistemas de Potência.

Orientadora: Prof.^a Elizete Maria Lourenço

Co-orientador: Prof. Odilon Luís Tortelli

CURITIBA

2012

TERMO DE APROVAÇÃO

Aos meus pais, Janine e Sergei,
aos meus avós Nice e Antônio Carlos
aos meus irmãos, Júlia e Dario
e ao meu namorado, Rafael.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora prof^ª. Elizete Maria Lourenço pelo incentivo confiança, amizade e dedicação. Agradeço também a sua paciência e as diversas conversas que muito me motivaram. A ela a minha enorme admiração profissional e pessoal.

Ao meu co-orientador prof. Odilon Luís Tortelli por ter aceitado participar deste trabalho e pelas importantes contribuições e sugestões.

Aos meus pais e avós pela influência acadêmica e pelo incentivo que sempre deram ao meu estudo.

Aos meus irmãos pela amizade e pelos encontros e almoços na universidade, que muito ajudaram a tornar os meus dias de estudo mais felizes.

Ao meu namorado Rafael pelo amor e companheirismo, pela ajuda e pelos conhecimentos compartilhados, pela paciência, incentivo e dedicação. Por trazer cor à minha vida.

Ao professor Ivan Eidt Colling por colocar o Esperanto na minha vida e pela sua enorme dedicação.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica por ajudarem na minha formação e por terem contribuído com este trabalho.

Aos meus familiares e amigos pela torcida durante todo o mestrado.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – pelo auxílio financeiro.

“Só serei verdadeiramente livre quando todos os seres humanos que me cercam, homens e mulheres, forem igualmente livres, de modo que quanto mais numerosos forem os homens livres que me rodeiam e quanto mais profunda e maior for a sua liberdade, tanto mais vasta, mais profunda e maior será a minha liberdade.”

Mikhail Bakunin

RESUMO

Este trabalho aborda a unificação do tratamento do problema do fluxo de potência para redes de transmissão e de distribuição de energia elétrica interligadas (T&D).

Primeiramente, busca-se consolidar a metodologia de normalização complexa por unidade em sistemas elétricos de distribuição a fim de ajustar as relações X/R e torná-las favoráveis à utilização do método Desacoplado Rápido na solução do fluxo de potência.

Em seguida, apresenta-se a principal contribuição deste trabalho. É proposta uma extensão da formulação convencional do fluxo de potência através do método Newton, a fim de processar redes T&D interligadas e adequar a representação física de alimentadores de distribuição no modelo da rede. Esta extensão também aplica a normalização complexa por unidade para adequar as relações X/R dos alimentadores de distribuição fisicamente representados para os mesmos níveis dos sistemas de transmissão.

Além disso, injeções fictícias de potências ativa e reativa são incluídas em cada barra de fronteira do sistema T&D e são tratadas como novas variáveis de estado, de modo que a solução do fluxo de potência do sistema normalizado é a mesma da rede original. A equivalência apropriada entre os fluxos de potência através dos ramos conectados às barras de fronteira está incluída no problema como novas equações, resultando em um conjunto não-redundante de equações algébricas.

A abordagem proposta fornece uma ferramenta eficiente para realizar a análise do fluxo de potência em sistemas T&D, onde os alimentadores de distribuição são fisicamente representados, permitindo uma determinação precisa do seu impacto na operação dos sistemas de transmissão. Além disso, topologias malhadas podem ser facilmente manipuladas por meio da metodologia proposta.

Simulações em sistemas-teste de alimentadores de distribuição com topologias originais e modificadas, para contemplar configurações malhadas e inserção de geradores independentes, são apresentadas e discutidas para demonstrar a importância e viabilidade da aplicação da normalização complexa na análise do problema do fluxo de potência.

Para avaliar as características e o desempenho da nova formulação do fluxo de potência estendido, distintas condições operacionais entre partes de um sistema-teste T&D foram simuladas.

Palavras-chave: Fluxo de Potência, Sistemas de Transmissão e Distribuição Emergentes, Topologia Malhada, Geração Distribuída, Normalização Complexa Por Unidade.

ABSTRACT

This work addresses the unified load flow analysis for interconnected transmission and distribution (T&D) networks.

First it seeks to consolidate the concept of complex per unit normalization in electrical distribution systems in order to adapt X/R ratios to make them favorable to the use of Fast Decoupled method on power flow solution.

Afterwards the main contribution of this work is presented. An extension of the conventional power flow formulation via Newton method is proposed in order to handle T&D networks and to adjust the physical depiction of distribution feeders on the network model. The proposed extension uses a complex per unit normalization to adequate X/R ratios of physically depicted distribution feeders to the same levels of transmission systems.

Furthermore, active and reactive power compensations are included in each T&D boundary bus and treated as new state variables, so that the power flow solution of the normalized system is the same as the original network. Appropriate equivalence between power flows through branches connected to boundary buses is included into the problem as new equations, resulting in a solvable non-redundant set of algebraic equations.

The proposed approach provides an efficient tool to perform power flow analysis on T&D systems, where distribution feeders are explicitly depicted, allowing an accurate determination of their impact onto the transmission operation. Besides, meshed topologies can be easily handled by means of the proposed methodology.

Simulations in distribution feeders test-systems with original and modified topologies including highly meshed configurations and presence of distributed generation are presented and discussed to demonstrate the importance and viability of the complex normalization application on the power flow problem.

In order to evaluate the characteristics and performance of the extended power flow formulation, different operational conditions were simulated on a T&D test-system.

Keywords: Power Flow, Emerging Transmission and Distribution, Meshed Topology, Distributed Generation, Complex Per Unit Normalization.

RESUMO

Ĉi tiu laboraĵo pritraktas la unuecigon de la problemo de ŝarĝofluo en interkonektitaj retoj de transmisio kaj de distribuo de elektra energio (TkD).

Unuavice, oni provas firmigi la metodon por kompleksa normigo (por uzado de relativaj grandoj) en sistemoj de distribuo de elektra energio, celante adapti la rilatojn X/R , igante ĉi tiujn rilatojn taŭgaj por uzo de la Rapida Malkupla Metodo por solvado de problemoj de ŝarĝofluo.

Poste, estas prezentata la ĉefa kontribuado de ĉi tiu studo. Oni proponas etendon de la tradicia formulado de ŝarĝofluo pere de la Neŭtona metodo, cele al pritraktado de interkonektitaj TkD-retoj kaj al adapto de la fizika reprezentado de distribuaj lineoj en la modelo de la reto. Ĉi tiu etendo ankaŭ uzas kompleksan normigon por konformigi la X/R -rilatojn de la distribu-lineoj fizike reprezentataj al la samaj niveloj de la rilatoj de transmisi-sistemoj.

Krome, en ĉiun ĉe-randan ĉefrelon de la sistemo TkD okazas injekto de fikcia povo por kompensi agan kaj neagan povojn. Ili estas traktataj kiel novaj stat-variabloj, tiel ke la solvo de ŝarĝofluo de la normigita sistemo estas la sama kiel tiu de la originala reto. La ĝusta ekvivalenteco inter la ŝarĝofluoj tra la branĉoj konektitaj al la ĉe-randaj ĉefreloj alportas novajn ekvaciojn al la problemo. Rezulte estas aro da neredundaj algebraj ekvacioj.

Per la proponata aliro oni ricevas efikan ilon por analizi la ŝarĝofluon en TkD-sistemoj, en kiuj la distribulinoj estas fizike reprezentataj, ebligante precizan mezuron de ilia efiko en la operacio de transmisi-sistemoj. Cetere, maŝretoj facile povas esti traktataj pere de la proponata metodo.

Simuladoj de prov-sistemoj de distribuaj lineoj kun originala kaj modifita aranĝoj, celante konsideri maŝretojn kaj inkluzivon de sendependaj generatoroj, estas prezentataj kaj diskutataj por montri la gravecon kaj la uzeblecon de kompleksa normigo en analizo de ŝarĝofluo.

Por taksi la karakterizaĵojn kaj la plenumponon de la nova formulado de la etendita studo de ŝarĝofluo estis simulitaj pluraj operaci-kondiĉoj inter eroj de prova TkD-sistemo.

Ŝlosilvortoj: ŝarĝofluo, novecaj sistemoj de distribuo kaj de transmisio, maŝreta aranĝo, disa generado de energio, kompleksa normigo (cele al uzo de relativaj grandoj).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Principais referências bibliográficas _____	9
Figura 2.1 - Sistema de distribuição radial típico _____	26
Figura 3.1 - Aplicação da normalização complexa por unidade. _____	39
Figura 3.2 - Fluxograma do algoritmo da normalização complexa por unidade _____	41
Figura 3.3 - Fluxograma do acoplamento da c.p.u. a um programa convencional _____	42
Figura 4.1 - T&D com topologia fracamente malhada entre alimentadores de distribuição _	46
Figura 4.2 - T&D com topologia malhada entre os alimentadores de distribuição _____	47
Figura 4.3 - Potências de compensação nas barras de fronteira _____	49
Figura 4.4 - Fluxograma do algoritmo do FP estendido via método de Newton _____	52
Figura 5.1 - Sistema-teste de distribuição de 12 barras _____	56
Figura 5.2 - Sistema-teste de distribuição de 33 barras _____	60
Figura 5.3 - Sistema-teste de distribuição de 69 barras _____	61
Figura 5.4 - Sistema-teste T&D 171 de barras _____	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Características dos sistemas de transmissão e de distribuição _____	2
Tabela 5.1 - Dados de barra do sistema-teste de 12 barras em diferentes representações ____	56
Tabela 5.2 - Dados de linha do sistema-teste de 12 barras em diferentes representações ____	56
Tabela 5.3 - Estado do sistema-teste de 12 barras para o Caso A _____	57
Tabela 5.4 - Estado do sistema-teste de 12 barras para o Caso B _____	57
Tabela 5.5 - Estado do sistema-teste de 12 barras para o Caso C _____	58
Tabela 5.6 - Resultados das simulações do sistema-teste de 12 barras _____	58
Tabela 5.7 - Distribuição dos fluxos de potência do sistema-teste de 12 barras _____	59
Tabela 5.8 - Resultados das simulações do sistema-teste de 33 barras _____	60
Tabela 5.9 - Resultados das simulações do sistema-teste de 69 barras _____	62
Tabela 5.10 - Ângulos de base do sistema T&D _____	64
Tabela 5.11 - Balanço de potência nas barras de fronteira - Caso A0 _____	64
Tabela 5.12 - Balanço de potência nas barras de fronteira - Caso A1 _____	65
Tabela 5.13 - Balanço de potência nas barras de fronteira - Caso B0 _____	66
Tabela 5.14 - Balanço de potência nas barras de fronteira - Caso B1 _____	66
Tabela 5.15 - Balanço de potência nas barras de fronteira - Caso C0 _____	67
Tabela 5.16 - Balanço de potência nas barras de fronteira - Caso C1 _____	67
Tabela 5.17 - Estado do sistema-teste T&D de 171 barras - Caso A x Caso D _____	68
Tabela I.A - Dados de barra do sistema-teste de 33 barras em diferentes representações ____	76
Tabela I.B - Dados de linha do sistema-teste de 33 barras em diferentes representações ____	77
Tabela I.C - Estado do sistema-teste de 33 barras para o Caso A _____	78
Tabela I.D - Estado do sistema-teste de 33 barras para o Caso B _____	79
Tabela I.E - Estado do sistema-teste de 33 barras para o Caso C _____	80
Tabela II.A - Dados de barra do sistema-teste de 69 barras em diferentes representações ____	81
Tabela II.B - Dados de linha do sistema-teste de 69 barras em diferentes representações ____	83
Tabela II.C - Estado do sistema-teste de 69 barras para o Caso A _____	85
Tabela II.D - Estado do sistema-teste de 69 barras para o Caso B _____	87
Tabela II.E - Estado do sistema-teste de 69 barras para o Caso C _____	89
Tabela III.A – Dados de barra do sistema-teste de 57 barras do IEEE _____	91
Tabela III.B - Dados de linha do sistema-teste de 57 barras do IEEE _____	93

LISTA DE SÍMBOLOS

- X/R - relação entre reatância e resistência séries das linhas
- $P\theta-QV$ - acoplamento entre potência ativa e ângulo de tensão e entre potência reativa e magnitude de tensão
- XB, BX - versões do método Desacoplado Rápido
- $PQ, PV, V\theta$ - barras de carga, geração e referência
- NPQ, NPV - números de barras de carga e de barras de geração
- KP, KQ - indicadores de convergência dos métodos desacoplados
- v, p, q, i - contadores de iteração
- $p.u.$ - notação em valor por unidade
- $c.p.u.$ - normalização complexa por unidade / notação em valor complexo por unidade
- N_b, N_l - número de barras e de linhas do sistema
- N_{fr} - número de barras de fronteira
- nA - número de alimentadores de distribuição fisicamente representados
- Ω_k - conjunto de barras vizinhas à barra k
- Ω_k^D - conjunto das barras de distribuição adjacentes à barra de fronteira k
- K - conjunto de barras adjacentes à barra k , incluindo a mesma
- A_k - conjunto das barras alimentadas pela barra k
- B_k - conjunto das barras alimentadas através da barra k
- D_k - conjunto das linhas alimentadas através da barra k
- k, m - barras do sistema
- r_{km}, x_{km} - resistência e reatância séries da linha entre as barras k e m
- R_{cpu}, X_{cpu} - resistência e reatância séries das linhas em c.p.u.
- \dot{Z}_{km} - impedância da linha entre as barras k e m
- \dot{Z}_{cpu} - impedância das linhas em c.p.u.
- \dot{Z}_{base} - bases de impedância complexa
- B_{km}, G_{km} - coeficientes da matriz de admitâncias
- \dot{V}_k - tensão complexa da barra k
- \dot{V}_k^{esp} - tensão complexa especificada da barra k
- V_k, V_m - magnitudes de tensão das barras k e m
- V_{cpu} - magnitude da tensão das barras em c.p.u.
- \dot{V}_{base} - bases de tensão complexa

- \mathbf{V} - vetor das magnitudes de tensão das barras
- θ_k, θ_m - ângulos de fase de tensão das barras k e m
- θ_{cpu} - ângulo de fase da tensão das barras em c.p.u.
- $\boldsymbol{\theta}$ - vetor dos ângulos de fase de tensão das barras
- ζ - ângulo de fase original da impedância
- δ - ângulo de fase original da potência complexa
- ϕ_{base} - ângulo de base
- \dot{I}_k - corrente complexa da barra k
- \dot{I}_{km} - corrente complexa da linha entre as barras k e m
- \dot{I}_{base} - bases de corrente complexa
- \dot{S}_k - injeção de potência complexa da barra k
- \dot{S}_k^{esp} - injeção de potência complexa especificada da barra k
- \dot{S}_{cpu} - injeções de potência complexa das barras em c.p.u.
- \dot{S}_{base} - base de potência complexa
- P_k, Q_k - injeções de potência ativa e reativa da barra k
- P_{km}, Q_{km} - fluxos de potência ativa e reativa na linha $k-m$
- Q_{km}^{sh} - componente da injeção de potência reativa devido ao elemento *shunt* da barra k
- \mathbf{P}, \mathbf{Q} - vetor das injeções de potência ativa e reativa das barras
- $\mathbf{P}^{esp}, \mathbf{Q}^{esp}$ - vetores dos valores especificados de injeção de potência ativa e reativa das barras
- $\Delta\mathbf{P}, \Delta\mathbf{Q}$ - vetores dos desvios de potência ativa e reativa das barras
- P_k^{eq}, Q_k^{eq} - cargas equivalentes ativa e reativa da barra k
- P_b, Q_b - cargas ativa e reativa da barra alimentada através da barra k
- $P_f^{perdas}, Q_f^{perdas}$ - perdas ativa e reativa na linha alimentada através da barra k
- P_k^{nova}, Q_k^{nova} - novas injeções de potência ativa e reativa na barra de fronteira k , quando os alimentadores de distribuição são fisicamente representados
- P_k^{pu}, Q_k^{pu} - valores em p.u. das injeções de potência ativa e reativa na barra de fronteira k quando os alimentadores de distribuição não são fisicamente representados
- P_{kl}^{pu}, Q_{kl}^{pu} - fluxos de potência ativa e reativa através do transformador de fronteira no ângulo de base original do sistema de transmissão, que são calculados pelas equações de fluxo de potência convencional
- P_{cpu}, Q_{cpu} - injeções de potência ativa e reativa das barras em c.p.u.
- $P_{k,i}^{cpu}, Q_{k,i}^{cpu}$ - valores em c.p.u. das injeções de potência ativa e reativa exigidas pelo alimentador i

P_{kl}^{cpu} , Q_{kl}^{cpu} - fluxos de potência ativa e reativa através do transformador de fronteira convertidos para o mesmo ângulo de base dos alimentadores adjacentes

C^P , C^Q - vetores das potências de compensação ativa e reativa

PB_k , QB_k - balanço de fluxo de potência ativa e reativa na barra de fronteira considerando os ramos adjacentes na mesma base de potência complexa

ΔPB , ΔQB - novas equações relacionadas aos fluxos de potência de transmissão e distribuição através das linhas de transmissão e distribuição adjacentes à barra de fronteira

x - vetor das variáveis de estado

Δx - vetor de correção das variáveis de estado

\bar{x} - vetor de estados estendido

J - matriz Jacobiana das derivadas de $g(x)$ em relação a x

$\bar{J}(\bar{x}^v)$ - matriz Jacobiana estendida

H , N , M , L - submatrizes da matriz Jacobiana dadas por $\partial P/\partial\theta$, $\partial P/\partial V$, $\partial Q/\partial\theta$, $\partial Q/\partial V$

B' , B'' - matrizes constantes que substituem a matriz Jacobiana no método Desacoplado Rápido

$g(\cdot)$ - função vetorial de dimensão m_x , onde m_x é o número de incógnitas do fluxo de potência convencional

$f(\cdot)$ - função vetorial de dimensão n_x , onde n_x é o número de incógnitas do fluxo de potência estendido

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 Introdução	1
1.2 Revisão bibliográfica	3
1.3 Objetivos	10
1.4 Contribuições do trabalho	10
1.5 Estrutura do trabalho	12
CAPÍTULO 2: O PROBLEMA DO FLUXO DE POTÊNCIA E SEUS MÉTODOS DE SOLUÇÃO	14
2.1 Introdução	14
2.2 Formulação básica do problema do fluxo de potência	15
2.2.1 Subsistema 1	16
2.2.2 Subsistema 2	17
2.3 Métodos tradicionais de solução do fluxo de potência	18
2.3.1 Método de Newton-Raphson	18
2.3.2 Método Desacoplado	21
2.3.3 Método Desacoplado Rápido	23
2.4 Métodos de solução do fluxo de potência para sistemas de distribuição	25
2.4.1 Método Escalonado	27
2.4.2 Método da Soma das Correntes	29
2.4.3 Método da Soma das Potências	32
2.5 Considerações finais do capítulo	36
CAPÍTULO 3: NORMALIZAÇÃO COMPLEXA POR UNIDADE	37
3.1 Introdução	37
3.2 Normalização convencional (p.u.)	38
3.3 Normalização complexa por unidade (c.p.u.)	38
3.4 Implementação da normalização complexa	41
3.5 Cálculo do ângulo de base: metodologias disponíveis	43
3.6 Considerações finais do capítulo	44
CAPÍTULO 4: MÉTODO PROPOSTO PARA CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA PARA SISTEMAS DE TRANSMISSÃO COM ALIMENTADORES FISICAMENTE REPRESENTADOS	45
4.1 Introdução	45
4.2 Análise do fluxo de potência T&D com c.p.u.	45
4.3 Nova abordagem: fluxo de potência estendido	47

4.4	Potência de compensação nas barras de fronteira _____	48
4.5	Formulação do fluxo de potência estendido _____	50
4.6	Considerações quanto à aplicação da c.p.u. em barras do tipo <i>PV</i> _____	52
4.7	Considerações finais do capítulo _____	53
CAPÍTULO 5: SIMULAÇÕES E RESULTADOS _____		54
5.1	Introdução _____	54
5.2	Aplicação em sistemas de distribuição _____	54
5.2.1	Sistema-teste de distribuição de 12 barras _____	55
5.2.2	Sistema-teste de distribuição de 33 barras _____	59
5.2.3	Sistema-teste de distribuição de 69 barras _____	61
5.3	Aplicação em sistemas T&D interligados _____	62
5.3.1	Caso A: Operação em anel aberto _____	64
5.3.2	Caso B: Operação em anel fechado _____	65
5.3.3	Caso C: Geração distribuída como barra <i>PV</i> _____	66
5.3.4	Caso D: Alimentadores representados por injeções de potência _____	67
5.4	Considerações finais do capítulo _____	69
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS _____		70
6.1	Considerações gerais _____	70
6.2	Sugestões para trabalhos futuros _____	71
REFERÊNCIAS _____		72
ANEXOS _____		76
Anexo I – Dados e resultados do sistema-teste de 33 barras _____		76
Anexo II – Dados e resultados do sistema-teste de 69 barras _____		81
Anexo III – Dados do sistema-teste de 57 barras do IEEE _____		91

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

Atualmente, o sistema elétrico brasileiro vem passando por significativas transformações em resposta a uma demanda de energia sempre crescente associada ao aumento das exigências quanto à qualidade e à confiabilidade do fornecimento por parte de uma sociedade cada vez mais eletro-dependente. Aliado a isto, o apoio às novas tecnologias e ao uso de fontes alternativas de energia demonstra um aumento nas preocupações de caráter econômico e ambiental. Estes fatos contribuem para a expansão do setor elétrico e, conseqüentemente, no aumento da complexidade de operação e planejamento das redes, estimulando o interesse de empresas do setor e de centros de pesquisa no conceito *Smart Grid* (DOE, 2009).

Nesse contexto, em que a estrutura e a filosofia de operação e planejamento do sistema elétrico são revistos, é fundamental que sejam revistas também as ferramentas de análise de sistemas elétricos, associadas à tradicional estrutura geração/transmissão/distribuição, a fim de adequá-las às transformações proporcionadas pela gradativa inserção de tecnologias *Smart Grid*, e que já estão em curso no sistema elétrico.

Dentre as diversas áreas que compõem o sistema elétrico de potência, o sistema de distribuição é o mais fortemente impactado pelo conceito *Smart Grid* (FALCÃO, 2010). A tecnologia de geração distribuída, por exemplo, está entrando em um período de rápida expansão e comercialização e deve assumir um papel cada vez mais importante no sistema elétrico (BROWN; FREEMAN, 2001).

Estas mudanças no setor elétrico atingem diretamente as metodologias para a solução do fluxo de potência. Sua análise merece destaque por ser uma questão importante nos ambientes de operação e planejamento de sistemas elétricos de potência, uma vez que permite avaliar o impacto, na rede elétrica, de diferentes cenários de despacho de geração de energia e comportamentos de carga do sistema.

Tradicionalmente, as metodologias do fluxo de potência foram desenvolvidas considerando a divisão do sistema em redes de transmissão e de distribuição, devido às suas diferentes características, notadamente em termos de topologia e parâmetros. Esta abordagem

permitiu o desenvolvimento de diferentes técnicas de solução do fluxo de potência a serem aplicadas em cada parte da rede, de acordo com suas particularidades.

Os sistemas de transmissão apresentam como características típicas: topologia fortemente malhada, o que possibilita desprezar os efeitos causados pelos desequilíbrios entre as fases; operação balanceada, a qual permite uma representação monofásica da rede elétrica; níveis de tensão elevados; linhas com alta relação reatância/resistência (X/R), que leva ao desacoplamento $P\theta-QV^l$; presença de centros de geração centralizados e de grande porte e, como conseqüência, o sentido dos fluxos de potência são ditados pelas condições de operação. Para esses sistemas, a solução do fluxo de potência dá-se, tradicionalmente, pela aplicação de metodologias baseadas no método convencional de Newton-Raphson e suas variações.

Os sistemas de distribuição tradicionais, por sua vez, apresentam características particulares, dentre as quais se distinguem: topologia radial; sistema desequilibrado e representação trifásica; baixa tensão (tipicamente abaixo de 69 kV); baixa relação X/R ; ausência de geração, resultando em fluxos de potência em um único sentido, ou seja, da subestação alimentadora para as cargas. As metodologias desenvolvidas para a solução do fluxo de potência em sistemas de distribuição tradicionais seguem duas vertentes distintas. A primeira abrange as metodologias que derivam dos métodos tradicionais e a segunda as metodologias que se baseiam em métodos de varredura.

Um breve resumo das principais diferenças entre os sistemas de transmissão e distribuição pode ser visto na Tabela 1.1:

Tabela 1.1 - Características dos sistemas de transmissão e de distribuição

	Sistemas de Transmissão	Sistemas de Distribuição
Equilíbrio das fases	Sistema equilibrado	Sistema desequilibrado
Representação	Monofásica	Trifásica
Nível de tensão	Alta tensão	Baixa tensão
X/R das Linhas	Alta relação X/R	Baixa relação X/R
Topologia	Malhado	Radial e fracamente malhado
Geração de energia	Grandes centros de geração	Ausência de geração
Sentido do fluxo de potência	Conforme operação	Único sentido: Subestação → Carga
Métodos de solução do fluxo de potência	Newton e versões desacopladas	- Adaptações dos métodos tradicionais - Métodos de varredura

¹ $P\theta-QV$: Termo usado para definir a forte sensibilidade entre a potência ativa P e o ângulo de tensão θ e entre a potência reativa Q e a magnitude de tensão V verificada em sistemas de transmissão, devido à alta relação X/R ,

Historicamente, as redes de distribuição foram criadas e dispostas radialmente, o que facilitava sua operação e tornava-a mais econômica. No entanto, quando comparada a redes malhadas, a topologia radial torna o atendimento aos consumidores menos confiável na ocorrência de interrupções de energia, prejudicando a qualidade de energia fornecida.

Com a crescente inclusão de unidades de geração mais próximas da carga, as redes de distribuição tendem para uma topologia cada vez mais malhada, de maneira a proporcionar maior confiabilidade ao sistema. Desse modo, a aplicação dos métodos tradicionais de cálculo do fluxo de potência que se baseiam na topologia radial fica cada vez mais limitada.

Algumas metodologias apresentam variações ou novas abordagens para a resolução do fluxo de potência em redes de distribuição fracamente malhadas, que se caracterizam por operar parte da rede em anel. Apesar de relevantes, essas contribuições podem ser insuficientes para atender as novas características das redes de distribuição emergentes.

Além disso, as características relativas à baixa tensão e à baixa relação X/R permanecem e a aplicação direta dos métodos clássicos de fluxo de potência pode implicar em problemas numéricos, como é evidente no caso dos métodos desacoplados, baseados na alta relação X/R da rede.

Assim, o aprimoramento de ferramentas de cálculo do fluxo de potência que levem em consideração a evolução dos sistemas de distribuição e suas particularidades, como a relação X/R , é relevante no contexto que se vislumbra para o novo sistema elétrico.

1.2 Revisão bibliográfica

Ambientes de planejamento e operação de sistemas elétricos de potência necessitam de um amplo diagnóstico da rede que possibilite analisar seu desempenho e planejar sua expansão, visando qualidade, confiabilidade e segurança de geração, transporte e fornecimento de energia.

Determinar o estado da rede implica na resolução de cálculos complexos que não são viáveis por métodos manuais. Em 1929 surgiu o analisador de redes, um computador analógico específico que passou a auxiliar o procedimento de cálculo. No início da década de 50, devido ao avanço e à disponibilidade dos computadores digitais, aliados à sua velocidade e à sua capacidade de armazenamento, os analisadores de redes começaram a ser substituídos. Em 1956 foi desenvolvido o primeiro método de solução do fluxo de potência através do computador digital (WARD; HALE, 1956).

Em 1957 a criação de um programa para o fluxo de potência de grande escala foi bem sucedida e serviu de incentivo ao desenvolvimento de novos programas para diversas áreas do planejamento e operação de sistemas elétricos de potência (apud STAGG; EL-ABIAD, 1979).

Até a década de 60, o método iterativo mais utilizado na solução do fluxo de potência era o método de Gauss-Seidel. O uso deste método foi bastante importante devido à simplicidade de programação e dos cálculos realizados a cada iteração e ao armazenamento mínimo de memória, sendo adequado aos computadores da época. Por outro lado, o método apresentava algumas insuficiências, tais como ser suscetível a sistemas mal condicionados e apresentar convergência lenta, uma vez que o número de iterações deste método cresce rapidamente com o aumento da dimensão do problema.

Frente à expansão do setor elétrico, com sistemas cada vez maiores e mais complexos, passou a ser imprescindível o desenvolvimento de ferramentas mais avançadas para análise das redes. Neste sentido, em 1961, foi proposta a utilização do método de Newton no problema do fluxo de potência (VAN NESS; GRIFFIN, 1961). Este desenvolvimento, no entanto, abrangia apenas redes de transmissão. A idéia proposta apresentou ótima convergência, porém a velocidade e o grande esforço computacional devido ao armazenamento e à inversão de matrizes a cada iteração tornou o método, até então, sem utilidade.

Em 1967 ao método de Newton foi acoplada a ordenação ótima da Eliminação de Gauss com armazenamento compacto (TINNEY; HART, 1967). Esta otimização melhorou consideravelmente a solução do fluxo de potência em velocidade, espaço de memória e precisão. Além disso, a proposta mostrou ser um método robusto garantindo um bom desempenho mesmo para redes mal condicionadas. A partir de então, o método de Newton proposto por Tinney e Hart (1967) passou a ser uma referência na solução do fluxo de potência, do qual surgiram diversas derivações amplamente utilizadas até hoje.

No ano de 1974 surgiu a variação mais importante do método de Newton, o método Desacoplado Rápido (STOTT; ALSAÇ, 1974). Este método baseia-se no fato de existir, em redes de transmissão, uma intensa sensibilidade entre a potência ativa e o ângulo de tensão (P e θ) e entre a potência reativa e a magnitude de tensão (Q e V). Devido a este forte acoplamento $P\theta$ - QV , aproximações foram feitas na matriz Jacobiana. Ela, que era calculada e invertida a cada iteração, foi trocada por matrizes constantes denominadas B' e B'' , sendo este um grande avanço para a viabilidade do método. Os autores ainda sugeriram modificações na construção das matrizes B' e B'' , tornando o método proposto conhecido como método

Desacoplado Rápido versão XB . As principais alterações propostas foram desprezar as resistências séries na construção da matriz B' e omitir a representação dos elementos da rede relacionados à potência reativa.

O método Desacoplado Rápido se mostrou, de fato, mais rápido que os métodos propostos até então, mantendo a precisão, a convergência e o uso de pouca memória, convergindo de maneira satisfatória e comparável em eficiência ao método de Newton. Assim, tornou-se muito popular e é, até hoje, muito utilizado em programas de cálculo de fluxo de potência.

Entretanto, notou-se que este método apresentava um bom desempenho apenas quando aplicado em redes de transmissão de alta tensão, devido à alta razão X/R das linhas. Em redes de distribuição, onde geralmente as relações X/R dos ramos são pequenas, o comportamento do método Desacoplado Rápido é prejudicado, pois apresenta dificuldades de convergência. Diversas modificações foram sugeridas para aperfeiçoar a versão original do método para lidar com este problema, algumas delas serão descritas a seguir.

Além das baixas relações X/R , as redes de distribuição apresentam outras particularidades. Geralmente, são sistemas desequilibrados e as aproximações feitas na modelagem de redes de transmissão, como a escolha da seqüência positiva para a representação unifilar, não são aplicáveis.

Surgiu, então, a necessidade do desenvolvimento de novas metodologias de solução do fluxo de potência que levassem em consideração as características específicas dos sistemas de distribuição. Atualmente, pode-se afirmar que essas metodologias são divididas em duas categorias. O primeiro grupo compreende as metodologias que desenvolvem adaptações de métodos tradicionais, como o método de Newton, por exemplo, e o segundo grupo é composto por metodologias que têm como base os métodos de varredura.

No mesmo ano em que o método de Newton se tornou uma referência no problema do fluxo de potência para redes de transmissão, foi desenvolvido o primeiro método específico para sistemas de distribuição, o método da Soma das Impedâncias (BERG; HAWKINS; PLEINES, 1967), que mostrava ser relativamente simples se comparado ao método de Newton. Com este método deu-se início à utilização do procedimento de varredura de redes de distribuição para análise do fluxo de potência, que mais tarde ficou conhecido como varredura *Backward/Forward Sweep*. Diversos métodos criados posteriormente foram baseados no método de varredura.

Nos anos 1974 e 1976 foram sugeridas expansões trifásicas do método de Newton, a fim de possibilitar a representação de sistemas desequilibrados (WASLEY; SLASH, 1974; BIRT et al., 1976). No entanto, a expansão trifásica aumentou a complexidade dos métodos.

Em 1976 surgiu uma metodologia trifásica que abordava a topologia radial de sistemas de distribuição. Este método aplica a técnica iterativa *ladder*, baseada em consecutivas varreduras a montante da rede, ou seja, partindo do nó extremo até o nó fonte, e a jusante, que percorrem a rede no sentido contrário, partindo da subestação alimentadora até atingir a barra terminal. Neste método, a varredura a montante da rede (*backward sweep*) é responsável pela determinação do estado do sistema, aplicando as leis de corrente e tensão de Kirchhoff. A varredura a jusante (*forward sweep*) apenas atualiza as tensões das barras para dar continuidade ao processo iterativo caso a convergência não tenha sido atingida. Essa abordagem ficou conhecida como método Escalonado e tornou-se de grande importância devido à sua eficiência na solução do fluxo de potência (KERSTING; MENDIVE, 1976).

Em 1977 surgiu uma técnica para adaptar o método Desacoplado Rápido a redes de distribuição. A técnica consistia em uma compensação série para aumentar as baixas relações X/R dos ramos. Isto foi possível devido à adição de uma reatância fictícia no ramo em questão, que tem seu efeito cancelado pelo acréscimo de um ramo fictício em série de reatância de mesmo valor absoluto e sentido oposto (DY LIACCO; RAMARAO, 1977).

Logo em seguida, em 1980, foi sugerida uma compensação paralela onde se aumenta artificialmente a susceptância do ramo e, em contrapartida, acrescenta-se uma barra e dois ramos fictícios paralelos (DECKMANN et al., 1980). Ambas as compensações, série e paralela, modificam os parâmetros da rede, o que resulta em alterações na matriz de admitâncias.

Além dos métodos já citados, diversas outras modificações ao método de Newton e ao Desacoplado Rápido foram propostas ao longo do tempo. Exemplos disso são vistos nas propostas de Iwamoto e Tamura (1981) e de Tripathy et al. (1982), as quais foram desenvolvidas para lidar com sistemas mal condicionados.

Em 1984 surgiu um método com o objetivo de elevar as baixas relações X/R das linhas de distribuição para o nível das redes de transmissão e, assim, torná-las mais adequadas ao desempenho do método Desacoplado Rápido, mantendo o estado de operação do sistema igual ao original. A abordagem sugeriu a aplicação de uma rotação de eixos complexos nas admitâncias e nas potências da rede original a fim de obter uma rede com novas relações X/R . Nesta proposta, toda a rede é gerada a partir de um ângulo de rotação, assim, a rede obtida após a rotação tem sentido físico associado e as equações apresentam a

mesma solução da rede original. Neste caso, o ângulo de rotação é determinado de maneira empírica (GARCIA; MONTICELLI, 1984).

No ano seguinte, foi sugerida uma técnica baseada na aplicação de operadores unitários nas equações de fluxo de potência. A idéia baseava-se em rotações das injeções de potências complexas e das tensões complexas nas barras a fim de tornar as impedâncias das linhas quase inteiramente reativas. No entanto, diferentemente da rotação de eixos complexos, esta técnica não conserva o estado original da rede (magnitudes e ângulos de fase das tensões nas barras) durante o processo iterativo e nem o sentido físico da rede depois de rotacionada, isto é, as expressões matemáticas não condizem mais com o perfil da rede elétrica. Os autores ainda sugerem modificações no algoritmo original do método Desacoplado Rápido (HALEY; AYRES, 1985).

Outra proposta de alteração ao método Desacoplado Rápido foi apresentada em 1988. Esta proposta foi apresentada como mais eficiente e confiável quando comparada às compensações série e paralela. Nela, foram sugeridas modificações, determinadas experimentalmente, nas equações do método Desacoplado Rápido. O método se mostrou atraente para sistemas com relações X/R desfavoráveis (RAJICIC; BOSE, 1988).

Paralelamente, neste mesmo ano, foi proposto um método exclusivo para sistemas radiais e pouco malhados que ficou conhecido como método da Soma das Correntes. Esta abordagem, baseada na técnica *ladder* (KERSTING; MENDIVE, 1976), consiste na aplicação das leis de Kirchhoff em duas etapas. A primeira etapa corresponde na varredura a montante da rede, na qual são calculadas as correntes nos ramos começando nas barras terminais dos alimentadores em direção à subestação. A segunda etapa trata da varredura a jusante, onde é determinado o estado do sistema, calculando as tensões nas barras desde a subestação em direção às barras terminais. Este procedimento é repetido até alcançada a convergência (SHIRMOHAMMADI et al., 1988). Este método se tornou importante na solução do fluxo de potência de sistemas de distribuição por apresentar bom desempenho e boas características de convergência, servindo de inspiração a diversos métodos. No entanto, sua aplicação ficou limitada a topologias radiais e fracamente malhadas.

Em 1989 foi apresentada uma formulação para solução do fluxo de potência exclusiva para sistemas de distribuição. Esta abordagem propunha um novo conjunto de equações para o cálculo do fluxo de potência no método de Newton, tendo em vista as particularidades dos sistemas de distribuição (BARAN; WU, 1989).

No mesmo ano, foi apresentada outra versão da solução do fluxo de potência via método Desacoplado Rápido que ficou conhecida como versão BX . Aqui, as resistências,

antes ignoradas durante a construção da matriz B' , passaram a ser desprezadas na montagem da matriz B'' . Verificou-se que ambas as versões do método Desacoplado Rápido, XB e BX , apresentavam desempenho bastante próximos em sistemas de alta tensão. Por outro lado, em redes de distribuição, onde as relações X/R das linhas são desfavoráveis, a versão BX se mostrou superior por apresentar vantagens como, por exemplo, convergência mais rápida (VAN AMERONGEN, 1989).

Ambas as versões, BX e XB , haviam sido desenvolvidas empiricamente. Somente no ano seguinte, foi apresentado um estudo comprovando teoricamente as características do método Desacoplado Rápido (MONTICELLI; GARCIA; SAAVEDRA, 1990).

Neste mesmo ano de 1990 foi proposta uma formulação conhecida como método da Soma das Potências. Esta abordagem foi baseada no método da Soma das Correntes e também consiste em dois passos. Neste caso, o primeiro passo, correspondente a varredura a montante, é responsável pelo cálculo das cargas equivalentes em cada barra. O segundo passo, a varredura a jusante, calcula os novos valores das magnitudes de tensão de todas as barras do sistema. Este processo se repete até que a variação das perdas entre duas iterações seja menor que uma tolerância especificada (CÉSPEDES, 1990).

No final daquele ano, foi proposta uma abordagem bastante parecida ao método da Soma das Correntes, que sugeria alterações no método para redes fracamente malhadas. Uma das modificações foi a utilização das potências ativa e reativa como variáveis de fluxo ao invés de correntes complexas, o que simplificou o tratamento de barras PV e reduziu o esforço computacional. Outras mudanças foram o uso de uma técnica de classificação eficiente e uma estratégia de solução melhorada que contribuíram para a eficiência computacional (LUO; SEMLYEN, 1990).

Em 1995 foi apresentada uma extensão trifásica do método da Soma das Correntes com ênfase na modelagem de geração distribuída e de cargas desbalanceadas e distribuídas (CHENG; SHIRMOHAMMADI, 1995).

No mesmo ano, foi apresentada uma técnica que sugeriu algumas mudanças na rotação proposta por Haley e Ayres (1985). A modificação mais relevante foi a proposta de uma única rotação para todas as equações do fluxo de potência, a fim de simplificar a formulação e manter um sentido físico associado entre a rede original e a rede rotacionada (SIRAIT; IRISAWA, 1995).

Outra técnica surgiu em 2002, chamada rotação ótima dos eixos. Este estudo calcula os ângulos de rotação de cada barra por meio de técnicas de otimização baseadas no acoplamento $P\theta-QV$. Aqui, a rede rotacionada perde o significado físico, pois usa ângulos de

rotação individuais para cada barra. Apesar disso, a técnica proposta resulta em equações que chegam à mesma solução da rede original (MEDEIROS; LUCAS, 2002).

Em 2006 foi proposta a chamada rotação automática dos eixos. Nela, foi possível aliar as duas vantagens dos métodos propostos por Garcia e Monticelli (1984) e por Medeiros e Lucas (2002): obter apenas um ângulo de rotação para toda a rede, para manter o sentido físico após a rotação; utilizando técnicas de otimização para o seu cálculo (GOMES, 2006).

Considerando a grande importância do desenvolvimento e aperfeiçoamento de ferramentas de solução do fluxo de potência para análise dos sistemas elétricos devido à evolução do setor frente às novas tecnologias *Smart Grid*, recentemente, em 2010, foi apresentada por Lourenço, Loddi e Tortelli (2010), uma interpretação do método de solução do fluxo de potência para sistemas de distribuição via método Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos, inicialmente proposto por Garcia e Monticelli (1984).

Esta interpretação está baseada na extensão da normalização convencional das grandezas elétricas do sistema de potência (notação em valores por unidade – p.u.), empregando, no entanto, uma base de potência complexa. Assim, a partir da normalização complexa por unidade (c.p.u.), associada à escolha de um ângulo de base adequado, é possível que as baixas relações X/R , característica dos sistemas de distribuição, seja redimensionada para níveis típicos de redes de transmissão, tornando possível avaliar sistemas interligados de transmissão e distribuição (T&D).

A Figura 1.1 ilustra as principais referências da revisão bibliográfica pesquisada neste trabalho e descrita acima.

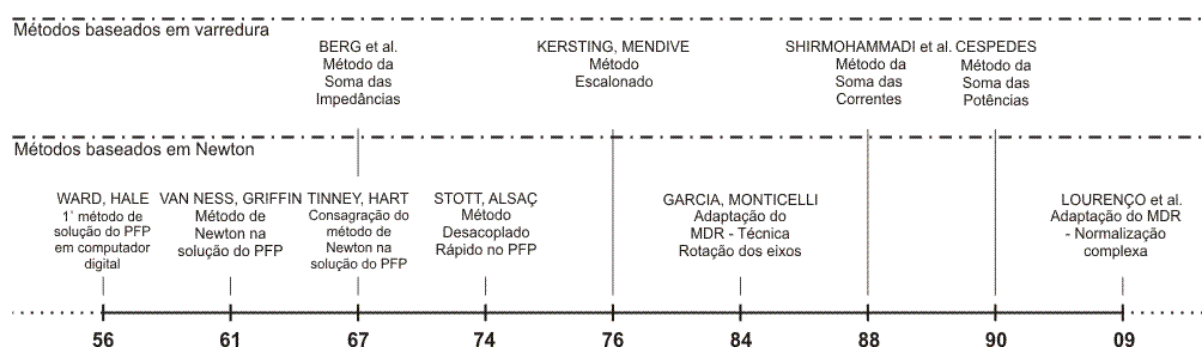


Figura 1.1 - Principais referências bibliográficas

1.3 Objetivos

O presente trabalho possui dois objetivos principais. O primeiro é sistematizar e consolidar a metodologia de normalização complexa por unidade inicialmente proposta por Lourenço, Loddi e Tortelli (2010). Esta metodologia pode ser vista como uma generalização do método de rotação dos eixos, que tem como objetivo ajustar adequadamente a relação X/R das linhas para permitir o uso do método Desacoplado Rápido na solução do fluxo de potência.

O segundo e mais importante objetivo deste trabalho é propor uma extensão da formulação convencional do fluxo de potência, para possibilitar a análise de sistemas de transmissão e de distribuição conjuntamente (T&D). A abordagem proposta também utiliza a normalização complexa por unidade para ajustar as baixas relações X/R dos alimentadores de distribuição para os mesmos níveis dos sistemas de transmissão.

1.4 Contribuições do trabalho

A revisão bibliográfica descrita anteriormente mostra duas tendências distintas no avanço dos estudos da análise do fluxo de potência para sistemas de distribuição, quais são: os métodos que buscam adaptar os métodos tradicionais às características do sistema de distribuição e os métodos baseados em processos de varredura da rede.

A abordagem proposta neste trabalho se insere no primeiro grupo mencionado e tem como inspiração as idéias defendidas por Garcia e Monticelli (1984), Haley e Ayres (1985), Sirait e Irisawa (1995), Medeiros e Lucas (2002), Gomes (2006), Lourenço, Loddi e Tortelli (2010), sendo este último o ponto de partida deste trabalho.

Como anteriormente mencionado, o presente trabalho traz duas contribuições principais. A primeira delas é formalizar a metodologia da normalização complexa por unidade, recentemente proposta por Lourenço, Loddi e Tortelli (2010), e avaliar a sua aplicação em sistemas de distribuição. Aqui, busca-se analisar diferentes situações de operação, como topologias malhadas e presença de geradores independentes conectados diretamente à rede de distribuição, a fim de verificar a influência da c.p.u. no desempenho dos métodos de Newton e Desacoplado Rápido na solução do fluxo de potência.

Além disso, o algoritmo da metodologia c.p.u. será detalhado, de modo a permitir sua incorporação a programas de fluxo de potência existentes.

A disseminação da geração distribuída e o advento das tecnologias *Smart Grid* têm aumentado a influência dos alimentadores de distribuição sobre o funcionamento dos sistemas de transmissão. A operação tradicional em anel fechado nos alimentadores de distribuição, por exemplo, foi reforçada neste atual contexto por Lourenço, Loddi e Tortelli (2010). O futuro dos alimentadores de distribuição indica que a topologia malhada será significativamente mais relevante, aumentando a confiabilidade da operação e, conseqüentemente, melhorando o fornecimento de energia (GRAAFF et al., 2010).

É importante notar também que, embora os alimentadores de distribuição estejam assumindo uma topologia similar aos sistemas de transmissão, incluindo a presença de unidades de geração distribuída, os parâmetros das redes tendem a preservar suas características originais. Isto é, ainda são encontradas baixas e altas relações X/R em sistemas T&D interligados, colocando em risco a aplicação direta de algoritmos baseados no método de Newton, tais como suas versões desacopladas.

A discussão acima aponta que a aplicação de algoritmos de fluxo de potência em sistemas de distribuição, que são baseados na topologia radial (ou mesmo fracamente malhada), está cada vez mais limitada. Além disso, apesar dos esforços anteriores apresentados na literatura, a solução do fluxo de potência para o sistema T&D interligado considerando o novo contexto de *Smart Grids* ainda é um desafio.

Assim, a contribuição principal deste trabalho é o de propor uma extensão da formulação convencional do fluxo de potência através do método Newton, a fim de adequar a representação física de alimentadores de distribuição no modelo da rede, proporcionando a solução do fluxo de potência da rede elétrica T&D interconectada. Dessa forma, consegue-se uma avaliação precisa da interferência de cada alimentador de distribuição na operação de sistemas de transmissão e obtém-se a solução exata do fluxo de potência, uma vez que a injeção de potência efetiva nas barras de fronteira deixa de ser estimada e simplificada e passa a ser conhecida.

O fluxograma do algoritmo do fluxo de potência estendido também será detalhado, sendo resolvido através do método de Newton.

A abordagem do fluxo de potência proposta neste trabalho utiliza a normalização c.p.u. para ajustar os índices X/R dos alimentadores de distribuição fisicamente representados aos mesmos níveis dos sistemas de transmissão. Em contrapartida, para preservar a solução da rede original, injeções de potência fictícias de compensação ativa e reativa estão incluídas em cada barra de fronteira do sistema T&D. Este trabalho fornece detalhes sobre como as

mudanças necessárias devem ser incorporadas na formulação convencional do fluxo de potência.

Resultados de simulações envolvendo sistemas-teste de alimentadores de distribuição com topologias originais e também modificadas, a fim de contemplar configurações malhadas e inserção de geradores independentes, serão apresentados e discutidos para demonstrar a importância e viabilidade da aplicação da c.p.u. na análise do problema do fluxo de potência.

Para validação desses resultados, serão utilizados como comparativo os resultados obtidos com o programa *Distribution Systems Power Flow Analysis Package* (DSPFAP)² baseado nos métodos de varredura *Backward/Forward Sweep* (EMINOGLU; GÖZEL; HOCAOGLU, 2009).

Também serão apresentados os resultados obtidos com a nova formulação do fluxo de potência estendida aplicada em um sistema T&D interligado. Para este caso também são simuladas diversas condições de operação, a fim de validar a nova metodologia.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho é composto por seis capítulos, incluindo este primeiro capítulo introdutório, o qual abrange uma breve introdução ao assunto estudado, uma revisão dos métodos conhecidos e existentes na literatura da área, os objetivos, as contribuições e a organização do estudo em questão.

O capítulo 2 faz uma revisão da análise do fluxo de potência em sistemas elétricos de potência. Aqui, são descritos conceitos básicos, porém importantes para o acompanhamento do trabalho. O capítulo inicia com uma revisão da formulação do problema do fluxo de potência. Em seguida, apresenta o método de Newton-Raphson e suas variações desacopladas, métodos clássicos aplicados em sistemas de transmissão, e segue com os métodos de varredura, métodos utilizados em redes de distribuição.

O capítulo 3 descreve aplicação da normalização complexa por unidade para sistemas elétricos de potência, consolidando a sua formulação. Também são apresentadas as diferentes metodologias de cálculo do ângulo de base disponíveis na literatura. Além disso, o fluxograma do algoritmo da c.p.u. e a sua incorporação a um programa convencional de fluxo de potência é detalhadamente apresentado.

² DSPFAP: Programa disponível em: <http://www.gyte.edu.tr/Dosya/102/power/>.

No capítulo 4 é apresentada a principal contribuição deste trabalho: a extensão da formulação convencional do fluxo de potência desenvolvida para lidar com sistemas T&D interligados e o fluxograma da sua implementação via método de Newton. Neste capítulo também são feitas considerações quanto à aplicação da c.p.u. em barras do tipo *PV*.

No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados alcançados a partir da aplicação do algoritmo de normalização complexa e do algoritmo do fluxo de potência estendido proposto em diversas situações de simulações em sistemas-teste.

Por fim, o capítulo 6 traz as considerações gerais do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2: O PROBLEMA DO FLUXO DE POTÊNCIA E SEUS MÉTODOS DE SOLUÇÃO

2.1 Introdução

Os estudos de fluxo de potência são de grande importância no planejamento da expansão dos sistemas elétricos de potência e também na determinação das melhores condições de operação. A solução do fluxo de potência é uma ferramenta que visa auxiliar os operadores a analisar o carregamento dos geradores e as perdas de transmissão, a garantir o fornecimento de energia, a manter as magnitudes das tensões nas barras próximas aos seus valores nominais, a conservar o funcionamento de geradores dentro de seus limites de operação e a evitar que equipamentos elétricos e linhas de transmissão operem sobrecarregados. Além disso, essa ferramenta permite avaliar o despacho dos geradores, a topologia da rede, a situação dos dispositivos de controles e os intercâmbios de potência entre sistemas.

Na análise do fluxo de potência o sistema elétrico é modelado de maneira estática, isto é, considera-se o sistema equilibrado, livre de efeitos transitórios. O problema do cálculo do fluxo de potência refere-se à obtenção do estado do sistema, o qual é conhecido quando as magnitudes e os ângulos de fase das tensões em todas as barras são determinados. Uma vez obtidas as condições de operação da rede é possível determinar os fluxos de potência ativa e reativa das linhas de transmissão, além de diversas outras informações fundamentais.

A escolha de um método iterativo a ser aplicado na solução do fluxo de potência não é algo evidente. Uma avaliação cautelosa do tamanho e do tipo da rede elétrica em estudo é imprescindível. No entanto, a maior dificuldade da escolha está em analisar as vantagens e desvantagens dos vários métodos existentes, isto é, avaliar as características de implementação e de capacidade de memória e processamento, tendo em vista que um método dificilmente possui todas as características esperadas.

Neste capítulo será apresentada uma revisão da formulação do problema do fluxo de potência e alguns dos seus métodos de solução. Serão descritos os métodos tradicionais aplicados em sistemas de transmissão e os principais métodos desenvolvidos para sistemas de distribuição.

2.2 Formulação básica do problema do fluxo de potência

A formulação básica do problema do fluxo de potência tem como base um conjunto de equações algébricas não-lineares que equivalem à aplicação da Primeira Lei de Kirchhoff no sistema elétrico, onde os nós representam as barras da rede e os ramos as linhas de transmissão. As equações, que representam dispositivos de controle, e as inequações, que levam em conta os limites de operação do sistema, podem ser incorporadas na modelagem do sistema. No entanto, o trabalho aqui apresentado se restringirá à formulação básica do fluxo de potência.

A imposição da Primeira Lei de Kirchhoff garante que as injeções de potência ativa e reativa em uma barra são iguais à soma dos fluxos de potência que saem da mesma barra, isto é (MONTICELLI, 1983):

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2.1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2.2)$$

onde:

k - varia de 1 até N_b (número de barras da rede);

Ω_k - conjunto de barras vizinhas à barra k ;

V_k, V_m - magnitudes das tensões das barras k e m ;

θ_k, θ_m - ângulos das tensões das barras k e m ;

P_k, Q_k - injeções de potência ativa e reativa da barra k , respectivamente;

P_{km}, Q_{km} - fluxo de potência ativa e reativa na linha k - m , respectivamente;

Q_{km}^{sh} - componente da injeção de potência reativa devido ao elemento *shunt* da barra k .

As injeções de potência ativa e reativa de cada barra do sistema são dadas por:

$$P_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.3)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2.4)$$

onde:

K - conjunto de barras adjacentes à barra k , incluindo a mesma;

G_{km}, B_{km} - coeficientes da matriz de admitâncias.

Na formulação básica do problema do fluxo de potência quatro variáveis são associadas a cada barra do sistema, V_k , θ_k , P_k e Q_k , das quais duas são incógnitas do problema e duas são dados de entrada, dependendo do tipo de barra da rede. As barras podem ser classificadas como:

- *PQ* (barras carga) - As barras de cargas representam as subestações às quais estão acopladas as cargas da rede. Dessa maneira, as barras *PQ* possuem P_k e Q_k conhecidos e V_k e θ_k como incógnitas.
- *PV* (barras geração) - As barras de geração representam as subestações que são conectadas aos geradores. Nestas subestações, a magnitude da tensão é controlada e a potência a ser gerada e fornecida ao sistema é previamente especificada em projeto. Assim, conhecem-se destas barras P_k e V_k e são calculados Q_k e θ_k .
- *V θ* (barra referência) - A barra de referência representa a subestação que tem como objetivo o fechamento do balanço de potência do sistema, uma vez que não se determinam as perdas a priori. Esta barra também é responsável por fixar uma referência angular ($\theta_k = 0$) para garantir apenas uma solução ao sistema. Neste caso, são dados V_k e θ_k da barra de referência e deverão ser calculados P_k e Q_k .

O problema do fluxo de potência pode ser dividido em duas etapas, o Subsistema 1 e o Subsistema 2, descritos a seguir (GARCIA; MONTICELLI, 1984).

2.2.1 Subsistema 1

O Subsistema 1 permite encontrar, por método iterativo, o estado do sistema, o qual é conhecido quando as magnitudes e os ângulos das tensões (V_k , θ_k) em todas as barras são determinados, isto é, obtendo V_k e θ_k das barras *PQ* e θ_k das barras *PV*.

Considerando um sistema que possui NPQ barras de carga, NPV barras de geração e uma barra de referência, o Subsistema 1 analisa as barras do tipo *PQ* e *PV*, a fim de tornar conhecidos os valores de V e θ das barras *PQ* e Q e θ das barras *PV*. A barra *V θ* não entra nesta etapa, já que sua solução é conhecida.

O vetor de estados deste sistema é dado por:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

onde θ é o vetor dos ângulos das tensões das barras PQ e PV de dimensão $NPQ + NPV$ e V o vetor das magnitudes de tensões das barras PQ de dimensão NPQ .

As incógnitas do Subsistema 1 (V_k, θ_k) são calculadas respeitando as seguintes condições:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{g}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} \Delta P(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) \\ \Delta Q(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}^{esp} - \mathbf{P}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) \\ \mathbf{Q}^{esp} - \mathbf{Q}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (2.6)$$

onde:

ΔP e ΔQ - vetor dos desvios de potência ativa e reativa, respectivamente;

\mathbf{P}^{esp} e \mathbf{Q}^{esp} - vetor dos valores conhecidos de injeção de potência ativa e reativa, respectivamente;

\mathbf{P} - vetor das injeções de potência ativa nas barras PQ e PV calculadas pela Eq. 2.3;

\mathbf{Q} - vetor das injeções de potência reativa nas barras PQ calculadas pela Eq. 2.4.

Embora este sistema de equações não-lineares possa ser resolvido por diversos métodos, o método de Newton-Raphson e o Desacoplado Rápido são os que melhor se aplicam ao problema e serão descritos nas próximas seções.

2.2.2 Subsistema 2

Uma vez resolvido o Subsistema 1 e encontrado o estado do sistema, o Subsistema 2 é de fácil resolução. Torna-se possível calcular P_k e Q_k da barra $V\theta$ e Q_k das barras PV (Eqs. 2.3 e 2.4), além de outras variáveis de interesse, como por exemplo, o cálculo dos fluxos de potência das linhas (Eqs. 2.7 e 2.8) e as perdas do sistema. O Subsistema 2 não exige um processo iterativo de resolução e pode ser resolvido de maneira direta.

O fluxo de potência ativa e reativa em linhas de transmissão, transformadores em fase, defasadores puros e defasadores são representados pelas seguintes expressões gerais:

$$P_{km} = (a_{km} V_k)^2 g_{km} - (a_{km} V_k) V_m [g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km} \text{sen}(\theta_{km} + \varphi_{km})] \quad (2.7)$$

$$Q_{km} = -(a_{km} V_k)^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) - (a_{km} V_k) V_m [g_{km} \text{sen}(\theta_{km} + \varphi_{km}) - b_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km})] \quad (2.8)$$

Para linhas de transmissão, assume-se $a_{km} = 1$ e $\varphi_{km} = 0$. Em transformadores em fase, $b_{km}^{sh} = 0$ e $\varphi_{km} = 0$. No caso de defasadores puros, $a_{km} = 1$ e $b_{km}^{sh} = 0$. Por fim, em defasadores $b_{km}^{sh} = 0$.

2.3 Métodos tradicionais de solução do fluxo de potência

O problema do fluxo de potência, descrito na seção anterior, é um assunto muito estudado e bem fundamentado. Ao longo dos anos, diversos pesquisadores procuraram aprimorar e desenvolver técnicas que solucionassem o problema do fluxo de potência voltado para os sistemas de transmissão.

Destas pesquisas surgiram diferentes métodos de solução utilizados no cálculo do fluxo de potência de redes malhadas e de alta tensão. Os métodos que melhor se destacaram para estas redes são o método de Newton-Raphson e suas versões desacopladas, descritos nas próximas seções. Estes métodos são, até hoje, largamente utilizados na solução do fluxo de potência para sistemas de transmissão, devido às inúmeras vantagens dos métodos aliadas às características da rede.

Entretanto, quando se trata de sistemas de distribuição, este cenário muda. O comportamento dos métodos desacoplados é prejudicado e não apresenta um bom desempenho. Em teoria, o método de Newton resolve redes mal-condicionadas, por outro lado, a maneira como ele é manipulado para solucionar o fluxo de potência para sistemas de transmissão não apresenta bom desempenho quando aplicado em redes de distribuição.

Dessa maneira, até mesmo o conhecido método de Newton aplicado em redes de transmissão precisa passar por alterações em sua formulação para que se torne atraente na análise redes de distribuição. Muitos métodos foram propostos com este intuito ao longo dos anos.

2.3.1 Método de Newton-Raphson

O método de Newton é baseado na linearização de certa função em torno de um ponto inicial especificado. É um método numérico muito conhecido e utilizado na solução de sistemas algébricos não-lineares. Suas características, como robustez e rápida convergência quadrática, tornaram o método de Newton um dos principais métodos aplicados na solução do cálculo do fluxo de potência em sistemas elétricos. Além disso, o método tem bom desempenho para redes mal-condicionadas, o que não ocorre com outros métodos.

Conforme citado anteriormente, o Subsistema 1 do problema do fluxo de potência ($g(x) = 0$) deve ser tratado iterativamente e, desse modo, o método de Newton se apresenta como uma boa aplicação na sua resolução. Pelo método de Newton, tem-se o sistema linear a seguir:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x})^v = \mathbf{J}(\mathbf{x}^v) \Delta \mathbf{x}^v \quad (2.9)$$

onde:

$\mathbf{g}(\cdot)$ - função vetorial de dimensão m_x , onde m_x é o número de incógnitas do fluxo de potência, ou seja, $m_x = 2NPQ + NPV$, dada por:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x})^v = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}^v \\ \Delta \mathbf{Q}^v \end{bmatrix} \begin{matrix} \} NPQ + NPV \\ \} NPQ \end{matrix} \quad (2.10)$$

$\Delta \mathbf{x}$ - vetor de correção de estado, expresso por:

$$\Delta \mathbf{x}^v = \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}^v \\ \Delta \mathbf{V}^v \end{bmatrix} \begin{matrix} \} NPQ + NPV \\ \} NPQ \end{matrix} \quad (2.11)$$

\mathbf{J} - matriz Jacobiana das derivadas de $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ em relação à \mathbf{x} , definida por;

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}^v) = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{bmatrix}^v \begin{matrix} \} NPQ + NPV \\ \} NPQ \end{matrix} \quad (2.12)$$

$\left. \begin{matrix} NPQ + NPV \\ \{ \end{matrix} \right\}$

$\left. \begin{matrix} NPQ \\ \{ \end{matrix} \right\}$

v - contador de iterações.

As submatrizes \mathbf{H} , \mathbf{N} , \mathbf{M} e \mathbf{L} avaliam o grau de sensibilidade entre as potências (ativas e reativas) e as tensões (magnitudes e ângulos de fase) nas barras. Os elementos dessas submatrizes são:

$$\begin{cases} \mathbf{H}_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) \\ \mathbf{H}_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -Q_k - V_k^2 B_{kk} \end{cases} \quad (2.13)$$

$$\begin{cases} \mathbf{N}_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \\ \mathbf{N}_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k^{-1} (P_k + V_k^2 G_{kk}) \end{cases} \quad (2.14)$$

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = -V_k V_m (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \\ \mathbf{M}_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = P_k - V_k^2 G_{kk} \end{cases} \quad (2.15)$$

$$\begin{cases} \mathbf{L}_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) \\ \mathbf{L}_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -V_k^{-1} (Q_k - V_k^2 B_{kk}) \end{cases} \quad (2.16)$$

Portanto, a solução do fluxo de potência pelo método de Newton é definida por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^v \\ \Delta Q^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{bmatrix}^v \begin{bmatrix} \Delta \theta^v \\ \Delta \mathbf{V}^v \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

A cada iteração resolve-se o sistema linear (Eq. 2.9) e atualiza-se o vetor de estados:

$$\Delta P(\mathbf{V}^v, \theta^v) = \mathbf{H}(\mathbf{V}^v, \theta^v) \Delta \theta^v + \mathbf{N}(\mathbf{V}^v, \theta^v) \Delta \mathbf{V}^v \quad (2.18)$$

$$\Delta Q(\mathbf{V}^v, \theta^v) = \mathbf{M}(\mathbf{V}^v, \theta^v) \Delta \theta^v + \mathbf{L}(\mathbf{V}^v, \theta^v) \Delta \mathbf{V}^v \quad (2.19)$$

$$\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta \theta^v \quad (2.20)$$

$$\mathbf{V}^{v+1} = \mathbf{V}^v + \Delta \mathbf{V}^v \quad (2.21)$$

O algoritmo da aplicação do método de Newton no problema do fluxo de potência é detalhado abaixo.

Algoritmo para solução do fluxo de potência via método de Newton

Subsistema 1

- i. Iniciar o contador de iteração $v = 0$. Escolher os valores iniciais das magnitudes das tensões das barras PQ e dos ângulos das tensões das barras PQ e PV (montagem do vetor de estados \mathbf{x}).
- ii. Calcular $P_k(\mathbf{V}^v, \theta^v)$ para as barras PQ e PV , $Q_k(\mathbf{V}^v, \theta^v)$ para as barras PQ e os desvios ΔP^v e ΔQ^v .
- iii. Testar a convergência: se $\max\{|\Delta P_k^v|\} \leq \varepsilon_P$ e $\max\{|\Delta Q_k^v|\} \leq \varepsilon_Q$, o processo iterativo convergiu para a solução (\mathbf{V}^v, θ^v) , ir para o passo (vii). Caso contrário, seguir em frente.
- iv. Determinar a matriz Jacobiana: $\mathbf{J}(\mathbf{V}^v, \theta^v) = \begin{bmatrix} \mathbf{H}(\mathbf{V}^v, \theta^v) & \mathbf{N}(\mathbf{V}^v, \theta^v) \\ \mathbf{M}(\mathbf{V}^v, \theta^v) & \mathbf{L}(\mathbf{V}^v, \theta^v) \end{bmatrix}$.
- v. Encontrar a nova solução $\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta \theta^v$ e $\mathbf{V}^{v+1} = \mathbf{V}^v + \Delta \mathbf{V}^v$, sendo $\Delta \mathbf{V}^v$ e $\Delta \theta^v$ determinados com a solução do sistema linear: $\begin{bmatrix} \Delta P(\mathbf{V}^v, \theta^v) \\ \Delta Q(\mathbf{V}^v, \theta^v) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}(\mathbf{V}^v, \theta^v) & \mathbf{N}(\mathbf{V}^v, \theta^v) \\ \mathbf{M}(\mathbf{V}^v, \theta^v) & \mathbf{L}(\mathbf{V}^v, \theta^v) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^v \\ \Delta \mathbf{V}^v \end{bmatrix}$.
- vi. Incrementar o contador de iterações $v = v + 1$. Voltar ao passo (ii).

Subsistema 2

- vii. Calcular P_k para a barra $V\theta$ e Q_k para as barras $V\theta$ e PV . Outras grandezas também podem ser calculadas, como fluxos de potência nas linhas, perdas, etc.

A dimensão da rede estudada interfere no armazenamento de memória e no tempo de processamento do método de Newton, uma vez que a cada iteração a matriz Jacobiana é reconstruída e recalculada. No entanto, o tamanho do problema não interfere no número de iterações para se chegar à solução do problema. A velocidade da convergência depende do ponto de partida especificado.

A aplicação do método de Newton foi um grande avanço na solução do fluxo de potência. Diversas modificações deste método foram propostas com a finalidade de aprimorar o método às particularidades dos sistemas em estudo. Neste sentido, surgiram os métodos desacoplados (método Desacoplado e método Desacoplado Rápido), que são variações do método de Newton.

Os métodos desacoplados baseiam-se no fato de se verificar, em redes de transmissão (acima de 230 kV), uma intensa sensibilidade entre a potência ativa P e o ângulo de fase das tensões θ e entre a potência reativa Q e a magnitude das tensões V , quando comparadas à relação entre $Q-\theta$ e $P-V$. Baseado no forte acoplamento $P\theta-QV$, resultado da alta relação X/R , as submatrizes N ($\partial P/\partial V$) e M ($\partial Q/\partial \theta$) são ignoradas pelos métodos desacoplados e, conseqüentemente, trazem aproximações à matriz Jacobiana. Tais alterações possibilitam separar o sistema linear em dois subsistemas independentes, o que é conhecido como desacoplamento $P\theta-QV$.

Nestes métodos o processo de convergência é modificado, isto é, o caminho percorrido entre o ponto inicial e a solução é diferente, o que não altera a solução final uma vez que o sistema resolvido continua sendo o Subsistema 1 (Eq. 2.6). Ambos os métodos apresentam taxa de convergência geométrica, o que resulta em um maior número de iterações. Por outro lado, esta característica é compensada pela simplicidade e rapidez de processamento de cada iteração.

2.3.2 Método Desacoplado

O método Desacoplado é resultado de duas modificações do método tradicional de Newton, o desacoplamento $P\theta-QV$ e a aplicação do esquema alternado de resolução, sendo:

$$\Delta P(\mathbf{V}^v, \boldsymbol{\theta}^v) = \mathbf{H}(\mathbf{V}^v, \boldsymbol{\theta}^v) \Delta \boldsymbol{\theta}^v \quad (2.22)$$

$$\boldsymbol{\theta}^{v+1} = \boldsymbol{\theta}^v + \Delta \boldsymbol{\theta}^v \quad (2.23)$$

$$\Delta Q(\mathbf{V}^v, \boldsymbol{\theta}^{v+1}) = \mathbf{L}(\mathbf{V}^v, \boldsymbol{\theta}^{v+1}) \Delta \mathbf{V}^v \quad (2.24)$$

$$\mathbf{V}^{v+1} = \mathbf{V}^v + \Delta \mathbf{V}^v \quad (2.25)$$

Dessa maneira, o problema é separado e resolvido alternadamente. As variáveis θ e V são atualizadas a cada meia-iteração, compensando, de certa maneira, as simplificações sofridas pela matriz Jacobiana. Os desvios de potência reativa são calculados utilizando valores atualizados dos ângulos de fase das tensões.

O algoritmo da aplicação deste método na solução do fluxo de potência é descrito abaixo.

Algoritmo para solução do fluxo de potência via método Desacoplado

Subsistema 1

- i. Iniciar os contadores de iteração $p = q = 0$ e os indicadores de convergência $KP = KQ = 1$. Escolher os valores iniciais das magnitudes das tensões das barras PQ e dos ângulos das tensões da barras PQ e PV (montagem do vetor de estados x).
- ii. Calcular $P_k(V^q, \theta^p)$ para as barras PQ e PV e o desvio ΔP^p .
- iii. Testar a convergência:
 - Se $\max\{|\Delta P_k^p|\} \leq \varepsilon_P$ a meia-iteração $P\theta$ convergiu, fazer $KP = 0$. Se $KQ = 0$, o processo convergiu para solução (V^p, θ^q) , ir para o passo (xii). Caso contrário, ir para o passo (vii).
 - Caso contrário, seguir em frente.
- iv. Determinar a submatriz $H(V^q, \theta^p)$.
- v. Encontrar o novo valor de $\theta^{p+1} = \theta^p + \Delta\theta^p$ sendo $\Delta\theta^p$ determinado com a solução do sistema linear $\Delta P^p(V^q, \theta^p) = H(V^q, \theta^p) \Delta\theta^p$.
- vi. Incrementar o contador de iterações $p = p + 1$ e fazer $KP = 1$.
- vii. Calcular $Q_k(V^q, \theta^p)$ para as barras PQ e os desvios ΔQ^q .
- viii. Testar a convergência:
 - Se $\max\{|\Delta Q_k^q|\} \leq \varepsilon_Q$ a meia-iteração QV convergiu, fazer $KQ = 0$. Se $KP = 0$, o processo convergiu para a solução (V^p, θ^q) , ir para o passo (xii). Caso contrário ir para o passo (ii).
 - Caso contrário, seguir em frente.
- ix. Determinar a submatriz $L(V^q, \theta^p)$.
- x. Encontrar o novo valor de $V^{q+1} = V^q + \Delta V^q$ sendo ΔV^q determinado com a solução do sistema linear $\Delta Q^q(V^q, \theta^p) = L(V^q, \theta^p) \Delta V^q$.
- xi. Incrementar o contador de iterações $q = q + 1$ e fazer $KQ = 1$. Voltar ao passo (ii).

Subsistema 2

xii. Calcular P_k para a barra $V\theta$ e Q_k para as barras $V\theta$ e PV . Outras grandezas também podem ser calculadas, como fluxos de potência nas linhas, perdas, etc.

O método Desacoplado tem ainda uma versão normalizada, a qual pode apresentar uma convergência mais rápida para alguns sistemas. Considerando V a matriz diagonal das magnitudes das tensões das barras do sistema, as submatrizes H e L podem ser escritas do seguinte modo:

$$H = VH' \quad (2.26)$$

$$L = VL' \quad (2.27)$$

Neste caso, a versão normalizada do método Desacoplado é definida por:

$$\Delta P(V^v, \theta^v)/V = H'(V^v, \theta^v)\Delta\theta^v \quad (2.28)$$

$$\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta\theta^v \quad (2.29)$$

$$\Delta Q(V^v, \theta^{v+1})/V = L'(V^v, \theta^{v+1})\Delta V^v \quad (2.30)$$

$$V^{v+1} = V^v + \Delta V^v \quad (2.31)$$

2.3.3 Método Desacoplado Rápido

A dedução do método Desacoplado Rápido é baseada na formulação da versão normalizada do método Desacoplado, descrita na seção anterior. A principal diferença entre os dois métodos desacoplados está na utilização, pelo método Desacoplado Rápido, de matrizes constantes B' e B'' ao invés das submatrizes H' e L' . Para isso, são feitas as seguintes considerações:

- θ_{km} pequeno - $\cos \theta_{km} \approx 1$ e $\sin \theta_{km} \approx 0$
- $|B_{km}| \gg |G_{km} \sin \theta_{km}|$
- $|B_{kk} V_k^2| \gg |Q_k|$
- V_k e $V_m \approx 1$ p.u.

A aplicação destas aproximações às submatrizes H' e L' resulta em:

$$\left. \begin{array}{l} H'_{km} \cong -B_{km} \\ H'_{kk} \cong -B_{kk} \end{array} \right\} \Rightarrow H' \cong B' \quad (2.32)$$

$$\left. \begin{array}{l} L'_{km} \cong -B_{km} \\ L'_{kk} \cong -B_{kk} \end{array} \right\} \Rightarrow L' \cong B'' \quad (2.33)$$

As deduções acima mostram que as matrizes B' e B'' dependem somente dos parâmetros da rede, o que as torna constantes durante o processo iterativo e resulta em um menor esforço computacional, visto que não é mais necessário calcular e inverter H e L a cada iteração. Elas levam estes nomes por serem similares à matriz de susceptâncias B com a ressalva de que B' não possui as linhas e colunas referentes à barra $V\theta$ e B'' não possui também as linhas e colunas referentes às barras PV . Deste modo, as matrizes B' e B'' possuem dimensões diferentes, mantendo as estruturas das submatrizes H e L .

As equações do método Desacoplado Rápido são:

$$\Delta P(\mathbf{V}^v, \boldsymbol{\theta}^v)/\mathcal{V} = \mathbf{B}'(\mathbf{V}^v, \boldsymbol{\theta}^v)\Delta\boldsymbol{\theta}^v \quad (2.34)$$

$$\boldsymbol{\theta}^{v+1} = \boldsymbol{\theta}^v + \Delta\boldsymbol{\theta}^v \quad (2.35)$$

$$\Delta Q(\mathbf{V}^v, \boldsymbol{\theta}^{v+1})/\mathcal{V} = \mathbf{B}''(\mathbf{V}^v, \boldsymbol{\theta}^{v+1})\Delta\mathbf{V}^v \quad (2.36)$$

$$\mathbf{V}^{v+1} = \mathbf{V}^v + \Delta\mathbf{V}^v \quad (2.37)$$

Foi observado um melhor desempenho do método quando, na construção da matriz B' , foram desprezadas as resistências séries das linhas e os elementos da rede relacionados à potência reativa. Essa versão do método Desacoplado Rápido ficou conhecida como versão XB .

Outra versão relevante é a BX , na qual as resistências são desprezadas na montagem da matriz B'' , ao invés da B' . Os elementos *shunt* continuam sendo ignorados em B' e em B'' passam a ser duplicados.

Ambas as versões apresentam convergências semelhantes quando se trata de sistemas de alta tensão. No entanto, a versão BX apresenta uma melhor convergência em sistemas que possuem linhas com baixas relações X/R .

A seguir é apresentado o algoritmo da metodologia citada acima.

Algoritmo para solução do fluxo de potência via método Desacoplado Rápido

Subsistema 1

- i. Iniciar os contadores de iteração $p = q = 0$ e os indicadores de convergência $KP = KQ = 1$. Escolher os valores iniciais das magnitudes das tensões das barras PQ e dos ângulos das tensões das barras PQ e PV (montagem do vetor de estados \mathbf{x}).
- ii. Calcular as matrizes B' e B'' .
- iii. Calcular $P_k(\mathbf{V}^q, \boldsymbol{\theta}^q)$ para as barras PQ e PV e o desvio $\Delta\mathbf{P}^p$.
- iv. Testar a convergência:

- Se $\max\{|\Delta P_k^p|\} \leq \varepsilon_P$ a meia-iteração $P\theta$ convergiu, fazer $KP = 0$. Se $KQ = 0$, o processo convergiu para a solução (V^p, θ^q) , ir para o passo (xi). Caso contrário, ir para o passo (vii).
 - Caso contrário, seguir em frente.
- v. Encontrar o novo valor de $\theta^{p+1} = \theta^p + \Delta\theta^p$ sendo $\Delta\theta^p$ determinado com a solução do sistema linear $\Delta P^p(V^q, \theta^p) = B' \Delta\theta^p$.
- vi. Incrementar o contador de iterações $p = p + 1$ e fazer $KP = 1$.
- vii. Calcular $Q_k(V^q, \theta^p)$ para as barras PQ e os desvios ΔQ^q .
- viii. Testar a convergência:
- Se $\max\{|\Delta Q_k^q|\} \leq \varepsilon_Q$ a meia-iteração QV convergiu, fazer $KQ = 0$. Se $KP = 0$, o processo convergiu para a solução (V^p, θ^q) , ir para o passo (xi). Caso contrário ir para o passo (ii).
 - Caso contrário, seguir em frente.
- ix. Encontrar o novo valor de $V^{q+1} = V^q + \Delta V^q$ sendo ΔV^q determinado com a solução do sistema linear $\Delta Q^q(V^q, \theta^p) = B'' \Delta V^q$.
- x. Incrementar o contador de iterações $q = q + 1$ e fazer $KP = 1$. Voltar ao passo (iii).

Subsistema 2

- xi. Calcular P_k para a barra $V\theta$ e Q_k para as barras $V\theta$ e PV . Outras grandezas também podem ser calculadas, como fluxos de potência nas linhas, perdas, etc.

2.4 Métodos de solução do fluxo de potência para sistemas de distribuição

A topologia de sistemas de distribuição foi planejada, historicamente, de maneira radial devido a algumas vantagens dessa configuração, como a simplicidade de análise. Por este motivo, inicialmente não foram desprendidos grandes esforços no avanço dos estudos do fluxo de potência para essas redes.

No entanto, algumas ferramentas de cálculo do fluxo de potência em sistemas de distribuição que abrangem topologia radial e fracamente malhada foram propostas ao longo dos anos. Considera-se que estas técnicas surgiram seguindo duas tendências distintas. Um grupo abrange os métodos que têm como base o procedimento de varredura do sistema elétrico. O outro grupo compreende os métodos que aperfeiçoam os métodos clássicos utilizados em sistemas de transmissão como, por exemplo, o método de Newton e suas

versões desacopladas, para as características particulares (parâmetros e topologia) dos sistemas de distribuição.

Nas próximas seções são apresentados breves resumos dos métodos mais utilizados para resolver o problema do fluxo de potência dos sistemas de distribuição, todos eles baseados na varredura da rede. São eles: o método Escalonado, o método Soma das Correntes e o método Soma das Potências.

Os métodos de varredura, também conhecidos como métodos *Backward/Forward Sweep*, foram desenvolvidos considerando a topologia radial dos sistemas de distribuição, definida por um conjunto de nós unidos por ramos de tal modo a não existir ciclos fechados, onde só existe um caminho para o fluxo de potência entre a subestação de distribuição (nó fonte) e o consumidor (nó terminal). Uma rede de distribuição radial típica é ilustrada na Figura 2.1.

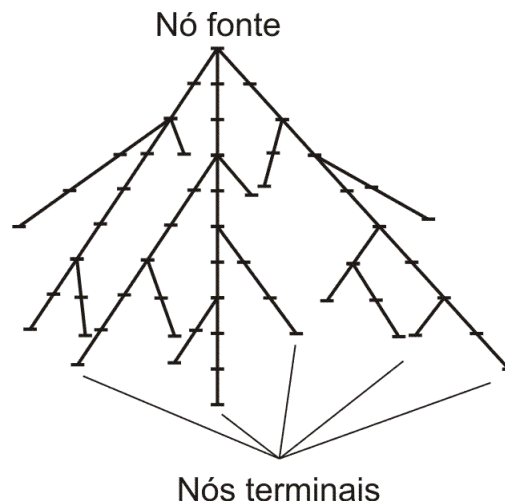


Figura 2.1 - Sistema de distribuição radial típico

Estes métodos consistem em dois passos, a varredura a montante da rede (*backward sweep*), partindo dos nós extremos percorrendo os ramos até o nó fonte, e a varredura a jusante da rede (*forward sweep*), que faz o caminho contrário.

A idéia proposta por Garcia e Monticelli (1984) de dividir o problema do fluxo de potência em dois subsistemas também é apropriada na análise de sistemas de distribuição. O Subsistema 1 é responsável por encontrar o estado do sistema e sua formulação varia conforme o método iterativo escolhido. O Subsistema 2, por sua vez, é o mesmo independente do método utilizado. Nele é possível calcular várias variáveis de interesse, como por exemplo, P e Q da barra $V\theta$, Q das barras PV , fluxos de potência das linhas e as perdas do sistema.

2.4.1 Método Escalonado

O método Escalonado, proposto por Kersting e Mendive (1976), foi desenvolvido com base na técnica iterativa *ladder* e é aplicado na solução do fluxo de potência em sistemas de distribuição radiais.

Este método, assim como os outros métodos *Backward/Forward Sweep*, consiste em determinar o estado do sistema através de consecutivas execuções de dois passos básicos, a varredura a montante e a varredura a jusante da rede.

A varredura a montante é a etapa principal deste método. Aqui, ela é responsável por determinar o estado do sistema, isto é, as tensões de todas as barras. Para isso, são calculadas as correntes de carga em todas as barras e as correntes nos ramos. A varredura a jusante da rede ocorre caso o método não convirja na etapa a montante. Nela, os valores das tensões das barras calculados no passo a montante são atualizados, a fim de fornecer novo valor de partida plana para a próxima varredura a montante.

Estas varreduras são repetidas até que se alcance a convergência.

Partida plana

O processo de resolução começa com a escolha do valor inicial de tensão da subestação alimentadora. Geralmente, assume-se este mesmo valor de tensão para todas as outras barras da rede.

Varredura a montante

Considerando que são conhecidas as injeções de potência das barras e que suas tensões são iguais à tensão da subestação, inicia-se a varredura a montante (*backward sweep*) calculando a corrente de carga da última barra pela Eq. 2.38.

$$\dot{I}_k = \left(\frac{\dot{S}_k^{esp}}{\dot{V}_k} \right)^* \quad (2.38)$$

onde:

k - varia de N_b (número de barras da rede) até 2;

\dot{S}_k^{esp} - injeção de potência complexa especificada da barra k ;

\dot{V}_k - tensão complexa da barra k .

Em seguida, determina-se a corrente do ramo entre a barra precedente e a última barra pela aplicação direta da lei de corrente de Kirchhoff:

$$\dot{I}_{k-1,k} = \dot{I}_k + \sum_{b \in A_k} \dot{I}_{k,b} \quad (2.39)$$

sendo A_k o conjunto das barras alimentadas pela barra k .

Uma vez conhecida a corrente do ramo, pode-se encontrar a tensão da barra precedente à última barra pela aplicação da lei de tensão de Kirchhoff:

$$\dot{V}_{k-1} = \dot{V}_k + \dot{Z}_{k-1,k} \cdot \dot{I}_{k-1,k} \quad (2.40)$$

Note que o desenvolvimento da varredura a montante foi feito utilizando como exemplo a barra terminal da rede ($k = N_b$), pela qual se inicia a varredura a montante. Este procedimento, representado pelas Eqs. 2.38, 2.39 e 2.40, deve ser repetido para todas as barras, isto é, k variando de N_b a 2.

Critério de convergência

Uma vez encontrada todas as tensões das barras, a convergência da solução é testada através da diferença entre as magnitudes das tensões calculada e especificada do nó fonte e comparada a uma tolerância.

$$\text{Erro} = \left| \dot{V}_1 \right| - \left| \dot{V}_1^{esp} \right| \quad (2.41)$$

Varredura a jusante

Caso a convergência não tenha sido alcançada, a tensão do nó fonte assume o valor especificado:

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_1^{esp} \quad (2.42)$$

Então, a rede é varrida a jusante, isto é, do nó fonte até atingir o nó extremo (k variando de 1 até N_b-1), atualizando as novas tensões das barras, pela lei de tensão de Kirchhoff, usando os valores de correntes encontrados na varredura a montante:

$$\dot{V}_{k+1} = \dot{V}_k - \dot{Z}_{k,k+1} \cdot \dot{I}_{k,k+1} \quad (2.43)$$

onde k varia de 1 até N_b-1 e $\dot{Z}_{k,k+1}$ é a impedância da linha entre a barra k e a barra $k+1$.

A seguir é apresentado o algoritmo do Subsistema 1 da solução do fluxo de potência pelo método Escalonado.

Algoritmo do Subsistema 1 para solução do fluxo de potência via método Escalonado

- i. Iniciar o contador de iteração $\nu = 0$. Escolher o valor inicial da tensão da subestação alimentadora (\dot{V}_1^ν). Arbitrar o mesmo valor para todas as barras do sistema.
- ii. Iniciar a varredura a montante (*backward sweep*). Para k variando de N_b até 2:
 - Calcular a corrente da carga na barra k (\dot{I}_k^ν) da seguinte maneira: $\dot{S}_k^{esp} = \dot{V}_k^\nu \cdot \dot{I}_k^{\nu*}$.
 - Calcular a corrente da linha entre a barra precedente e a própria barra k ($\dot{I}_{k-1,k}^\nu$) aplicando a lei de corrente de Kirchhoff: $\dot{I}_{k-1,k}^\nu = \dot{I}_k^\nu + \sum_{b \in A_k} \dot{I}_{k,b}^\nu$.
 - Calcular a tensão da barra precedente à barra k (\dot{V}_{k-1}^ν) pela aplicação da lei de tensão de Kirchhoff: $\dot{V}_{k-1}^\nu = \dot{V}_k^\nu + \dot{Z}_{k-1,k} \cdot \dot{I}_{k-1,k}^\nu$.
- iii. Testar a convergência: se $\left\| \dot{V}_1^\nu - \dot{V}_1^{esp} \right\| \leq \varepsilon$, o processo iterativo convergiu para a solução (\dot{V}^ν). Caso contrário, incrementar o contador de iterações $\nu = \nu + 1$ e seguir em frente.
- iv. Atribuir o valor especificado à tensão da subestação: $\dot{V}_1^{\nu+1} = \dot{V}_1^{esp}$.
- v. Iniciar a varredura a jusante (*forward sweep*). Para k variando de 1 até $N_b - 1$:
 - Encontrar a nova tensão da barra que sucede a barra k ($\dot{V}_{k+1}^{\nu+1}$) pela aplicação da lei de tensão de Kirchhoff $\dot{V}_{k+1}^{\nu+1} = \dot{V}_k^{\nu+1} - \dot{Z}_{k,k+1} \cdot \dot{I}_{k,k+1}^\nu$, usando as correntes encontradas na varredura a montante. Voltar ao passo (ii).

Como ilustrado na Figura 2.1, um alimentador de distribuição típico consiste de um alimentador principal com alimentadores laterais, dos quais derivam outros ramos laterais, e assim por diante. Neste método, é necessário realizar sub-iterações para cada alimentador.

2.4.2 Método da Soma das Correntes

O método desenvolvido por Shirmohammadi et al. (1988) foi baseado no método Escalonado proposto por Kersting e Mendive (1976) e ficou conhecido como método da Soma das Correntes. Este método é aplicado na solução do fluxo de potência de sistemas de distribuição com topologia radial e fracamente malhada.

Este método também propõe sucessivas varreduras do sistema em duas etapas, a varredura a montante da rede, onde é possível determinar as correntes em todos os ramos do sistema radial, e a varredura a jusante da rede, que possibilita encontrar novos valores de tensão das barras do sistema, isto é, o estado da rede. Esses passos são repetidos até que se alcance a convergência.

O método da Soma de Correntes possui boas características de convergência e é bastante robusto, o que o tornou um dos principais métodos de solução em redes de distribuição, dando origem a diversos outros estudos.

Até hoje, este método se mostra um método bastante importante na solução do fluxo de potência em sistemas de distribuição. Por todos estes motivos mencionados, diversos programas de fluxo de potência aplicados em concessionárias de energia foram desenvolvidos com base neste método e na sua extensão trifásica.

Partida plana

A resolução pelo método Soma das Correntes começa com a escolha de um valor inicial de tensão para o nó fonte, que será o mesmo para todos os outros nós.

Cálculo das correntes de carga das barras

Uma vez definida todas as tensões nas barras, torna-se possível determinar as correntes de carga das barras da seguinte maneira:

$$\dot{I}_k = \left(\frac{\dot{S}_k^{esp}}{\dot{V}_k} \right)^* \quad (2.44)$$

Varredura a montante

Determinadas as correntes de carga das barras, inicia-se a varredura a montante (*backward sweep*) que se refere à somatória das correntes das cargas a fim de encontrar a corrente nos ramos, iniciando a varredura pelas barras terminais até atingir a subestação alimentadora e determinar a corrente total do alimentador de distribuição. Nesta etapa, faz-se a aplicação direta da lei de corrente de Kirchhoff.

$$\dot{I}_{k-1,k} = \dot{I}_k + \sum_{b \in A_k} \dot{I}_{k,b} \quad (2.45)$$

onde k varia de N_b até 2 e A_k é o conjunto das barras alimentadas pela barra k .

Varredura a jusante

Com os valores das correntes nos ramos, parte-se para a varredura a jusante (*forward sweep*), na qual as tensões das barras são atualizadas partindo da subestação até as barras mais distantes. Aqui, é feita a aplicação direta da lei de tensão de Kirchhoff.

$$\dot{V}_{k+1} = \dot{V}_k - \dot{Z}_{k,k+1} \cdot \dot{I}_{k,k+1} \quad (2.46)$$

onde k varia de 1 até N_b-1 .

Critério de convergência

As duas varreduras são repetidas até que algum critério de parada seja atingido. O critério de parada proposto por Shirmohammadi et al. (1988) são os máximos desvios de potência ativa e reativa nas barras da rede, dados pelo erro entre as potências calculadas e as conhecidas de cada barra. A injeção de potência em cada barra é calculada da seguinte maneira:

$$\dot{S}_k = \dot{V}_k \cdot \dot{I}_k^* \quad (2.47)$$

Os desvios de potência ativa e reativa em todas as barras são dados, respectivamente, por:

$$\Delta P_k = \text{Re} \left| \dot{S}_k - \dot{S}_k^{esp} \right| \quad (2.48)$$

$$\Delta Q_k = \text{Im} \left| \dot{S}_k - \dot{S}_k^{esp} \right| \quad (2.49)$$

A partir da metodologia apresentada acima, o algoritmo do Subsistema 1 do cálculo do fluxo de potência pelo método da Soma das Correntes é detalhado abaixo.

Algoritmo do Subsistema 1 para solução do fluxo de potência via método da Soma das Correntes

- i. Iniciar o contador de iteração $\nu = 0$. Escolher o valor inicial da tensão da subestação alimentadora (\dot{V}_1^ν). Arbitrar o mesmo valor para todas as barras do sistema.
- ii. Iniciar a varredura a montante (*backward sweep*). Para k variando de N_b até 2:

- Calcular a corrente de carga em todas as barras (\dot{I}_k^v) conforme a equação:

$$\dot{S}_k^{esp} = \dot{V}_k^v \cdot \dot{I}_k^{v*}.$$

- Calcular a corrente da linha entre a barra precedente e a própria barra k ($\dot{I}_{k-1,k}^v$) aplicando

$$\text{a lei de corrente de Kirchhoff: } \dot{I}_{k-1,k}^v = \dot{I}_k^v + \sum_{b \in A_k} \dot{I}_{k,b}^v.$$

iii. Iniciar varredura a jusante (*forward sweep*). Para k variando de 1 até $N_b - 1$:

- Calcular a tensão da barra que sucede a barra k (\dot{V}_{k+1}^v) pela aplicação da lei de tensão de Kirchhoff $\dot{V}_{k+1}^v = \dot{V}_k^v - \dot{Z}_{k,k+1} \cdot \dot{I}_{k,k+1}^v$, usando as correntes encontradas na varredura a montante.

iv. Calcular as injeções de potência (\dot{S}_k) da seguinte maneira: $\dot{S}_k = \dot{V}_k \cdot \dot{I}_k^*$, e os desvios ΔP_k

$$\text{e } \Delta Q_k: \Delta P_k = \text{Re} \left| \dot{S}_k - \dot{S}_k^{esp} \right| \text{ e } \Delta Q_k = \text{Im} \left| \dot{S}_k - \dot{S}_k^{esp} \right|.$$

- v. Testar a convergência: se $\max\{|\Delta P_k^v|\} \leq \varepsilon$ e $\max\{|\Delta Q_k^v|\} \leq \varepsilon$, o processo iterativo convergiu para a solução (\dot{V}^v). Caso contrário, incrementar o contador de iterações $v = v + 1$ e voltar ao passo (ii).

O algoritmo descrito acima não pode ser aplicado diretamente em sistemas fracamente malhados. Nestes casos, primeiramente é necessário tornar a topologia fracamente malhada em uma configuração estritamente radial. Isto é possível selecionando pontos de ruptura (*breakpoints*) que seccionam as malhas e, então, utilizando o método da compensação.

As correntes dos ramos interrompidos pela inserção de um ponto de ruptura são substituídas por injeções de correntes de sentido opostos em ambos os nós finais sem comprometer as condições de operação da rede. A este sistema resultante, estritamente radial, pode-se aplicar o algoritmo.

2.4.3 Método da Soma das Potências

O método da Soma das Potências, proposto por Céspedes (1990), também faz parte dos métodos de varredura *Backward/Forward Sweep*. Segundo o autor, esta abordagem é baseada em um equivalente elétrico e na eliminação do ângulo de fase das tensões nas

equações a serem resolvidas, o que permite obter uma exata solução trabalhando apenas com as magnitudes das tensões.

O ângulo de fase da tensão não é importante na maioria dos estudos relacionados aos níveis de tensão das redes de distribuição. Além disso, a diferença entre os ângulos de fase das tensões das barras de um alimentador não excedem alguns graus.

Este método é utilizado na solução do fluxo de potência de redes de distribuição com topologia radial, podendo ser aplicado na solução do fluxo de potência de sistemas monofásicos e trifásicos.

Assim como os métodos anteriores, este método também realiza consecutivas varreduras do sistema em dois passos, a varredura a montante da rede, na qual se determina as cargas equivalentes em todas as barras do sistema, e a varredura a jusante da rede, que possibilita encontrar novos valores de tensão das barras, isto é, o estado da rede. Esses passos são repetidos até que se alcance a convergência.

Partida plana

A resolução pelo método da Soma das Potências tem início com a determinação de um valor inicial de tensão para a subestação alimentadora. As demais barras assumem o mesmo valor de tensão.

Varredura a montante

Conhecidas todas as tensões nas barras, inicia-se a varredura a montante (*backward sweep*) que consiste em determinar a carga equivalente de cada barra da rede, partindo da barra extrema até a subestação distribuidora.

A carga equivalente de uma barra é dada pela carga total alimentada por esta barra, isto é, a carga equivalente compreende a carga da própria barra mais todas as outras cargas alimentadas através dela, incluindo as perdas nas linhas.

Em outras palavras, pode-se dizer que a carga equivalente de uma barra representa toda a carga da rede que é alimentada por esta barra de uma maneira concentrada, e é dada por:

$$P_k^{eq} = P_k + \sum_{b \in B_k} P_b + \sum_{l \in D_k} P_l^{perdas} \quad (2.50)$$

$$Q_k^{eq} = Q_k + \sum_{b \in B_k} Q_b + \sum_{l \in D_k} Q_l^{perdas} \quad (2.51)$$

onde:

k - varia de N_b até 1;

P_k , Q_k - carga ativa e reativa da própria barra k , respectivamente;

P_b , Q_b - carga ativa e reativa da barra alimentada através da barra k , respectivamente;

P_l^{perdas} , Q_l^{perdas} - perdas ativa e reativa na linha alimentada através da barra k , respectivamente;

B_k - conjunto das barras alimentadas através da barra k ;

D_k - conjunto das linhas alimentadas através da barra k .

As perdas ativas e reativas podem ser calculadas conforme as equações abaixo:

$$P_{km}^{perdas} = r_{km} \frac{(P_m^2 + jQ_m^2)}{V_m^2} \quad (2.52)$$

$$Q_{km}^{perdas} = x_{km} \frac{(P_m^2 + jQ_m^2)}{V_m^2} \quad (2.53)$$

onde:

k e m – correspondem às barras terminais dos ramos;

V_k , V_m - magnitudes de tensão da barra k e m , respectivamente;

r_{km} , x_{km} - resistência e reatância do ramo entre as barras k e m , respectivamente.

Varredura a jusante

Determinado os valores das cargas equivalentes das barras, passa-se à varredura a jusante (*forward sweep*), onde são calculadas as novas magnitudes das tensões das barras da rede, iniciando pela subestação até atingir as barras mais distantes.

A solução proposta neste método para o problema do fluxo de potência é resolver para todas as linhas a equação a seguir:

$$V_m^4 + [2(r_{km}P_k^{eq} + x_{km}Q_k^{eq}) - V_k^2]V_m^2 + (P_k^{eq^2} + Q_k^{eq^2})(r_{km}^2 + x_{km}^2) = 0 \quad (2.54)$$

sendo P_k^{eq} , Q_k^{eq} as cargas equivalentes ativa e reativa da barra k , respectivamente.

Embora seja de quarta ordem, a Eq. 2.54 tem uma solução simples e não depende do ângulo de fase da tensão, o que simplifica a formulação do problema.

Critério de convergência

Uma vez encontradas as novas tensões das barras, deve-se recalculas as perdas (Eqs. 2.52 e 2.53). As duas varreduras são repetidas até que a variação total das perdas entre duas iterações seja menor que uma tolerância especificada.

Uma vez descrito o método da Soma das Potências, o algoritmo do Subsistema 1 é apresentado a seguir.

Algoritmo do Subsistema 1 para solução do fluxo de potência via método da Soma das Potências

- i. Iniciar o contador de iteração $v = 0$. Escolher o valor inicial da tensão da subestação alimentadora (\dot{V}_1^v). Arbitrar o mesmo valor para todas as barras do sistema.
- ii. Iniciar a varredura a montante (*backward sweep*). Para k variando de N_b até 1:

- Calcular a carga equivalente de cada barra:

$$P_k^{eq} = P_k + \sum_{b \in B_k} P_b + \sum_{l \in D_k} P_l^{perdas} \quad \text{e} \quad Q_k^{eq} = Q_k + \sum_{b \in B_k} Q_b + \sum_{l \in D_k} Q_l^{perdas},$$

sendo as perdas obtidas pelas equações:

$$P_{km}^{perdas} = r_{km} \frac{(P_m^2 + jQ_m^2)}{V_m^2} \quad \text{e} \quad Q_{km}^{perdas} = x_{km} \frac{(P_m^2 + jQ_m^2)}{V_m^2}.$$

- iii. Iniciar varredura a jusante (*forward sweep*). Para k e m variando de 1 até N_b :

- Calcular a magnitude de tensão da barra que sucede a barra k (\dot{V}_{k+1}^v) pela equação

$$V_m^4 + [2(r_{km}P_k^{eq} + x_{km}Q_k^{eq}) - V_k^2]V_m^2 + (P_k^{eq^2} + Q_k^{eq^2})(r_{km}^2 + x_{km}^2) = 0.$$

- iv. Recalculas as perdas e testar a convergência: se variação total das perdas entre duas iterações $\leq \varepsilon$, o processo iterativo convergiu para a solução (V^v). Caso contrário, incrementar o contador de iterações $v = v + 1$ e voltar ao passo (ii).

2.5 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram descritos conceitos importantes para o acompanhamento do trabalho. Uma vez exposta a formulação do problema do fluxo de potência em sistemas elétricos de potência, partiu-se para o detalhamento dos principais métodos iterativos aplicados em sistemas de transmissão e de distribuição.

Em um primeiro momento, foram apresentados os métodos tradicionais aplicados em sistemas de transmissão, são eles o método de Newton-Raphson e suas versões desacopladas. Constatou-se que a utilização do método de Newton no problema do fluxo de potência foi um importante progresso. Entretanto, apesar de sua grande importância, o método de Newton é bastante custoso do ponto de vista computacional. A fim de diminuir este esforço, algumas modificações foram propostas e deram origem ao método Desacoplado e ao método Desacoplado Rápido, sendo este último a variação mais importante e popular.

Este método apresenta a mesma precisão, confiabilidade e eficiência do método de Newton, convergindo de forma mais rápida e com menor esforço computacional. Ele apresenta um maior número de iterações, devido à convergência geométrica, porém cada iteração é processada de maneira mais rápida e simples.

O método de Newton e suas variações desacopladas se mostraram bastante robustos e eficientes quando aplicados em redes de transmissão, motivo pelo qual são, até hoje, amplamente utilizados em programas comerciais e, além disso, são utilizados como ponto de partida do desenvolvimento de diferentes técnicas de solução do fluxo de potência.

Em um segundo momento, foram detalhados os principais métodos de varredura desenvolvidos para sistemas de distribuição, dentre eles o método Escalonado, o método da Soma das Correntes e o método da Soma das Potências.

Estes métodos foram criados especialmente para redes de distribuição levando em conta a sua topologia radial. São conhecidos como métodos *Backward/Forward Sweep* por realizar sucessivas varreduras a montante e a jusante da rede a fim de determinar o estado do sistema. Estes métodos são relativamente simples se comparados aos métodos derivados do método de Newton. Uma grande vantagem que apresentam é não ter em sua formulação a matriz Jacobiana.

Devido à sua boa convergência e robustez, o método da Soma de Correntes é um dos principais métodos utilizados em programas de fluxo de potência para sistemas de distribuição.

CAPÍTULO 3: NORMALIZAÇÃO COMPLEXA POR UNIDADE

3.1 Introdução

A metodologia de normalização complexa por unidade surgiu da necessidade de lidar com os baixos índices X/R das linhas das redes de distribuição e pode ser entendida como uma generalização do conceito da normalização convencional por unidade, bastante utilizado em sistemas elétricos de potência.

O advento da geração de energia próxima ao consumidor sugere que os alimentadores de distribuição sofrerão inúmeras mudanças, a fim de se adequarem às novas exigências do conceito *Smart Grid*, como por exemplo, aumentar a segurança e a confiabilidade na operação e no abastecimento de energia. Para atender este novo cenário, os sistemas de distribuição tenderão a adotar uma topologia cada vez mais malhada.

No entanto, mesmo assumindo algumas características dos sistemas de transmissão, como a topologia malhada e a presença de unidades geradoras, os alimentadores de distribuição mantêm suas particularidades quanto à baixa tensão e aos parâmetros da rede, ou seja, baixos índices X/R continuam sendo um obstáculo para a utilização do método de Newton e suas variações desacopladas na solução do fluxo de potência.

A nova configuração dos sistemas de distribuição tornará os algoritmos de fluxo de potência baseados na topologia radial e fracamente malhada ultrapassados. Dessa maneira, torna-se bastante relevante o desenvolvimento de ferramentas capazes de lidar com essas novas características das redes de distribuição.

A aplicação da normalização complexa por unidade (c.p.u.) em alimentadores de distribuição torna-se interessante por permitir ajustar seus índices X/R , melhorando o desempenho e a convergência do método de Newton e suas versões desacopladas na solução do fluxo de potência de sistemas de distribuição.

Este capítulo traz a descrição da normalização convencional por unidade (p.u.) e a formalização da normalização complexa por unidade (c.p.u.). Também será discutida a incorporação da c.p.u. a programas convencionais de solução do fluxo de potência. Por fim, são apresentadas as metodologias existentes na literatura para cálculo do ângulo de base.

3.2 Normalização convencional (p.u.)

Historicamente, a normalização convencional por unidade das grandezas dos sistemas elétricos foi adotada com a finalidade de simplificação dos cálculos numéricos. Embora a quantidade e complexidade dos cálculos não sejam mais um problema, graças ao avanço da tecnologia, a representação por unidade (p.u.) do sistema continua bastante atrativa. Ela é definida pela razão entre o valor real de uma grandeza e seu valor de base como referência:

$$\text{Valor } p.u. = \frac{\text{Valor real da grandeza}}{\text{Valor base da grandeza}} \quad (3.1)$$

Em sistemas elétricos de potência, devem-se escolher duas grandezas elétricas, dentre tensão, potência, impedância ou corrente, para as quais serão escolhidos os respectivos valores de base. Uma vez estipulados dois valores de base os outros dois serão determinados através da relação:

$$\dot{V} = \dot{Z} \dot{I} \quad (3.2)$$

$$\dot{S} = \dot{V} \dot{I}^* \quad (3.3)$$

Em uma rede com transformadores, diferentes bases de tensão são escolhidas para cada nível de tensão e são relacionadas pela relação de transformação dos transformadores. Convenientemente, o valor escolhido da base de potência é comum para todo o sistema.

3.3 Normalização complexa por unidade (c.p.u.)

Considerando a nova tendência do setor elétrico, a técnica de rotação de eixos apresentada por Garcia e Monticelli (1984), a qual sugere a aplicação de uma rotação de eixos nas admitâncias e nas potências da rede original a fim de obter uma rede com novas relações X/R , foi retomada e reapresentada para a comunidade científica, em novos termos, por Lourenço, Loddi e Tortelli (2010).

Esta reapresentação, chamada normalização complexa por unidade (c.p.u.) é uma extensão da normalização convencional das grandezas elétricas do sistema de potência (p.u.). No entanto, a c.p.u. usa uma base de potência complexa associada à escolha de um ângulo de base apropriado. Desse modo, torna-se possível ajustar as baixas relações X/R das redes de distribuição para níveis característicos de sistemas de transmissão, possibilitando analisar sistemas interligados de transmissão e distribuição (T&D).

Geralmente, para normalizar um sistema elétrico são adotados valores de base reais para tensão e potência de base. A c.p.u. é uma extensão da normalização convencional, na qual se utiliza uma base de potência complexa:

$$\dot{S}_{base} = |\dot{S}_{base}| e^{-j\phi_{base}} \quad (3.4)$$

sendo ϕ_{base} o ângulo de base.

Por outro lado, a fim de manter o estado original da rede, as bases de tensão do sistema seguem a normalização convencional e são mantidas reais:

$$\dot{V}_{base} = |\dot{V}_{base}| e^{j0} = V_{base} \quad (3.5)$$

Desse modo, a impedância base pode ser facilmente determinada:

$$\dot{Z}_{base} = \frac{V_{base}^2}{\dot{S}_{base}^*} = |\dot{Z}_{base}| e^{-j\phi_{base}} \quad (3.6)$$

A magnitude da impedância base é a mesma, independente da normalização ser de maneira convencional ou complexa. No entanto, na c.p.u. o ângulo da impedância base varia, devido à influência do ângulo de base da potência na normalização, como se pode observar:

$$\dot{Z}_{cpu} = \frac{R_{\Omega} + jX_{\Omega}}{\dot{Z}_{base}} = \frac{|\dot{Z}_{\Omega}| e^{j\zeta}}{|\dot{Z}_{base}| e^{-j\phi_{base}}} = |\dot{Z}_{pu}| e^{j(\zeta + \phi_{base})} \quad (3.7)$$

sendo ζ o ângulo de fase original da impedância.

Dessa maneira, pode-se determinar:

$$R_{cpu} = |\dot{Z}_{pu}| \cos(\zeta + \phi_{base}) \quad (3.8)$$

$$X_{cpu} = |\dot{Z}_{pu}| \sen(\zeta + \phi_{base}) \quad (3.9)$$

Pelas Eqs. 3.8 e 3.9 chega-se à relação X/R:

$$\frac{X_{cpu}}{R_{cpu}} = tg(\zeta + \phi_{base}) \quad (3.10)$$

A Figura 3.1 ilustra a aplicação da c.p.u. em um ramo com baixa relação X/R.

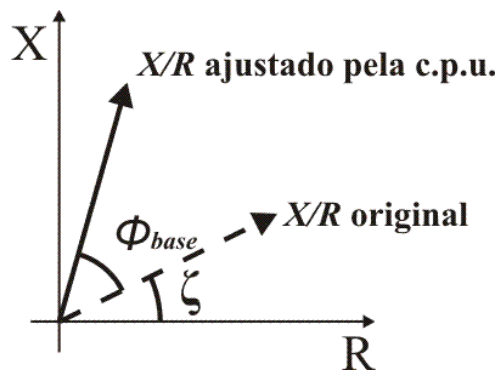


Figura 3.1 - Aplicação da normalização complexa por unidade.

Uma vez definido o ângulo de base e aplicada a c.p.u. em todo o sistema, as impedâncias assumem novos valores (R_{CPU} e X_{CPU}) e conseqüentemente têm-se novos parâmetros para a rede elétrica. Para manter o estado original da rede, ou seja, conservar as tensões complexas das barras, as injeções de potência ativa e reativa também devem ser alteradas.

Desse modo, para a base de potência complexa tem-se:

$$\dot{S}_{cpu} = \frac{|\dot{S}_{VA}| e^{j\delta}}{|\dot{S}_{base}| e^{-j\phi_{base}}} = |\dot{S}_{pu}| e^{j(\delta + \phi_{base})} \quad (3.11)$$

$$\dot{S}_{cpu} = (P_{pu} + j.Q_{pu}) e^{j\phi_{base}} \quad (3.12)$$

As injeções de potência ativa e reativa na nova representação normalizada passam a ser calculadas por:

$$P_{cpu} = |\dot{S}_{pu}| \cos(\delta + \phi_{base}) \quad (3.13)$$

$$Q_{cpu} = |\dot{S}_{pu}| \sin(\delta + \phi_{base}) \quad (3.14)$$

sendo δ o ângulo de fase original da potência complexa.

Verifica-se, a partir de 3.2, que com a aplicação da c.p.u. a base de corrente complexa pode ser descrita por:

$$\dot{I}_{base} = \frac{V_{base}}{|\dot{Z}_{base}| e^{-j\phi_{base}}} = |\dot{I}_{base}| e^{j\phi_{base}} \quad (3.15)$$

Desta relação é possível concluir que, como \dot{I}_{base} tem o mesmo ângulo de base de \dot{S}_{base} , porém de sentido oposto, garante-se um valor real para a base de tensão, mantendo o estado do sistema original. Isto pode ser verificado a partir da aplicação das Eqs. 3.4 e 3.15 na Eq. 3.3, resultando em:

$$\dot{S}_{base} = \dot{V}_{base} \dot{I}_{base}^* \quad (3.16)$$

$$|\dot{S}_{base}| e^{-j\phi_{base}} = V_{base} |\dot{I}_{base}| e^{-j\phi_{base}} \quad (3.17)$$

$$V_{base} = \frac{|\dot{I}_{base}| e^{-j\phi_{base}}}{|\dot{S}_{base}| e^{-j\phi_{base}}} \quad (3.18)$$

$$V_{base} = \frac{I_{base}}{S_{base}} \quad (3.19)$$

Donde se conclui que a aplicação da c.p.u. em uma rede implica em valores de tensões complexas das barras idênticos aos valores resultantes do emprego da normalização

convencional, ou seja, o estado do sistema encontrado por ambas as normalizações são equivalentes:

$$V_{cpu} \equiv V_{pu} \tag{3.20}$$

$$\theta_{cpu} \equiv \theta_{pu} \tag{3.21}$$

3.4 Implementação da normalização complexa

A c.p.u. torna-se bastante atraente por possibilitar que a baixa relação X/R , comum em sistemas de distribuição, seja facilmente alterada para níveis típicos de redes de transmissão através da escolha de um ângulo de base adequado sem modificar o estado do sistema.

A Figura 3.2 ilustra o fluxograma da implementação da c.p.u. em uma rotina de fluxo de potência e ainda ressalta que independente da natureza da normalização, os resultados de V e θ dados pelo Subsistema 1 são os mesmos. Assim, a solução do fluxo de potência é a mesma para ambas as normalizações.

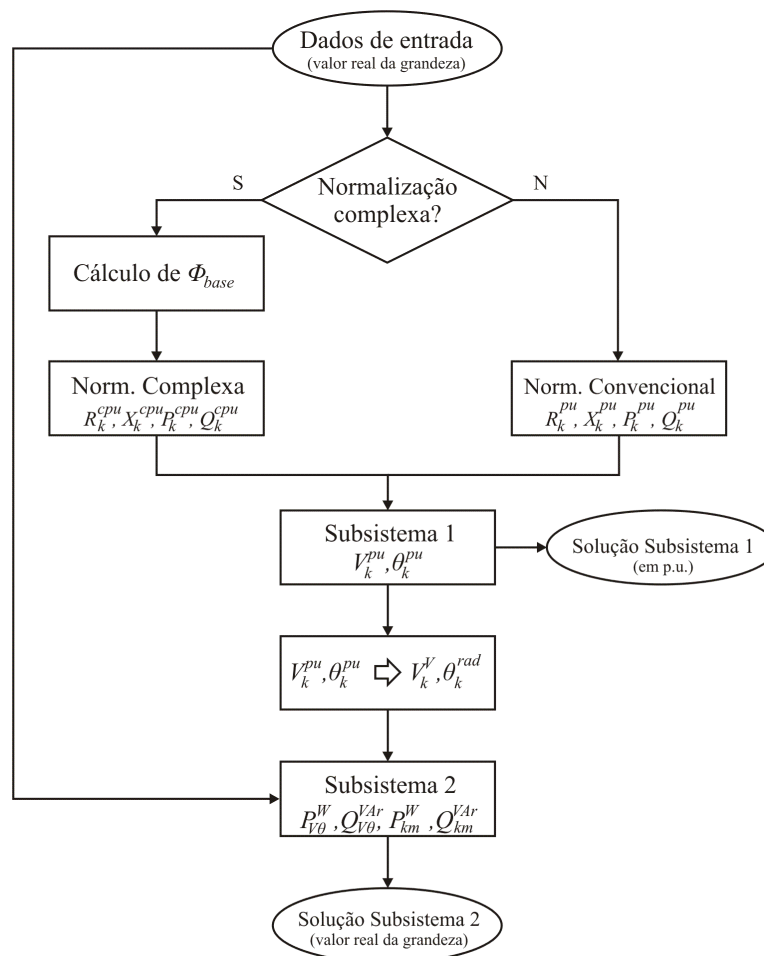
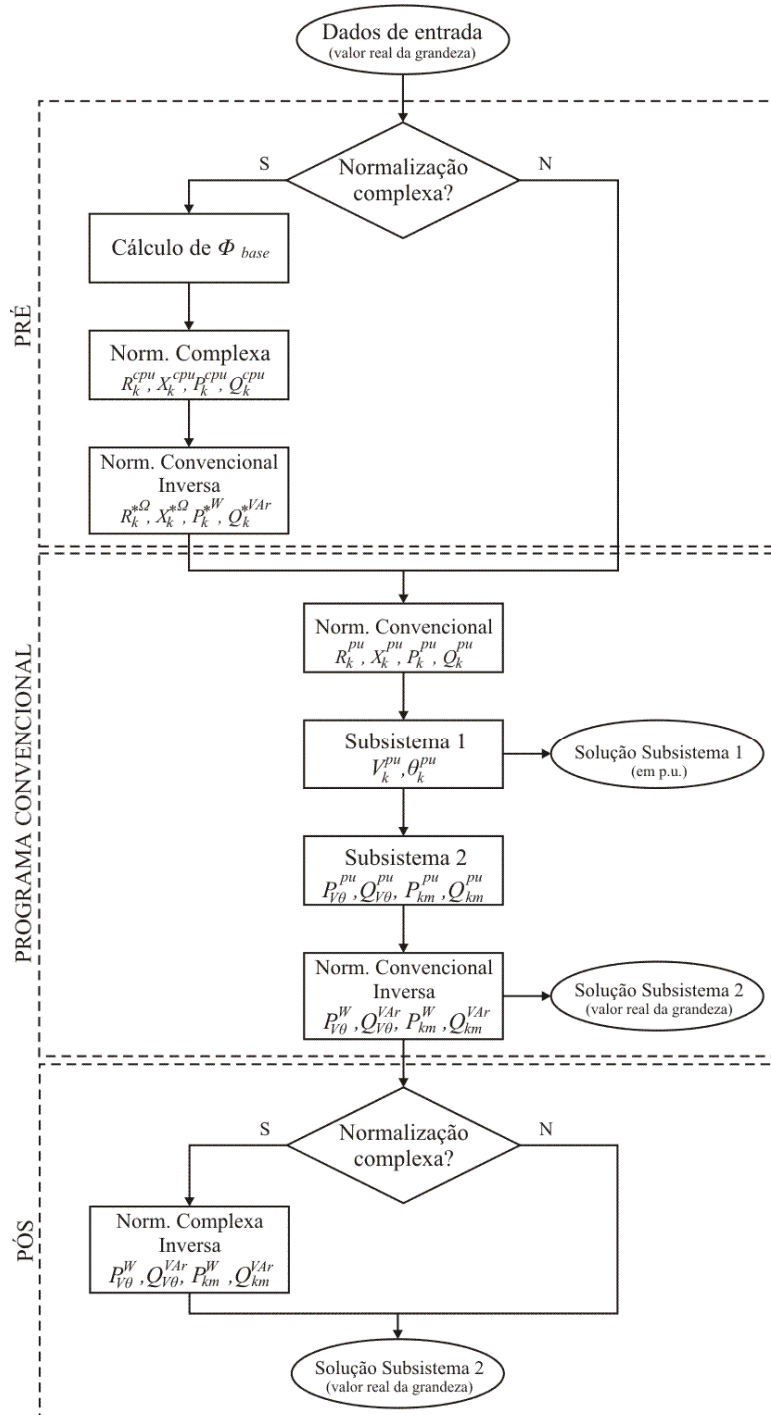


Figura 3.2 - Fluxograma do algoritmo da normalização complexa por unidade

A metodologia de c.p.u. utilizada neste trabalho pode ser acoplada a um programa convencional de solução do fluxo de potência, sendo necessárias algumas adaptações. A Figura 3.3 ilustra o fluxograma do algoritmo da c.p.u. aplicado a um programa convencional.



(*) Dados modificados pela c.p.u.

Figura 3.3 - Fluxograma do acoplamento da c.p.u. a um programa convencional

3.5 Cálculo do ângulo de base: metodologias disponíveis

Na literatura encontram-se algumas técnicas de cálculo do ângulo, neste trabalho chamado de ângulo de base, voltadas para o problema do ajuste das baixas relações X/R de sistemas de distribuição a fim de melhorar a convergência do método Desacoplado Rápido.

A técnica da rotação dos eixos, proposta por Garcia e Monticelli (1984), consiste em elevar as relações X/R da distribuição para o nível das redes de transmissão e, assim, torná-las mais adequadas ao desempenho do método Desacoplado Rápido, mantendo o estado de operação do sistema igual ao original. Neste caso, define-se, de maneira empírica, um ângulo comum a todos os ramos.

Sirait e Irisawa (1995) sugeriram algumas alterações na maneira de calcular o ângulo brevemente mencionadas no anexo de Haley e Ayres (1985). A modificação mais relevante é a proposta de uma única rotação para todas as equações a fim de tornar a formulação mais simples e manter o sentido físico do sistema depois de rotacionado. O cálculo do ângulo de rotação proposto é dado pela média dos ângulos individuais de todos os elementos diagonais da matriz de admitâncias:

$$\phi_{base} = \frac{\sum \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{G_{kk}}{B_{kk}}\right)}{N_b} \quad (3.22)$$

sendo N_b o número de barras do sistema. Os autores validam esta equação comparando o ângulo calculado para uma dada rede com seu ângulo ótimo, encontrado por tentativa e erro.

A sugestão de Medeiros e Lucas (2002), chamada rotação ótima dos eixos, fundamenta-se no cálculo de ângulos de rotação individuais para cada barra da rede através de técnicas de otimização para minimizar os acoplamentos $P\theta-QV$, ou seja, após a rotação as submatrizes M e N devem ser quase nulas. Neste caso, após a rotação a rede perde seu significado físico. Além disso, as matrizes de rede perdem a simetria, aumentando o esforço computacional. Embora a técnica apresente tais particularidades, o estado da rede original é mantido.

Outra técnica, conhecida por rotação automática dos eixos, foi sugerida por Gomes (2006). Esta técnica reuniu os dois grandes benefícios vistos nos métodos de Garcia e Monticelli (1984) e de Medeiros e Lucas (2002), resultando no cálculo de apenas um ângulo de rotação utilizando a técnica de otimização de minimizar os acoplamentos $P\theta-QV$. Assim, foi possível manter o sentido físico da rede após a rotação. O ângulo é calculado pela média

dos ângulos individuais de cada ramo do sistema, resultado da aplicação da técnica dos mínimos quadráticos e da condição de otimalidade:

$$\phi_{base} = \frac{\sum 90^\circ - \text{tg}^{-1}\left(\frac{x_{km}}{r_{km}}\right)}{N_l} \quad (3.23)$$

onde x_{km} e r_{km} são a reatância e a resistência séries dos ramos, respectivamente, e N_l é o total de linhas.

Recentemente, foi feito um estudo comparativo entre o método proposto por Sirait e Irisawa (1995), baseado nos valores diagonais da matriz de admitância de barras, e o método sugerido por Gomes (2006), baseado na impedância série das linhas do sistema. Este estudo mostrou que apesar das metodologias serem distintas, os ângulos determinados por ambos os métodos são muito similares (DURCE; LOURENÇO; TORTELLI, 2010).

Desta maneira, para aplicar a c.p.u. neste trabalho, foi escolhida a metodologia de cálculo do ângulo de base proposta por Gomes (2006), dada pela Eq. 3.23.

3.6 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo, aprimorou-se a apresentação da normalização complexa por unidade, que é uma extensão da normalização convencional, bastante conhecida e utilizada em sistemas elétricos de potência. Diferentemente da normalização convencional, a c.p.u. usa uma base de potência complexa enquanto as bases de tensão da rede são conservadas reais.

A c.p.u. possibilita aumentar facilmente as baixas relações X/R , encontradas em alimentadores de distribuição, através da utilização de um ângulo de base apropriado. Em outras palavras, a aplicação da c.p.u. transforma a rede original em uma rede normalizada com novos parâmetros de rede que condizem com os níveis típicos de redes de transmissão. Esta metodologia é bastante relevante, uma vez que traz melhorias no desempenho do método de Newton e de suas variações no cálculo do fluxo de potência em sistemas de distribuição.

Verificou-se que o estado de uma rede (V, θ) à qual foi aplicada a c.p.u. é exatamente o mesmo estado de uma rede à qual foi aplicada a normalização convencional p.u., assim a solução do fluxo de potência é a mesma para as duas normalizações.

Por fim, concluiu-se que a metodologia de c.p.u. pode ser incorporada em um programa convencional de solução do fluxo de potência, bastando algumas adaptações.

CAPÍTULO 4: MÉTODO PROPOSTO PARA CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA PARA SISTEMAS DE TRANSMISSÃO COM ALIMENTADORES FISICAMENTE REPRESENTADOS

4.1 Introdução

Com a aplicação da normalização complexa por unidade nos sistemas de distribuição, as baixas relações X/R , comum destas redes, podem ser facilmente elevadas para os níveis de transmissão, de forma a permitir que o fluxo de potência dos sistemas de transmissão e de distribuição seja tratado de maneira única.

Neste capítulo, será proposta uma extensão da formulação convencional do fluxo de potência através do método Newton, a fim de adequar a representação física de alimentadores de distribuição em sistemas T&D interconectados e seu algoritmo será detalhado. O método resolve o problema do fluxo de potência desta rede, possibilitando analisar a influência dos alimentadores de distribuição na operação de sistemas de transmissão.

Esta extensão é motivada pela tendência aos novos conceitos trazidos através das tecnologias de *Smart Grid* e pela disseminação de fontes de geração distribuída. Este novo cenário enfatiza a necessidade de ferramentas flexíveis para lidar com qualquer parte de um sistema T&D interligado.

O método proposto está baseado no estudo recentemente apresentado por Lourenço, Loddi e Tortelli (2010). No entanto, diferentemente deste estudo, a metodologia proposta aqui permite lidar com topologia malhada para o sistema T&D, isto é, admite operações em anel fechado entre alimentadores que estão conectados ao sistema de transmissão através de barras de fronteiras distintas.

Além disso, neste capítulo é ressaltado o problema de normalização complexa das barras do tipo *PV* e o tratamento que lhe foi aplicado.

4.2 Análise do fluxo de potência T&D com c.p.u.

A utilização da c.p.u., feita por Lourenço, Loddi e Tortelli (2010), mostrou que para um sistema T&D diferentes ângulos de base podem ser aplicados a cada alimentador de distribuição, caso seja necessário, enquanto que um ângulo de base nulo é adotado para o sistema de transmissão.

Este procedimento garante adequadas relações X/R para todo o sistema T&D. No entanto, segundo os autores, para conservar a equivalência entre o sistema normalizado pela c.p.u. e a rede original, as injeções de potência ativa e reativa das barras de fronteira do sistema T&D são ajustadas da seguinte maneira:

$$P_k^{nova} = P_k^{pu} - \sum_{i=1, nA} P_{k,i}^{cpu} \quad (4.1)$$

$$Q_k^{nova} = Q_k^{pu} - \sum_{i=1, nA} Q_{k,i}^{cpu} \quad (4.2)$$

onde:

P_k^{nova} , Q_k^{nova} - novas injeções de potência ativa e reativa na barra de fronteira k , quando os alimentadores de distribuição são fisicamente representados, respectivamente;

P_k^{pu} , Q_k^{pu} - valores em p.u. das injeções de potência ativa e reativa na barra de fronteira k quando os alimentadores de distribuição não são fisicamente representados, respectivamente;

$P_{k,i}^{cpu}$, $Q_{k,i}^{cpu}$ - valores em c.p.u. das injeções de potência ativa e reativa exigidas pelo alimentador i , respectivamente;

nA - número de alimentadores de distribuição que são fisicamente representados.

A abordagem descrita acima permite a aplicação do método Desacoplado Rápido ao problema do fluxo de potência para sistemas T&D interligados quando os alimentadores de distribuição são conectados radialmente ao sistema de transmissão. Isso significa que esta metodologia (Eqs. 4.1 e 4.2) é capaz de tratar sistemas T&D com topologia fracamente malhadas, como ilustrado na Figura 4.1.

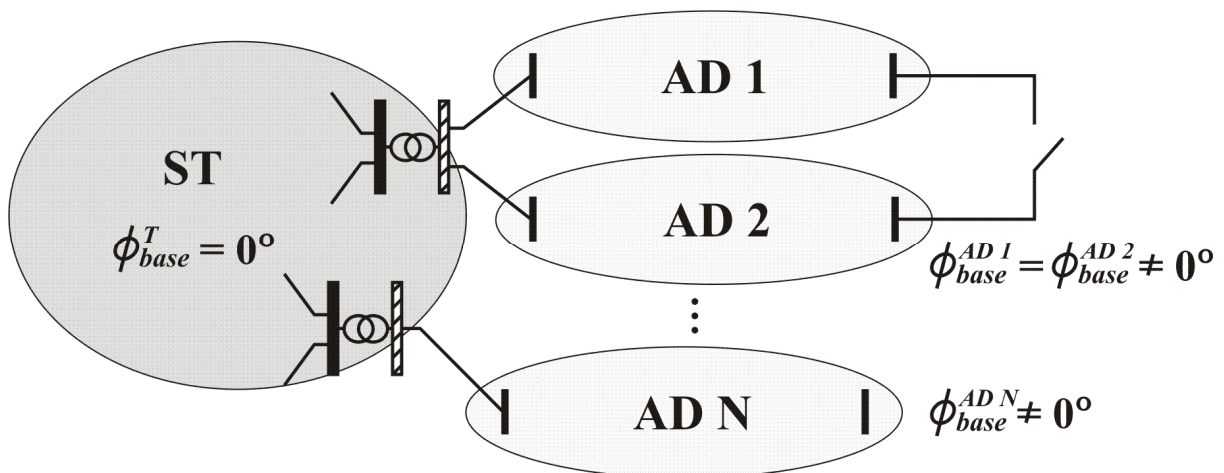


Figura 4.1 - T&D com topologia fracamente malhada entre alimentadores de distribuição

No entanto, esta abordagem assume que a potência ativa e reativa exigida na barra de fronteira por cada alimentador é previamente conhecida, como indica as Eqs. 4.1 e 4.2. Esta hipótese impõe as seguintes limitações:

- (a) A solução do fluxo de potência não é exata, uma vez que a injeção de potência efetiva nas barras de fronteira depende da condição de operação do sistema;
- (b) Esta metodologia não pode ser aplicada quando acontece uma operação em anel fechado entre alimentadores que estão conectados ao sistema de transmissão através de barras de fronteira distintas, como ilustrado na Figura 4.2. Embora seja admitida uma topologia fracamente malhada para o sistema T&D, a topologia malhada é uma limitação do método.

É importante notar que a operação de anel fechado entre dois alimentadores de distribuição é possível desde que se adote o mesmo ângulo de base para ambos os alimentadores.

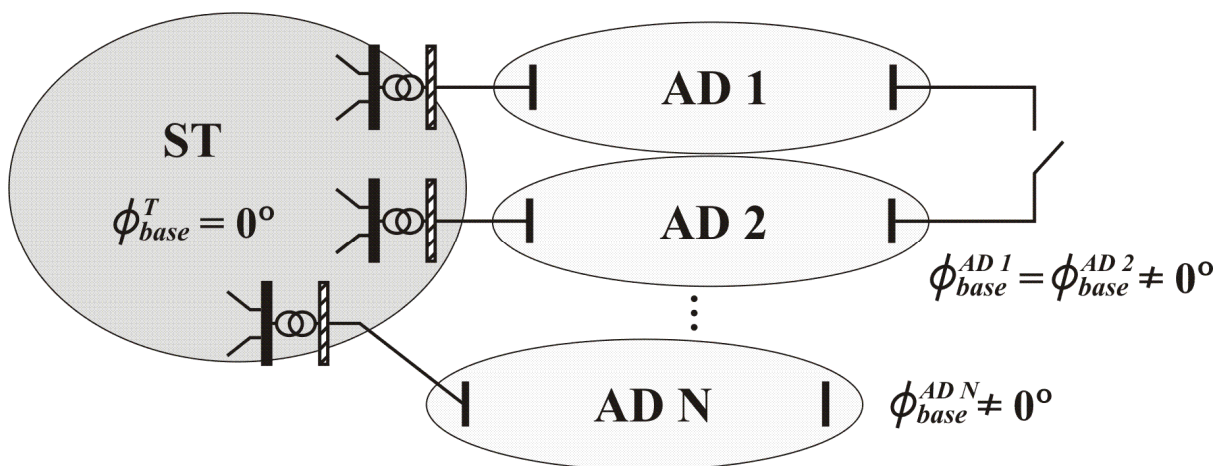


Figura 4.2 - T&D com topologia malhada entre os alimentadores de distribuição

A nova metodologia proposta neste trabalho contorna os obstáculos mencionados. Conforme será detalhada na próxima seção, a formulação convencional do fluxo de potência é estendida para torná-la adequada para redes T&D.

4.3 Nova abordagem: fluxo de potência estendido

A normalização c.p.u., apresentada no capítulo anterior, é usada para ajustar os índices X/R do alimentador de distribuição que foi selecionado para ser fisicamente

representado no modelo da rede. A escolha de um ângulo de base adequado para cada alimentador garante que as relações X/R de todo o sistema T&D serão equivalentes aos níveis tradicionais dos sistemas de transmissão.

Diferentemente do trabalho apresentado em Lourenço, Loddi e Tortelli (2010), o método proposto no presente trabalho não assume que as injeções de potência exigidas pelos alimentadores de distribuição sejam previamente conhecidas. Esse ponto é relevante uma vez que quando se assume um ângulo de base do alimentador diferente daquele aplicado ao sistema de transmissão, há uma discrepância entre as injeções de potência fornecidas pela rede de transmissão e exigidas pelo alimentador.

Aqui, estas discrepâncias entre as injeções de potência, causadas pelo uso de diferentes ângulos de base na c.p.u., são tratadas através da inserção de injeções de potências fictícias de compensação em cada barra de fronteira entre as redes de transmissão e de distribuição. As potências de compensação ativa e reativa são modeladas como novas variáveis de estado.

Além disso, as relações entre os fluxos de potência ativa e reativa através das linhas adjacentes a cada barra de fronteira estão incluídas no problema do fluxo de potência como novas equações, resultando em um conjunto não-redundante de equações algébricas, conforme será descrito na próxima seção (DURCE; LOURENÇO; TORTELLI, 2011).

4.4 Potência de compensação nas barras de fronteira

Como mencionado na seção anterior, o vetor de estados é estendido para incluir as potências de compensação ativa e reativa em cada barra de fronteira.

Assim, a compensação na barra de fronteira k , ilustrado na Figura 4.3, é modelada pelo tratamento de suas potências ativa e reativa, C_k^P e C_k^Q , como novas variáveis de estado. Isto resulta em um vetor de estados estendido, dado por:

$$\bar{\mathbf{x}} = [\boldsymbol{\theta} \quad \mathbf{V} \quad \mathbf{C}^P \quad \mathbf{C}^Q]^T \quad (4.3)$$

onde \mathbf{C}^P e \mathbf{C}^Q são os vetores das potências de compensação ativa e reativa, respectivamente, de dimensões $(N_{fr} \times 1)$, em que N_{fr} é o número de barras de fronteira.

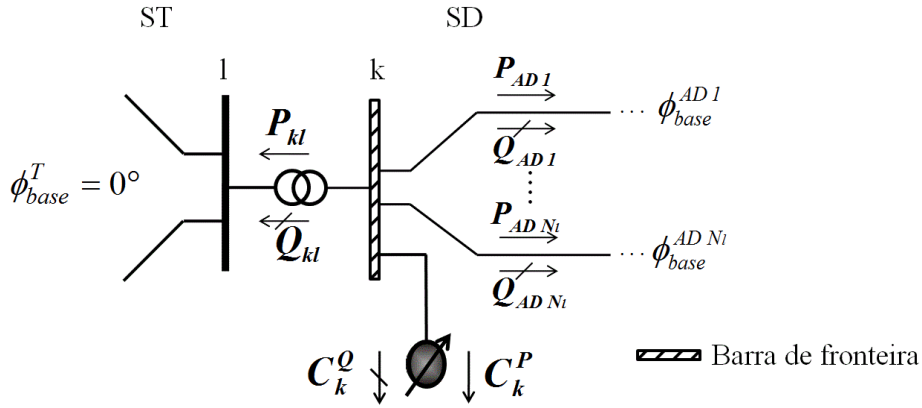


Figura 4.3 - Potências de compensação nas barras de fronteira

Portanto, as expressões de injeções de potência nas barras de fronteira devem ser modificadas para adequar as mudanças no conjunto de variáveis de estado. Assim, a injeção de potência ativa e reativa em uma barra de fronteira k pode ser calculada por:

$$P_k = C_k^P + V_k \sum_{m \in \mathbf{K}} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (4.4)$$

$$Q_k = C_k^Q + V_k \sum_{m \in \mathbf{K}} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (4.5)$$

onde \mathbf{K} é o conjunto de barras adjacentes à barra k , incluindo a própria barra k .

Paralelamente, a informação sobre a relação entre o fluxo de potência através da linha de distribuição conectada à barra de fronteira ($P_{AD N}$, $Q_{AD N}$) e o fluxo de potência através do transformador de fronteira (convertido para a mesma base do alimentador de distribuição - P_{kl} , Q_{kl}) está incluída na formulação do fluxo de potência como novos conjuntos de equações a serem resolvidas juntamente às equações da rede.

Assim, se o transformador de fronteira é conectado através dos nós k e l , onde k é a barra de fronteira e N_l linhas de distribuição são conectadas na barra k , como ilustrado na Figura 4.3, as seguintes equivalências se aplicam:

$$PB_k = P_{kl}^{cpu} (V, \theta) + \sum_{m \in \Omega_k^D} P_{km}^{cpu} (V, \theta) = 0 \quad (4.6)$$

$$QB_k = Q_{kl}^{cpu} (V, \theta) + \sum_{m \in \Omega_k^D} Q_{km}^{cpu} (V, \theta) = 0 \quad (4.7)$$

onde:

PB_k , QB_k - balanço de fluxo de potência ativa e reativa na barra de fronteira, respectivamente, considerando os ramos adjacentes na mesma base de potência complexa;

P_{kl}^{cpu} , Q_{kl}^{cpu} - fluxos de potência ativa e reativa através do transformador de fronteira convertidos para o mesmo ângulo de base dos alimentadores adjacentes, respectivamente;

Ω_k^D - conjunto das barras de distribuição adjacentes à barra de fronteira k .

Um ângulo de base nulo é a escolha mais adequada para a normalização do sistema de transmissão, enquanto que para cada alimentador de distribuição é calculado um ângulo de base ϕ_{base} conforme Eq. 3.23, como ilustrado na Figura 4.3.

Supondo que a mesma magnitude da base de potência é escolhida para o sistema de transmissão e para os alimentadores de distribuição, os fluxos de potência ativa e reativa através do transformador de fronteira podem ser convertidos para o ângulo da base dos alimentadores adjacentes aplicando as Eqs. 3.13 e 3.14, isto é:

$$P_{kl}^{cpu} = P_{kl}^{pu}(V, \theta) \cos \phi_{base} - Q_{kl}^{pu}(V, \theta) \sin \phi_{base} \quad (4.8)$$

$$Q_{kl}^{cpu} = Q_{kl}^{pu}(V, \theta) \cos \phi_{base} + P_{kl}^{pu}(V, \theta) \sin \phi_{base} \quad (4.9)$$

onde P_{kl}^{pu} , Q_{kl}^{pu} são os fluxos de potência ativa e reativa através do transformador de fronteira no ângulo de base original do sistema de transmissão (normalmente zero), que são calculados pelas equações de fluxo de potência convencional, já apresentadas anteriormente de maneira geral pelas Eqs. 2.7 e 2.8.

4.5 Formulação do fluxo de potência estendido

Esta seção apresenta os efeitos das alterações propostas na formulação do fluxo de potência.

Juntamente com a extensão do vetor de estados, mostrado na Eq. 4.3, o conjunto de equações algébricas do fluxo de potência, composto pelos desvios de potência usuais, é aumentado com a inclusão das novas equações representadas pelas Eqs. 4.6 e 4.7, as quais incluem no problema a representação das injeções de potência fictícias de compensação.

O conjunto final aumentado das equações de fluxo de potência é dado por:

$$f(\bar{x}) = \begin{bmatrix} \Delta P(V, \theta, C^P) \\ \Delta Q(V, \theta, C^Q) \\ \Delta PB(V, \theta) \\ \Delta QB(V, \theta) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad \begin{cases} NPQ + NPV \\ NPQ \\ N_{fr} \\ N_{fr} \end{cases} \quad (4.10)$$

onde:

NPQ , NPV - número de barras PQ e PV , respectivamente;

$f(\cdot)$ - função vetorial de dimensão n_x , onde n_x é o número de incógnitas do fluxo de potência estendido, ou seja, $n_x = 2NPQ + NPV + 2N_{fr}$;

ΔP , ΔQ - desvios de potência ativa e reativa para cada barra, respectivamente, calculados de acordo com as Eqs. 4.4 e 4.5 e considerando a existência da potência de compensação apenas nas barras de fronteira;

ΔPB , ΔQB - novas equações relacionadas aos fluxos de potência de transmissão e distribuição através das linhas de transmissão e distribuição adjacentes à barra de fronteira, descritas nas Eqs. 4.6 e 4.7.

O problema do fluxo de potência estendido, representado pela Eq. 4.10, pode ser resolvido por qualquer método tradicional de fluxo de potência. Neste trabalho, o método de Newton-Raphson foi o escolhido, a fim de representar de maneira mais geral a implementação.

O sistema linear resultante, neste caso, é dado por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P(\mathbf{V}, \theta, \mathbf{C}^P) \\ \Delta Q(\mathbf{V}, \theta, \mathbf{C}^Q) \\ \Delta PB(\mathbf{V}, \theta) \\ \Delta QB(\mathbf{V}, \theta) \end{bmatrix}^v = \bar{\mathbf{J}}(\bar{\mathbf{x}}^v) \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \mathbf{V} \\ \Delta \mathbf{C}^P \\ \Delta \mathbf{C}^Q \end{bmatrix}^v \quad (4.11)$$

onde v é o contador de iteração e $\bar{\mathbf{J}}(\bar{\mathbf{x}}^v)$ é a matriz Jacobiana estendida, dada por:

$$\bar{\mathbf{J}}(\bar{\mathbf{x}}^v) = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} & \mathbf{H}_P & \mathbf{0} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} & \mathbf{0} & \mathbf{L}_Q \\ \mathbf{H}_f & \mathbf{N}_f & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_f & \mathbf{L}_f & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^v \begin{matrix} \} NPQ + NPV \\ \} NPQ \\ \} N_{fr} \\ \} N_{fr} \end{matrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial P}{\partial \mathbf{C}^P} & \frac{\partial P}{\partial \mathbf{C}^Q} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{C}^P} & \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{C}^Q} \\ \frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{PB}} & \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{PB}} & \frac{\partial \mathbf{C}^P}{\partial \mathbf{PB}} & \frac{\partial \mathbf{C}^Q}{\partial \mathbf{PB}} \\ \frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{QB}} & \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{QB}} & \frac{\partial \mathbf{C}^P}{\partial \mathbf{QB}} & \frac{\partial \mathbf{C}^Q}{\partial \mathbf{QB}} \end{bmatrix}^v \quad (4.12)$$

A solução do fluxo de potência pode ser obtida iterativamente resolvendo o sistema linear representado pela Eq. 4.11. As variáveis de estado são atualizadas a cada iteração:

$$\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta \theta^v \quad (4.13)$$

$$\mathbf{V}^{v+1} = \mathbf{V}^v + \Delta \mathbf{V}^v \quad (4.14)$$

$$\mathbf{C}^{P^{v+1}} = \mathbf{C}^{P^v} + \Delta \mathbf{C}^{P^v} \quad (4.15)$$

$$\mathbf{C}^{Q^{v+1}} = \mathbf{C}^{Q^v} + \Delta \mathbf{C}^{Q^v} \quad (4.16)$$

É interessante notar que a utilização da metodologia proposta resulta em um pequeno aumento na dimensão da matriz Jacobiana referente a duas vezes o número de barras

de fronteira ($2 \times N_{fr}$), como se constata na Eq. 4.12. São acrescentadas apenas as linhas e colunas referentes àqueles alimentadores que se deseja representar fisicamente.

A figura a seguir apresenta o fluxograma do problema do fluxo de potência estendido resolvido pelo método de Newton.

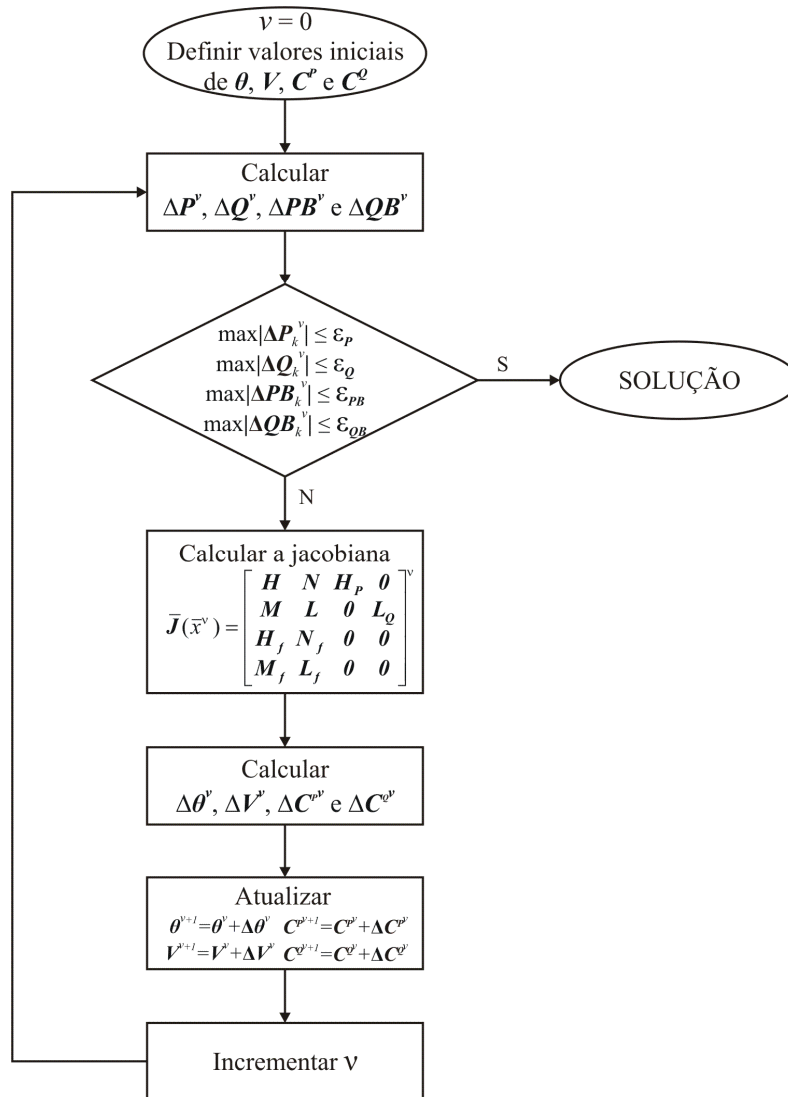


Figura 4.4 - Fluxograma do algoritmo do FP estendido via método de Newton

4.6 Considerações quanto à aplicação da c.p.u. em barras do tipo PV

Com a expansão dos geradores independentes conectados ao sistema de distribuição, percebe-se a importância de incluir na metodologia proposta um tratamento para operação com tensão controlada destes geradores, ou seja, tratando-os como barras do tipo PV.

Como visto na seção 3.3, a normalização c.p.u. é aplicada às injeções de potência ativa e reativa de todas as barras do sistema. No entanto, nas barras do tipo *PV* se conhece, *a priori*, apenas sua potência ativa, sendo a potência reativa dessas barras uma incógnita do problema. Dessa forma, a cada iteração tem-se um novo valor para as injeções de potência reativa nas barras *PV*. Como consequência, a normalização complexa deve também ser aplicada a cada iteração nessas barras de tensão controlada e, assim, modificando tanto o valor da parcela ativa como da parcela reativa da potência injetada, como evidenciado pelas Eqs. 3.13 e 3.14.

O fato do valor da potência ativa normalizada ser alterado a cada iteração provoca um atraso no processo de convergência, já que a cada iteração tem-se um novo valor especificado para a injeção de potência ativa das barras *PV*.

4.7 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo, foi descrita a metodologia proposta neste trabalho. Foi apresentada a formulação convencional do fluxo de potência estendido através do método Newton, a fim de adequar a representação física de alimentadores de distribuição em sistemas T&D interconectados. Este método resolve o problema do fluxo de potência desta rede, possibilitando analisar a influência dos alimentadores de distribuição na operação de sistemas de transmissão.

Para manter a solução do sistema original, às barras de fronteira do sistema T&D foram adicionadas injeções de potência fictícias de compensação, que entram na formulação do fluxo de potência como novas variáveis de estado.

Outra modificação feita foi a inclusão de novas equações referentes à relação entre os fluxos de potência antes e depois da barra de fronteira às equações da rede.

A abordagem do fluxo de potência proposta neste trabalho é baseada na aplicação da c.p.u. para elevar os índices *X/R* dos alimentadores de distribuição fisicamente representados aos mesmos níveis dos sistemas de transmissão, a fim de tornar possível o uso do método de Newton e suas versões desacopladas. Além disso, foi descrito o tratamento dado às barras *PV* frente à aplicação da normalização c.p.u.

A metodologia proposta permite lidar com as mudanças futuras pelas quais os sistemas de transmissão e de distribuição vêm passando, devido aos impactos resultantes das tecnologias de *Smart Grid* em todo o sistema elétrico.

CAPÍTULO 5: SIMULAÇÕES E RESULTADOS

5.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentadas as simulações realizadas e seus principais resultados obtidos com a aplicação da normalização complexa por unidade no problema do fluxo de potência estendido desenvolvido neste trabalho.

A apresentação das simulações e dos resultados está dividida em duas partes. A primeira delas mostra os resultados obtidos com a aplicação da normalização complexa por unidade em sistemas de distribuição, descrita no Capítulo 3. Foram utilizados três sistemas-teste bastante conhecidos na literatura: 12, 33 e 69 barras. Diferentes condições de operação foram simuladas para testar o desempenho dos métodos de Newton e Desacoplado Rápido em alimentadores normalizados pela c.p.u.

A segunda parte refere-se aos resultados obtidos com a nova formulação do fluxo de potência estendido pelo método de Newton, proposto no Capítulo 4. Esta metodologia foi aplicada em um sistema de transmissão e distribuição interligado. A rede T&D é formada pelo sistema-teste de transmissão de 57 barras do IEEE e os três sistemas-teste de distribuição já mencionados, 12, 33 e 69 barras. Neste caso também foram simuladas diversas condições de operação, a fim de validar a nova metodologia.

Quanto ao carregamento dos sistemas testados, para todas as simulações foram consideradas condições de carga pesada, uma vez que esta situação é a mais crítica considerando a convergência do processo iterativo.

5.2 Aplicação em sistemas de distribuição

O algoritmo da normalização complexa por unidade, descrito no Capítulo 3, foi desenvolvido em ambiente *MATLAB*³ e acoplado ao programa de simulação de sistemas elétricos de potência *MATPOWER* (ZIMMERMAN; MURILLO-SÁNCHEZ; GAN, 1997), conforme indica o fluxograma da Figura 3.3.

Nesta rotina, a entrada de dados é inserida em valores reais da grandeza, como geralmente ocorre em programas convencionais. Ao usuário cabe entrar com os valores de

³ MATPOWER: Programa disponível em: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>.

base do sistema e escolher o tipo de normalização desejada, complexa ou convencional, dependendo do sistema em análise. Uma vez escolhida a normalização convencional p.u., automaticamente se utiliza um ângulo de base nulo. Caso o usuário escolha a c.p.u., ele pode optar por uma das duas metodologias de cálculo do ângulo de base (Eqs. 3.22 e 3.23). Este trabalho utiliza a metodologia de Gomes (2006), ou seja, a Eq. 3.23, conforme mencionado anteriormente.

O programa *MATPOWER* permite ao usuário escolher o método de solução do fluxo de potência. Dentre todas as suas opções, aqui será abordado o método de Newton e o Desacoplado Rápido.

Para as simulações, foram utilizados três sistemas-teste de redes de distribuição de 12, 33 e 69 barras, ilustrados na Figura 5.1, 5.2 e 5.3. Os dados destes casos podem ser facilmente encontrados em (EMINOGLU; GÖZEL; HOCAOGLU, 2009).

A fim de avaliar o desempenho do algoritmo, três condições de operação foram simuladas e analisadas (DURCE et al., 2011). A primeira situação, o *Caso A*, considera as redes originais, isto é, a topologia radial dos sistemas é mantida. No *Caso B* diversos anéis são fechados entre as barras a fim de tornar o sistema malhado. Por fim, à topologia malhada são inseridas unidades de geração distribuída em algumas barras, o *Caso C*. As barras, às quais foram incluídas as fontes geradoras, foram tratadas como barras do tipo *PQ*, sendo consideradas unidades de pequeno porte que operam geralmente com fator de potência unitário ou fator de potência constante.

Além disso, cada caso (*Casos A, B e C*) considera um caso de referência (*Caso A0, B0 e C0*), onde o ângulo de base nulo é aplicado a todo o sistema, que é equivalente à aplicação da normalização convencional p.u. Um caso normalizado pela c.p.u. também é considerado para cada caso (*Casos A1, B1 e C1*). Aqui, um ângulo de base é calculado e a aplicação da c.p.u altera os parâmetros do alimentador e, conseqüentemente, os índices *X/R*.

Todos estes casos são resolvidos tanto pelo método de Newton como pelo método Desacoplado Rápido, a fim de verificar a influência das modificações das relações *X/R* no desempenho de cada um.

5.2.1 Sistema-teste de distribuição de 12 barras

A Figura 5.1 ilustra o sistema-teste de 12 barras e as Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam seus dados de barra e de linha em valores nominais (Ω , MW e MVar), e nas duas representações normalizadas (p.u. e c.p.u.). A representação normalizada p.u. se relaciona com os valores nominais pela Eq. 3.1. Já a representação normalizada c.p.u. pode ser facilmente encontrada aplicando as Eqs. 3.8, 3.9, 3.13 e 3.14.

É interessante observar que com a c.p.u. valores negativos para a resistência e a potência ativa são verificados. Estes valores fictícios são consequência da aplicação de um único ângulo de base para toda a rede.

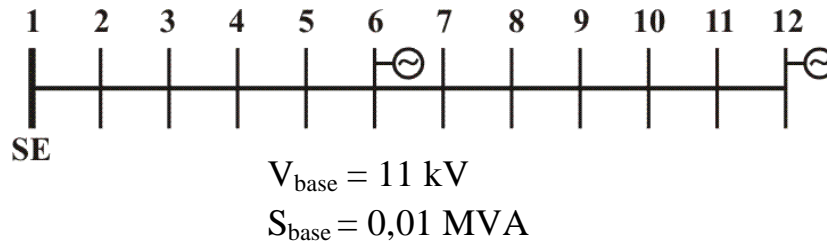


Figura 5.1 - Sistema-teste de distribuição de 12 barras

Tabela 5.1 - Dados de barra do sistema-teste de 12 barras em diferentes representações

Barras	P_d (MW)	Q_d (MVA _r)	Norm. Convencional		Norm. Complexa	
			P_d (p.u.)	Q_d (p.u.)	P_d (c.p.u.)	Q_d (c.p.u.)
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0600	0,0600	6,0000	6,0000	-3,6515	7,6594
3	0,0400	0,0300	4,0000	3,0000	-1,4917	4,7723
4	0,0550	0,0550	5,5000	5,5000	-3,3472	7,0211
5	0,0300	0,0300	3,0000	3,0000	-1,8257	3,8297
6	0,0200	0,0150	2,0000	1,5000	-0,7459	2,3861
7	0,0550	0,0550	5,5000	5,5000	-3,3472	7,0211
8	0,0450	0,0450	4,5000	4,5000	-2,7386	5,7446
9	0,0400	0,0400	4,0000	4,0000	-2,4343	5,1063
10	0,0350	0,0300	3,5000	3,0000	-1,6587	4,3010
11	0,0400	0,0300	4,0000	3,0000	-1,4917	4,7723
12	0,0150	0,0150	1,5000	1,5000	-0,9129	1,9149

Tabela 5.2 - Dados de linha do sistema-teste de 12 barras em diferentes representações

Linhas N°	De	Para	r (Ω)	x (Ω)	Norm. Convencional			Norm. Complexa		
					r (p.u.)	x (p.u.)	x/r	r (c.p.u.)	x (c.p.u.)	x/r
1	1	2	1,0890	0,4598	0,000090	0,000038	0,4	-0,000006	0,000098	-16,3
2	2	3	1,1858	0,4961	0,000098	0,000041	0,4	-0,000006	0,000106	-17,7
3	3	4	2,0933	0,8712	0,000173	0,000072	0,4	-0,000010	0,000187	-18,7
4	4	5	3,1823	1,3310	0,000263	0,000110	0,4	-0,000016	0,000285	-17,8
5	5	6	1,0890	0,4598	0,000090	0,000038	0,4	-0,000006	0,000098	-16,3
6	6	7	1,0043	0,4114	0,000083	0,000034	0,4	-0,000004	0,000090	-22,5
7	7	8	4,4044	1,2100	0,000364	0,000100	0,3	0,000027	0,000376	13,9
8	8	9	5,6386	1,5972	0,000466	0,000132	0,3	0,000031	0,000483	15,6
9	9	10	2,8919	0,8228	0,000239	0,000068	0,3	0,000016	0,000248	15,5
10	10	11	1,5125	0,4235	0,000125	0,000035	0,3	0,000009	0,000130	14,4
11	11	12	1,2342	0,3509	0,000102	0,000029	0,3	0,000007	0,000106	15,1

No *Caso A* pretende-se avaliar a topologia radial do sistema de distribuição de 12 barras, por isso as simulações são feitas com a rede original. No *Caso B* espera-se analisar o comportamento do sistema malhado, assim quatro malhas foram fechadas entre as barras 1-6, 3-11, 5-8 e 10-12. O *Caso C* consiste na inserção de unidades de geração distribuída nas barras 6 e 12 na rede malhada.

A Tabela 5.3 mostra as magnitudes e os ângulos das tensões das 12 barras obtidos pelo programa na condição original de operação, isto é, com a topologia radial. Esta tabela permite comparar os resultados obtidos com o emprego das normalizações convencional e complexa da rede. Os valores confirmam que o estado do sistema obtido através da aplicação da c.p.u. (*Caso A1*) é exatamente o mesmo que o estado resultante da normalização convencional (*Caso A0*). A representação do sistema não afeta o estado da rede.

Essa condição foi verificada para todas as outras situações de operação (*Caso B* e *Caso C*), como é mostrado na Tabela 5.4 e na Tabela 5.5.

Tabela 5.3 - Estado do sistema-teste de 12 barras para o Caso A

Barras	Caso A0		Caso A1	
	V_k (p.u.)	θ_k (rad)	V_k (p.u.)	θ_k (rad)
1	1,000	0,000	1,000	0,000
2	0,994	0,114	0,994	0,114
3	0,989	0,221	0,989	0,221
4	0,981	0,400	0,981	0,400
5	0,970	0,626	0,970	0,626
6	0,967	0,694	0,967	0,694
7	0,964	0,755	0,964	0,755
8	0,955	1,009	0,955	1,009
9	0,947	1,240	0,947	1,240
10	0,944	1,315	0,944	1,315
11	0,944	1,339	0,944	1,339
12	0,943	1,346	0,943	1,346

Tabela 5.4 - Estado do sistema-teste de 12 barras para o Caso B

Barras	Caso B0		Caso B1	
	V_k (p.u.)	θ_k (rad)	V_k (p.u.)	θ_k (rad)
1	1,000	0,000	1,000	0,000
2	0,997	0,076	0,997	0,076
3	0,994	0,140	0,994	0,140
4	0,992	0,191	0,992	0,191
5	0,992	0,219	0,992	0,219
6	0,992	0,209	0,992	0,209
7	0,991	0,232	0,991	0,232
8	0,990	0,276	0,990	0,276

9	0,988	0,317	0,988	0,317
10	0,988	0,297	0,988	0,297
11	0,989	0,276	0,989	0,276
12	0,989	0,286	0,989	0,286

Tabela 5.5 - Estado do sistema-teste de 12 barras para o Caso C

Barras	Caso C0		Caso C1	
	V_k (p.u.)	θ_k (rad)	V_k (p.u.)	θ_k (rad)
1	1,000	0,000	1,000	0,000
2	0,997	0,069	0,997	0,069
3	0,995	0,126	0,995	0,126
4	0,993	0,172	0,993	0,172
5	0,993	0,193	0,993	0,193
6	0,994	0,180	0,994	0,180
7	0,993	0,204	0,993	0,204
8	0,992	0,245	0,992	0,245
9	0,990	0,278	0,990	0,278
10	0,991	0,254	0,991	0,254
11	0,992	0,234	0,992	0,234
12	0,992	0,236	0,992	0,236

A Tabela 5.6 apresenta alguns dos resultados obtidos pelo programa para as diferentes condições operacionais citadas. Pela tabela, pode-se comparar o desempenho do método de Newton e do método Desacoplado Rápido quando aplicada à normalização complexa. Observa-se que o número de iterações do método Desacoplado Rápido diminui quando aplicada a c.p.u. à rede com um ângulo de base calculado pela Eq. 3.23. Essa comparação confirma que houve uma melhora no processo de convergência deste método por meio de um ajuste nas razões X/R dos ramos. O método de Newton, por sua vez, não apresentou nenhuma mudança no seu comportamento.

Com o programa *DSPFAP*, baseado no método de varredura *Backwad/Forward Sweep*, foi possível validar os resultados obtidos nas simulações com topologias radiais.

Tabela 5.6 - Resultados das simulações do sistema-teste de 12 barras

Operação	ϕ_{base}	N.º de iterações	
		Newton	Desac. Rápido
Caso A	A0	$i = 4$	$i_p = i_q = 19$
	A1	$i = 4$	$i_p = 8; i_q = 7$
Caso B	B0	$i = 3$	$i_p = i_q = 13$
	B1	$i = 3$	$i_p = 6; i_q = 5$
Caso C	C0	$i = 3$	$i_p = i_q = 11$
	C1	$i = 3$	$i_p = 5; i_q = 5$

Na Tabela 5.7 são apresentados os fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de distribuição do sistema-teste. No *Caso A*, onde a topologia é radial e não há geração distribuída, pode-se observar que o sentido do fluxo dá-se da subestação alimentadora para as cargas. Já no *Caso B* verifica-se que o sentido do fluxo é resultado da condição de operação, devido à sua topologia malhada. O *Caso C* mostra a influência das unidades de geração no sentido dos fluxos de potência.

Tabela 5.7 - Distribuição dos fluxos de potência do sistema-teste de 12 barras

De	Para	Caso A		Caso B		Caso C	
		P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	2	0,46	0,41	0,27	0,26	0,22	0,23
2	3	0,39	0,35	0,21	0,20	0,16	0,17
3	4	0,35	0,32	0,06	0,08	0,05	0,07
4	5	0,29	0,26	0,01	0,02	-0,00	0,01
5	6	0,26	0,23	-0,06	-0,05	-0,07	-0,05
6	7	0,24	0,22	0,09	0,09	0,09	0,08
7	8	0,18	0,16	0,03	0,03	0,03	0,03
8	9	0,13	0,12	0,03	0,02	0,02	0,02
9	10	0,09	0,08	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02
10	11	0,06	0,05	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04
11	12	0,02	0,02	0,02	0,02	-0,01	-0,00
1	6	-	-	0,17	0,15	0,13	0,12
3	11	-	-	0,10	0,09	0,07	0,07
5	8	-	-	0,04	0,04	0,03	0,03
10	12	-	-	-0,01	-0,01	-0,02	-0,01

5.2.2 Sistema-teste de distribuição de 33 barras

No *Caso A* a topologia radial original do sistema de distribuição de 33 barras é mantida. O *Caso B* busca avaliar a topologia malhada da rede. Para isso, cinco malhas foram criadas entre as barras 8-21, 12-22, 9-15, 25-29 e 18-33. O *Caso C* pretende verificar a influência do acréscimo de geração distribuída no sistema malhado. Neste caso, as unidades de geração foram conectadas às barras 5 e 18.

Na Figura 5.2 é mostrado o sistema-teste de 33 barras. Seus dados de barra e de linha podem ser encontrados nas Tabelas I.A e I.B (Anexo I). As Tabelas I.C, I.D e I.E

apresentam o estado da rede nas diferentes situações de operação: operação radial (*Caso A*), operação malhada (*Caso B*) e operação com geração distribuída (*Caso C*).

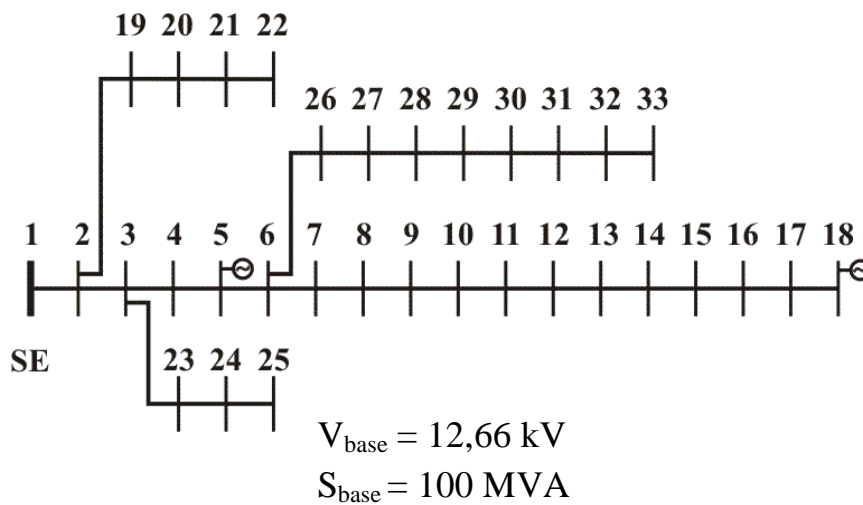


Figura 5.2 - Sistema-teste de distribuição de 33 barras

Analisando as tabelas, observa-se que para este sistema novamente se confirma que o estado do sistema obtido através da aplicação da c.p.u. é exatamente o mesmo que o estado resultante da normalização convencional, como esperado.

Na Tabela 5.8 encontram-se os valores dos ângulos de base e o número de iterações referente a cada situação de operação. Assim como ocorreu no sistema-teste de 12 barras, o número de iterações do método Desacoplado Rápido foi menor com a utilização da c.p.u. Já o método de Newton não apresentou diferença na convergência.

Os resultados obtidos nas simulações com topologias radiais foram validados pelo programa *DSPFAP*.

Tabela 5.8 - Resultados das simulações do sistema-teste de 33 barras

Operação	ϕ_{base}	N.º de iterações		
		Newton	Desac. Rápido	
Caso A	A0	0°	$i = 3$	$i_p = i_q = 12$
	A1	$51,3^\circ$	$i = 3$	$i_p = i_q = 7$
Caso B	B0	0°	$i = 3$	$i_p = i_q = 9$
	B1	$51,9^\circ$	$i = 3$	$i_p = i_q = 6$
Caso C	C0	0°	$i = 3$	$i_p = i_q = 9$
	C1	$51,9^\circ$	$i = 3$	$i_p = i_q = 6$

5.2.3 Sistema-teste de distribuição de 69 barras

As simulações realizadas no sistema-teste de 69 barras seguem o mesmo procedimento descrito nos sistemas-teste de 12 e 33 barras. O *Caso A* consiste na avaliação da topologia radial original do sistema de distribuição de 69 barras. O *Caso B* analisa a topologia malhada da rede, para o qual foram criadas onze malhas entre as barras 35-47, 50-67, 67-20, 37-51, 52-43, 52-65, 69-53, 59-46, 15-68, 16-27 e 22-25. Por fim, o *Caso C* conta com a inserção de geração distribuída nas barras 7, 27, 40 e 60.

A representação do sistema-teste de 69 barra é ilustrada na Figura 5.3 e os dados desta rede encontram-se nas Tabelas II.A e II.B (Anexo II). As Tabelas II.C, II.D e II.E apresentam o estado da rede de 69 barras nas diferentes situações de operação: operação radial (*Caso A*), operação malhada (*Caso B*) e operação com geração distribuída (*Caso C*).

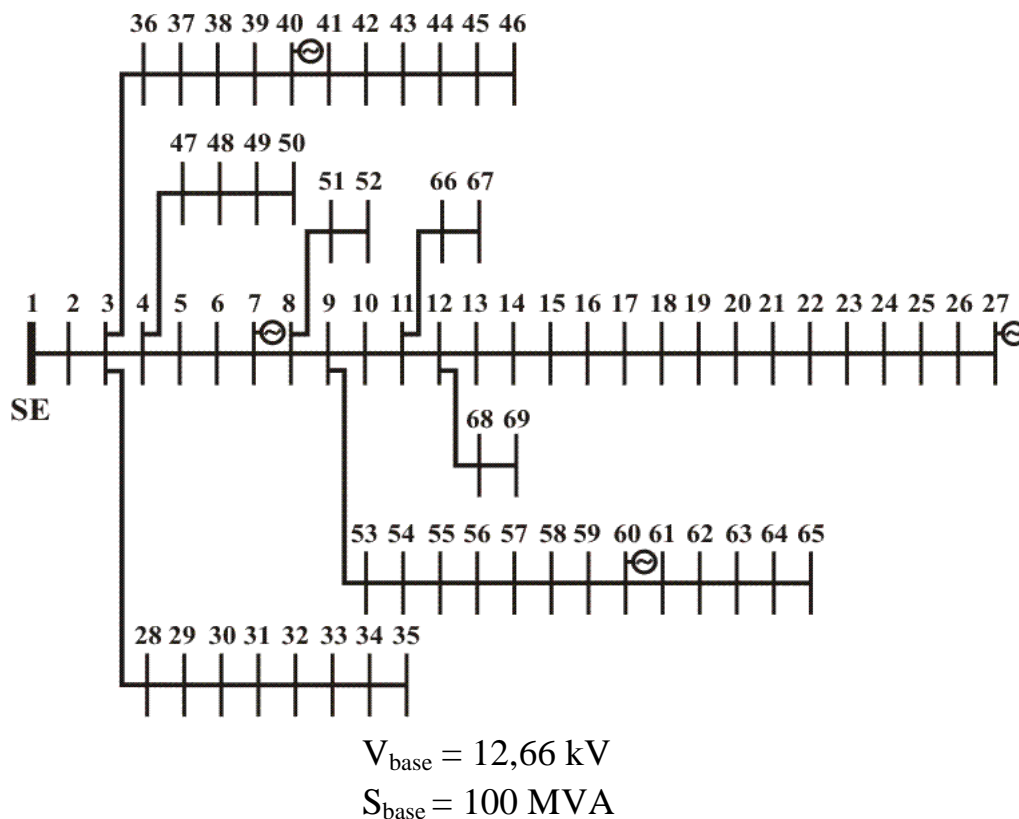


Figura 5.3 - Sistema-teste de distribuição de 69 barras

Como esperado, o estado do sistema obtido através da aplicação da c.p.u. é exatamente o mesmo que o estado resultante da normalização convencional.

Para este sistema-teste também se verificou que com a utilização da c.p.u. houve uma melhora na convergência do método Desacoplado Rápido, ao passo que o método de Newton não sofreu alterações, como pode-se observar pela Tabela 5.9.

O programa *DSPFAP* validou os resultados encontrados nas simulações com topologias radiais.

Tabela 5.9 - Resultados das simulações do sistema-teste de 69 barras

Operação	ϕ_{base}	N.º de iterações	
		Newton	Desac. Rápido
Caso A	A0	0°	$i_p = i_q = 15$
	A1	57,3°	$i_p = i_q = 7$
Caso B	B0	0°	$i_p = 14; i_q = 13$
	B1	59,3°	$i_p = 9; i_q = 8$
Caso C	C0	0°	$i_p = 14; i_q = 13$
	C1	59,3°	$i_p = 9; i_q = 8$

5.3 Aplicação em sistemas T&D interligados

Um programa para o fluxo de potência estendido baseado no método de Newton foi desenvolvido em ambiente *MATLAB* com base na formulação descrita no Capítulo 4.

Para as simulações, foi utilizado um sistema T&D interligado composto pelos três sistemas-teste de redes de distribuição de 12, 33 e 69 barras e pelo sistema-teste de transmissão de 57 barras do IEEE (UWEE, 2011), apresentados na Figura 5.4.

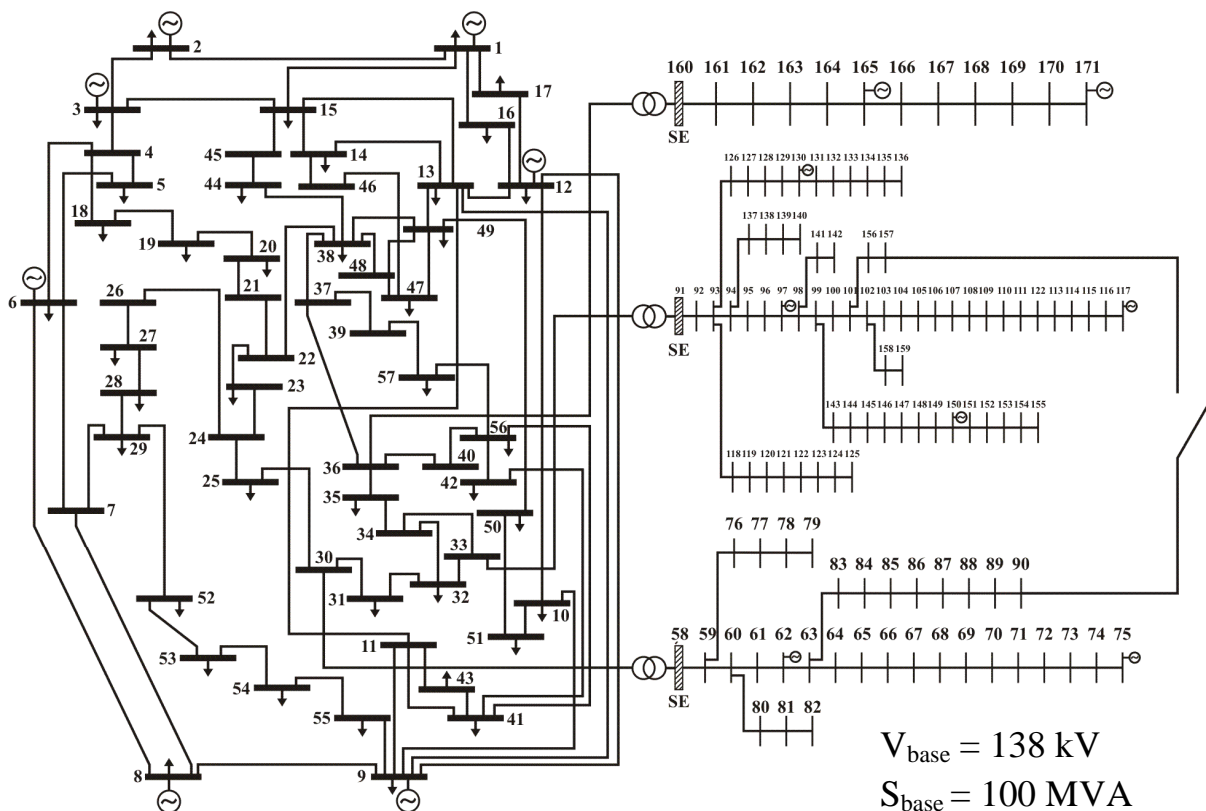


Figura 5.4 - Sistema-teste T&D 171 de barras

Nas Tabelas III.A e III.B (Anexo III) encontram-se os dados de barra e de linha do sistema-teste de transmissão de 57 barras. Os dados dos alimentadores de distribuição foram apresentados nos Anexos I e II.

O diagrama na Figura 5.4 mostra que a rede é composta pelo sistema de transmissão de 57 barras (barras 1 a 57) conectada a três alimentadores de distribuição (*ADI*, *AD2* e *AD3*) através de três diferentes transformadores de potência (30-58, 33-91 e 36-160).

As mesmas fontes de geração distribuída utilizadas nas simulações anteriores são aqui consideradas, isto é, nas barras 62 e 75 do *ADI*, nas barras 97, 117, 130 e 150 do *AD2* e nas barras 165 e 171 do *AD3*.

As barras 58, 91 e 160 são as barras de fronteira, como pode ser visto na Figura 5.4. De acordo com a abordagem proposta, as injeções de potência fictícias de compensação ativa e reativa são atribuídas a cada barra de fronteira, como mostrado na Figura 4.3.

Assim como nas simulações anteriores, os resultados são divididos em casos: *Caso A*, *Caso B*, *Caso C* e *Caso D*. Nos três primeiros casos os alimentadores são fisicamente representados.

O *Caso A* considera que os alimentadores de distribuição são radialmente conectados ao sistema de transmissão, ou seja, é considerada uma operação em anel aberto entre o alimentador 1 e 2. O *Caso B* assume uma operação em anel fechado entre os alimentadores 1 e 2. O *Caso C* assume, juntamente com a operação em anel fechado, que as barras que possuem unidades geradoras controlam a sua magnitude de tensão, isto é, são tratadas como barras do tipo *PV*.

Novamente, a todas as situações de operação descritas acima é aplicada primeiramente a normalização convencional (caso referência), onde o ângulo de base nulo é utilizado em todo o sistema. Em seguida é considerado o uso da normalização complexa, a fim de ajustar as relações X/R das redes de distribuição aos níveis dos sistemas de transmissão, através de um ângulo de base adequado, apresentado na Tabela 5.10.

Para aplicar a metodologia proposta na operação de anel fechado entre dois alimentadores de distribuição, é necessário que se adote o mesmo ângulo de base para ambos os alimentadores. Assim, o ângulo de base dos alimentadores 1 e 2 apresentado Tabela 5.10 foi obtido através da média dos ângulos de base de cada alimentador, que podem ser encontrados nas Tabelas 5.8 e 5.9. O ângulo de base do *AD3*, por sua vez, permanece o mesmo da Tabela 5.6.

Tabela 5.10 - Ângulos de base do sistema T&D

ϕ_{base}	ST	AD1	AD2	AD3
Caso referência	0°	0°	0°	0°
Caso normalizado	0°	54,3°	54,3°	70,5°

Por fim, no último caso, o *Caso D*, os alimentadores são simplificados e substituídos por suas respectivas injeções de potência equivalentes conectadas às barras do sistema de transmissão.

Para todos os casos, a barra 1 foi definida como a barra de referência e a partida plana considerada foi: $V = 1$ p.u., $\theta = 0^\circ$, $C^P = 0$, $C^Q = 0$ foi considerada para as tensões complexas das barras do sistema

5.3.1 Caso A: Operação em anel aberto

Este caso considera uma operação em anel aberto, o que implica que todos os *ADs* são radialmente conectados ao sistema de transmissão. Conforme Tabela 5.10, as simulações para o *Caso A* são divididas nos casos *A0* e *A1*. O *Caso A0* (caso referência para o *Caso A*), assume ângulos de base nulos para o sistema de transmissão e para os alimentadores. O *Caso A1*, por sua vez, considera os ângulos de base apresentados na última linha da Tabela 5.10.

O método de fluxo de potência proposto para sistemas T&D é aplicado à rede resultante. Os estados da rede (tensões complexas em cada barra) obtidos para o *Caso A1* são exatamente os mesmos obtidos pelo caso referência (*Caso A0*), confirmando que a abordagem proposta não altera a solução do fluxo de potência, como discutido no Capítulo 4.

A convergência foi atingida na quinta iteração para ambos os casos. Os resultados referentes às potências de compensação nas barras de fronteira para o caso referência são apresentados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Balanço de potência nas barras de fronteira - Caso A0

Barra 58		Barra 91		Barra 160	
58-30	-0,0312 -j0,0230	91-33	-0,0260 -j0,0270	160-36	0,0016 -j0,0041
58-59	0,0312 +j0,0230	91-92	0,0260 +j0,0270	160-161	-0,0016 +j0,0041
C₅₈	0 + j0	C₉₁	0 + j0	C₁₆₀	0 + j0

Neste caso, no qual foram adotados ângulos de base nulos para o sistema inteiro, os fluxos de potência através dos transformadores de potência de fronteira (30-58, 33-91 e 36-

160) são exatamente os mesmos que os fluxos de potência injetados em seus respectivos alimentadores, representados pelos fluxos de potência através das linhas 58-59, 91-92 e 160-161, fato que pode ser verificado comparando os valores da segunda e terceira linha da Tabela 5.11.

Conseqüentemente, as potências de compensação ativa e reativa são iguais a zero para todas as barras de fronteira, como mostrado na última linha da Tabela 5.11.

A Tabela 5.12 apresenta o balanço de potência nas barras de fronteira do *Caso A1*.

Tabela 5.12 - Balanço de potência nas barras de fronteira - Caso A1

Barra 58		Barra 91		Barra 160	
58-30	-0,0312 -j0,0230	91-33	-0,0260 -j0,0270	160-36	0,0016 -j0,0041
58-59	-0,0005 +j0,0387	91-92	-0,0067 +j0,0369	160-161	-0,0044 -j0,0002
C₅₈	0,0317 -j0,0157	C₉₁	0,0327 -j0,0099	C₁₆₀	0,0027 +j0,0043

Foi possível verificar que os fluxos de potência através do transformador de potência de fronteira são exatamente os mesmos que no caso de referência, uma vez que o ângulo de base para o sistema de transmissão é igual a 0° para ambos os casos. Para tal, basta comparar as segundas linhas das Tabelas 5.11 e 5.12.

Quanto aos valores dos fluxos de potência através dos ramos adjacentes das barras de fronteira (58-59, 91-92 e 160-161), no *Caso A1* eles diferem visivelmente dos valores encontrados no caso referência. Isso é esperado, uma vez que diferentes ângulos de base são adotados para cada caso, como mostra a Tabela 5.10.

Como pode-se verificar, as injeções de potência fictícias nas barras de fronteira (C_{58} , C_{91} e C_{160}), computadas como parte da solução do problema, são capazes de compensar a diferença entre as potências ativa e reativa do sistema de transmissão para os alimentadores quando ângulos de base não-nulos são empregados, como mostrado na Tabela 5.12.

5.3.2 Caso B: Operação em anel fechado

O *Caso B* assume que a chave que conecta o alimentador 1 ao 2 está fechada. Uma vez que estes alimentadores estão conectados ao sistema de transmissão através de subestações distintas (representadas pelas barras de fronteira 58 e 91), uma topologia malhada, como discutida no Capítulo 4 e ilustrada na Figura 4.2, é assumida neste caso.

Foi simulado um caso referência considerando ângulos de base nulos para toda a rede (*Caso B0*), juntamente com o *Caso B1*, que considera a adoção dos ângulos de base, como indicado na Tabela 5.10.

O problema convergiu na quinta iteração para os dois casos. Os resultados em relação às tensões complexas em cada barra são os mesmos para ambos os casos, como esperado. As Tabelas 5.13 e 5.14 mostram o balanço de potência nas barras de fronteira para *Casos B0* e *B1*, respectivamente.

Mais uma vez, potência de compensação ativa e reativa nulas são encontradas para as barras de fronteira no *Caso B0*, enquanto que valores adequados de potências de compensação são encontrados no *Caso B1*.

Tabela 5.13 - Balanço de potência nas barras de fronteira - Caso B0

Barra 58		Barra 91		Barra 160	
58-30	-0,0253 -j0,0224	91-33	-0,0319 -j0,0276	160-36	0,0016 -j0,0041
58-59	0,0253 +j0,0224	91-92	0,0319 +j0,0276	160-161	-0,0016 +j0,0041
C₅₈	0 + j0	C₉₁	0 + j0	C₁₆₀	0 + j0

Tabela 5.14 - Balanço de potência nas barras de fronteira - Caso B1

Barra 58		Barra 91		Barra 160	
58-30	-0,0253 -j0,0224	91-33	-0,0319 -j0,0276	160-36	0,0016 -j0,0041
58-59	-0,0034 +j0,0336	91-92	-0,0038 +j0,0420	160-161	-0,0044 -j0,0002
C₅₈	0,0287 -j0,0112	C₉₁	0,0357 -j0,0144	C₁₆₀	0,0027 +j0,0043

5.3.3 Caso C: Geração distribuída como barra PV

Assim como no *Caso B*, este caso também considera uma operação em anel fechado entre os alimentadores 1 e 2. Além disso, supõe-se que as fontes de geração distribuída das barras 62, 75 (*AD1*), 97, 117, 130, 150 (*AD2*), 165 e 171 (*AD3*) são capazes de controlar suas magnitudes de tensão. Portanto, estas barras são modeladas como barras do tipo *PV* na análise de fluxo de potência.

Novamente, os mesmos ângulos de base apresentados na Tabela 5.10 são adotados. Assim como para os *Casos A e B*, os resultados obtidos com o fluxo de potência estendido para o *Caso C* são consistentes. Para o *Caso C0*, o problema atingiu a convergência na quarta iteração. No entanto, quando aplicada a normalização complexa (*Caso C1*) o número de iterações subiu para 21, como descrito na seção 4.6.

As Tabelas 5.15 e 5.16 mostram os balanços de potência nas barras de fronteira para o *Caso C0* e *C1*.

Tabela 5.15 - Balanço de potência nas barras de fronteira - Caso C0

Barra 58		Barra 91		Barra 160	
58-30	-0,0259 +j0,0042	91-33	-0,0313 +j0,0043	160-36	0,0017 -j0,0068
58-59	0,0259 -j0,0042	91-92	0,0313 -j0,0043	160-161	-0,0017 +j0,0068
C₅₈	0 + j0	C₉₁	0 + j0	C₁₆₀	0 + j0

Tabela 5.16 - Balanço de potência nas barras de fronteira - Caso C1

Barra 58		Barra 91		Barra 160	
58-30	-0,0259 +j0,0042	91-33	-0,0313 +j0,0043	160-36	0,0017 -j0,0068
58-59	0,0185 +j0,0186	91-92	0,0218 +j0,0023	160-161	-0,0070 +j0,0007
C₅₈	0,0074 -j0,0228	C₉₁	0,0096 -j0,0272	C₁₆₀	0,0053 +j0,0061

5.3.4 Caso D: Alimentadores representados por injeções de potência

Este caso considera uma simplificação no sistema T&D. Aqui, os três alimentadores de distribuição foram substituídos por suas cargas equivalentes e representados por injeções de potência nas barras do sistema de transmissão. Esta simplificação é feita para fins de comparação com o *Caso A*, buscando verificar a importância da representação física dos alimentadores.

Ao sistema de transmissão resultante foi aplicada a metodologia de fluxo de potência proposta para sistemas T&D. A Tabela 5.17 apresenta os estados da rede obtidos para o *Caso D* e para o *Caso A*.

Tabela 5.17 - Estado do sistema-teste T&D de 171 barras - Caso A x Caso D

Barra	V_k (p.u.)			Barra	V_k (p.u.)		
	Caso A	Caso D			Caso A	Caso D	
1	1,0400	1,0400		30	0,9520	0,9517	←
2	1,0100	1,0100		31	0,9539	0,9536	←
3	0,9850	0,9850		32	0,9575	0,9572	←
4	0,9850	0,9850		33	0,9554	0,9551	←
5	0,9824	0,9824		34	0,9861	0,9860	←
6	0,9800	0,9800		35	0,9900	0,9899	←
7	0,9949	0,9949		36	0,9928	0,9928	
8	1,0050	1,0050		37	0,9948	0,9947	←
9	0,9800	0,9800		38	0,9997	0,9997	
10	1,0026	1,0026		39	0,9948	0,9947	←
11	0,9936	0,9936		40	0,9929	0,9928	←
12	1,0150	1,0150		41	0,9937	0,9937	
13	1,0040	1,0040		42	0,9931	0,9931	
14	1,0047	1,0047		43	0,9936	0,9936	
15	1,0061	1,0061		44	1,0013	1,0013	
16	1,0243	1,0243		45	1,0046	1,0046	
17	1,0331	1,0331		46	1,0036	1,0036	
18	0,9873	0,9873		47	1,0021	1,0021	
19	0,9907	0,9907		48	1,0014	1,0014	
20	0,9931	0,9931		49	1,0021	1,0021	
21	0,9981	0,9980	←	50	1,0021	1,0021	
22	0,9987	0,9987		51	1,0027	1,0027	
23	0,9983	0,9983		52	0,9903	0,9903	
24	0,9904	0,9903	←	53	0,9885	0,9885	
25	0,9605	0,9603	←	54	0,9849	0,9849	
26	0,9904	0,9904		55	0,9816	0,9816	
27	0,9924	0,9924		56	0,9928	0,9927	←
28	0,9932	0,9932		57	0,9928	0,9928	
29	0,9938	0,9938					

Nota-se que os estados da rede encontrados para ambos os casos foram bastante próximos e que a diferença entre as duas representações foi pequena. Isto ocorreu devido às pequenas perdas dos alimentadores em questão.

No entanto, os resultados obtidos através de um sistema T&D com os alimentadores de distribuição simplificados são incapazes de apresentar informações precisas relativas aos elementos do alimentador, como os fluxos de potência nas linhas de distribuição e as tensões nas barras do alimentador.

Uma representação física do alimentador fornece uma análise mais detalhada e crítica da situação de operação. Além do mais, ela permite que outros estudos em sistemas integrados T&D sejam realizados, tais como, estudos de estabilidade dinâmica e transitória.

5.4 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo, foram apresentados os principais resultados obtidos com o algoritmo da normalização complexa por unidade aplicado em sistemas de distribuição e com o algoritmo da nova formulação do fluxo de potência estendido proposto para sistemas T&D interconectados.

Com relação ao primeiro, os resultados obtidos mostraram que as tensões complexas nas barras independem da normalização aplicada ao sistema. No entanto, a aplicação da c.p.u. apresenta algumas vantagens em relação à normalização convencional. Observou-se que a implementação da c.p.u. diminuiu o número de iterações no processo de convergência do método Desacoplado Rápido, contornando os problemas causados pela baixa relação X/R das redes de distribuição e tornando o método mais rápido. No entanto, o método de Newton não apresentou nenhuma melhoria.

Além disso, verificou-se que o método Desacoplado Rápido convergiu com menor número de iterações para sistemas com topologia malhada, como era esperado. O método de Newton, por sua vez, não se mostrou influenciado pela topologia da rede.

Os resultados obtidos nas operações com topologia malhadas e com inserção de geradores independentes conectados diretamente às redes de distribuição sugerem que a c.p.u. pode ser uma interessante ferramenta para sistemas de distribuição emergentes.

Com relação aos resultados obtidos pela aplicação da formulação estendida do fluxo de potência, observou-se que a abordagem proposta foi capaz de lidar com sistemas T&D, possibilitando a representação física de alimentadores de distribuição de interesse, previamente escolhidos. Assim, pôde-se determinar com exatidão a influência dos alimentadores de distribuição e das fontes de geração distribuída na operação dos sistemas de transmissão.

Foi possível comprovar que as injeções de potência fictícias nas barras de fronteira foram capazes de compensar a diferença entre as potências ativa e reativa do sistema de transmissão para os alimentadores quando ângulos de base não-nulos são empregados no sistema de distribuição.

Essa metodologia se apresenta como um ferramenta alternativa para a análise de redes atuais e futuras.

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

6.1 Considerações gerais

Neste trabalho foi apresentado o comportamento do método de Newton e do método Desacoplado Rápido para a solução do fluxo de potência em sistemas de distribuição normalizados por uma base de potência complexa.

A normalização complexa por unidade (c.p.u.) tem a finalidade de ajustar as relações X/R tornando-as favoráveis à aplicação do método Desacoplado Rápido, dependendo do ângulo de base adotado. O presente trabalho consolidou esta nova representação sistematizando a aplicação da c.p.u. Além disso, enfatizou a sua utilização em redes de distribuição com presença de geração distribuída e topologias malhadas.

Verificou-se que a aplicação da c.p.u. no problema do fluxo de potência resolvido pelo método Desacoplado Rápido é vantajosa, uma vez que diminuiu o número de iterações no processo de convergência, contornando os problemas causados pela baixa relação X/R das redes de distribuição. Tais benefícios, aliados à possibilidade de incorporação à programas convencionais de cálculo do fluxo de potência, fazem da c.p.u. uma interessante ferramenta para sistemas de distribuição emergentes.

A principal contribuição deste trabalho foi o desenvolvimento de uma formulação estendida do fluxo de potência capaz de lidar com sistemas T&D onde os alimentadores de distribuição são fisicamente representados no modelo da rede. A metodologia proposta é baseada no ajuste dos índices X/R dos alimentadores de distribuição aplicando a c.p.u.

Esta abordagem atribui injeções de potência fictícias nas barras fronteira da rede T&D, que são incluídas no problema do fluxo de potência como novas variáveis de estado. Ela mostra que a representação física dos alimentadores de distribuição no modelo de rede traz alguns benefícios importante, entre eles, a análise da influência do sistema de distribuição na operação dos sistemas de transmissão.

A abordagem resultante dá as bases para uma nova ferramenta de cálculo de fluxo de potência que permita lidar com futuras alterações enfrentadas pelos sistemas de transmissão e de distribuição decorrentes do conceito de *Smart Grid*.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

A metodologia apresentada neste trabalho permite aprimoramentos e pode servir como base para trabalhos posteriores de análise de sistemas elétricos de potência.

A seguir são apontadas algumas sugestões para dar continuidade aos estudos iniciados neste trabalho:

- Desenvolver novos tratamentos de aplicação da c.p.u. a barras do tipo *PV*, buscando minimizar os impactos sobre a confiabilidade e eficiência do método proposto.
- Testar a formulação estendida do fluxo de potência proposta neste trabalho através do método Desacoplado Rápido.
- Aproveitar a metodologia desenvolvida em estudos da estabilidade em sistemas elétricos de potência que sofrem impacto de geração distribuída.
- Realizar uma investigação exaustiva da metodologia analisando casos reais de sistemas interligados.
- Expandir os conceitos de unificação do problema do fluxo de potência de sistemas interligados de distribuição e transmissão utilizando um único método e uma única ferramenta computacional para a estimação de estados.

REFERÊNCIAS

- (BARAN; WU, 1989) M. E. Baran, F. F. Wu. **Optimal Sizing of Capacitors Placed on a Radial Distribution System**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4. No. 1, pp. 735-743, Jan. 1989.
- (BERG; HAWKINS; PLEINES, 1967) R. Berg Jr., E. S. Hawkins, W. W. Pleines. **Mechanized Calculation of Unbalanced Load Flow on Radial Distribution Circuits**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, No 4, Abr. 1967.
- (BIRT et al., 1976) K. A. Birt, J. J. Graffy, J. D. McDonald, A. H. El-Abiad. **Three Phase Load Flow Program**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, No. 1, pp 59-65, Jan./Fev. 1976.
- (BROWN; FREEMAN, 2001) E. R. Brown, L. A. Freeman. **Analyzing the Reliability Impact of Distributed Generation**. Proceedings of the IEEE PES Summer Meeting, pp. 1013-1018, Vancouver, Canadá, 2001.
- (CÉSPEDES, 1990) R. G. Céspedes. **New Method for the Analysis of Distribution Networks**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, pp. 391-396, Jan. 1990.
- (CHENG; SHIRMOHAMMADI, 1995) C. S. Cheng, D. Shirmohammadi. **A Three-Phase Power Flow Method for Real-Time Distribution System Analysis**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10. No. 2, pp. 671-679, May 1995.
- (DECKMANN et al., 1980) S. Deckmann, A. Pizzolante, A. Monticelli, B. Stott, O. Alsac. **Numerical Testing of Power System Load Flow Equivalents**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 6, pp. 2292-2300, Nov./Dez., 1980
- (DOE, 2009) U. S. Department of Energy. **Smart Grid System Report**. Estados Unidos, Jul. 2009. Disponível em: <http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/SGSR_Annex_A-B_090707_lowres.pdf>. Acesso em: 05 Jan. 2012.
- (DURCE et al., 2011) C. C. Durce, T. Loddi, E. M. Lourenço, O. L. Tortelli. **Normalização Complexa para Cálculo de Fluxo de Potência em Redes de Distribuição Emergentes**. IX Congreso Latinoamericano de Generación y Transporte de la Energía Eléctrica - IX CLAGTEE, v. 1. p. 1-9, Mar del Plata, Argentina, 2011.

(DURCE; LOURENÇO; TORTELLI, 2011) C. C. Durce, E. M. Lourenço, O. L. Tortelli. **Power Flow Analysis for Interconnected T&D Networks with Meshed Topology**. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe 2011 - ISGT Europe 2011, v. 1., p. 1-7, Manchester, Reino Unido, Dez. 2011.

(DURCE; LOURENÇO; TORTELLI, 2010) C. C. Durce, E. M. Lourenço, O. L. Tortelli. **Interpretação Geométrica da Normalização Complexa Por Unidade para a Aplicação do Método Desacoplado Rápido**. I Congresso de Iniciação Científica e Pós-Graduação – CICPG - Sul Brasil, Florianópolis, Set. 2010.

(DY LIACCO; RAMARAO, 1977) T. E. Dy Liacco, K. A. Ramarao. **Discussion of “Theoretical Study of the Convergence of the Fast Decoupled Load Flow”** by F. F. Wu. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No. 1, p. 273, Jan./Fev.. 1977.

(EMINOGLU; GÖZEL; HOCAOGLU, 2009) U. Eminoglu, T. Gözel, M. H. Hocaoglu. **DSPFAP: Distribution Systems Power Flow Analysis Package Using Matlab Graphical User Interface (GUI)**. Wiley Periodicals Inc, 2009. Disponível em: <<http://www.gyte.edu.tr/Dosya/102/power/>>. Acesso em: 10 Set. 2011.

(FALCÃO, 2010) D. M. Falcão. **Integração de Tecnologias para Viabilização da Smart Grid**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Pará, Mai. 2010.

(GARCIA; MONTICELLI, 1984) A. Garcia, A. Monticelli. **Simulação de Redes de Distribuição de Energia Elétrica através de Fluxo de Carga Desacoplado Rápido**. IX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI, Bahia, Set. 1984.

(GOMES, 2006) R. B. Gomes. **Resolução do problema de fluxo de carga para redes de distribuição utilizando o MDR com rotação automática de eixos**. Dissertação de mestrado, Universidade de Campinas, Mai. 2006.

(GRAAFF et al., 2009) R. A. A. Graaff, J. L. Duarte, W. L. Kling, P. Vaessen. **Intelligent Nodes in Distribution Systems – Transition from Radial to Meshed Operation**, 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - CIRED, Praga, Jun. 2009.

(HALEY; AYRES, 1985) P. H. Haley, M. Ayres. **Super Decoupled Loadflow with Distributed Slack Bus**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 1, pp. 104-113, Jan. 1985.

(IWAMOTO; TAMURA, 1981) S. Iwamoto, Y. Tamura. **A Load Flow Calculation Method for Ill-Conditioned Power Systems**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 4, pp. 1736-1743, Abr. 1981.

(KERSTING; MENDIVE, 1976) W. H. Kersting, D. L. Mendive. **An application of Ladder Network Theory to the Solution of Three-phase Radial Load Flow Problem**. IEEE PES Winter Meeting, New York, Jan. 1976.

(LOURENÇO; LODDI; TORTELLI, 2010) E. M. Lourenço, T. Loddi, O. L. Tortelli. **Unified Load Flow Analysis for Emerging Distribution Systems**. IEEE PES ISGT Europe 2010, Gothenburg, Suécia, Out. 2010.

(LUO; SEMLYEN, 1990) G. X. Luo, A. Semlyen. **Efficient Load Flow for Large Weakly Meshed Networks**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5. No. 4, pp. 1309-1316, Nov. 1990.

(MEDEIROS; LUCAS, 2002) M. F. Medeiros Jr., J. A. Lucas. **Fast Decoupled Load Flow with Optimal Axes Rotation**. Proceedings of the IEEE/PES Transmission and Distribution 2002, Latin America, São Paulo, SP, 2002.

(MONTICELLI, 1983) A. Monticelli, **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**, São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1983.

(MONTICELLI; GARCIA; SAAVEDRA, 1990) A. Monticelli, A. Garcia, O. R. Saavedra. **Fast Decoupled Load Flow: Hypothesis, Derivations, and Testings**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 4, Nov. 1990.

(RAJICIC; BOSE, 1988) D. Rajicic, A. Bose. **A Modification to the Fast Decoupled Power Flow for Networks with High R/X Ratios**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3. No. 2, pp. 743-746, Mai. 1988.

(SHIRMOHAMMADI et al., 1988) D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semley, G. X. Luo. **A Compensation-based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.3, n. 2, pp. 753-762, Mai 1988.

(SIRAIT; IRISAWA, 1995) B. Sirait, J. Irisawa. **Fast Decoupled Load Flow via Axis Rotation**. 1995. Disponível em: <<http://lib.nagaokaut.ac.jp/kiyou/data/study/k17/>>. Acesso em: 10 Set. 2011.

(STAGG; EL-ABIAD, 1979) G. W. Stagg, A. H. El-Abiad. **Computação Aplicada a Sistemas de Geração e Transmissão de Potência**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1979.

(STOTT; ALSAÇ, 1974) H. Stott, O. Alsaç. **Fast Decoupled Load-Flow**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, No. 3, pp. 859-869, 1974.

(TINNEY; HART, 1967) W. F. Tinney, C. E. Hart. **Power Flow Solution by Newton's Method**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, No. 11, pp. 1449-1460, Nov. 1967.

(TRIPATHY et al., 1982) S. C. Tripathy, G. D. Prasad, O. P. Malik, G. S. Hope. **Load-Flow Solutions for Ill-Conditioned Power Systems by a Newton-Like Method**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 10, pp. 3648-3657, Out. 1982.

(UWEE, 2011) University of Washington Electrical Engineering. **Power Systems Test Case Archive - 57 Bus Power Flow Test Case**. Disponível em: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf57/pg_tca57bus.htm>. Acesso em: 12 Set. 2011.

(VAN AMERONGEN, 1989) R. A. M. Van Amerongen. **A General Purpose Version of the Fast Decoupled Load Flow**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 2, pp. 760-770, Mai. 1989.

(VAN NESS; GRIFFIN, 1961) J. E. Van Ness, J. H. Griffin. **Elimination Methods for Load-Flow Studies**. AIEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-80, pp. 299-304, Jun. 1961.

(WARD; HALE, 1956) Ward, J. B., H. W. Hale. **Digital Computer Solution of Power Flow Problems**. AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 75, pp. 398-404, Jun. 1956.

(WASLEY; SLASH, 1974) R. G. Wasley, M. A. Slash. **Newton-Raphson Algorithm for 3-Phase Load Flow**. Proceedings of IEE, Vol. 121, No 7, pp. 630-638, 1974.

(ZIMMERMAN; MURILLO-SÁNCHEZ; GAN, 1997) R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, D. Gan. **Matpower: A Matlab Power System Simulation Package**. Disponível em: <<http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>>. Acesso em: 10 Set. 2011.

ANEXOS

Anexo I – Dados e resultados do sistema-teste de 33 barras

Tabela I.A - Dados de barra do sistema-teste de 33 barras em diferentes representações

Barras	P_d (MW)	Q_d (MVA _r)	Norm. Convencional		Norm. Complexa	
			P_d (p.u.)	Q_d (p.u.)	P_d (c.p.u.)	Q_d (c.p.u.)
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,1000	0,0600	0,0010	0,0006	0,0002	0,0012
3	0,0900	0,0400	0,0009	0,0004	0,0003	0,0010
4	0,1200	0,0800	0,0012	0,0008	0,0001	0,0014
5	0,0600	0,0300	0,0006	0,0003	0,0001	0,0007
6	0,0600	0,0200	0,0006	0,0002	0,0002	0,0006
7	0,2000	0,1000	0,0020	0,0010	0,0005	0,0022
8	0,2000	0,1000	0,0020	0,0010	0,0005	0,0022
9	0,0600	0,0200	0,0006	0,0002	0,0002	0,0006
10	0,0600	0,0200	0,0006	0,0002	0,0002	0,0006
11	0,0450	0,0300	0,0005	0,0003	0,0000	0,0005
12	0,0600	0,0350	0,0006	0,0004	0,0001	0,0007
13	0,0600	0,0350	0,0006	0,0004	0,0001	0,0007
14	0,1200	0,0800	0,0012	0,0008	0,0001	0,0014
15	0,0600	0,0100	0,0006	0,0001	0,0003	0,0005
16	0,0600	0,0200	0,0006	0,0002	0,0002	0,0006
17	0,0600	0,0200	0,0006	0,0002	0,0002	0,0006
18	0,0900	0,0400	0,0009	0,0004	0,0003	0,0010
19	0,0900	0,0400	0,0009	0,0004	0,0003	0,0010
20	0,0900	0,0400	0,0009	0,0004	0,0003	0,0010
21	0,0900	0,0400	0,0009	0,0004	0,0003	0,0010
22	0,0900	0,0400	0,0009	0,0004	0,0003	0,0010
23	0,0900	0,0500	0,0009	0,0005	0,0002	0,0010
24	0,4200	0,2000	0,0042	0,0020	0,0011	0,0045
25	0,4200	0,2000	0,0042	0,0020	0,0011	0,0045
26	0,0600	0,0250	0,0006	0,0003	0,0002	0,0006
27	0,0600	0,0250	0,0006	0,0003	0,0002	0,0006
28	0,0600	0,0200	0,0006	0,0002	0,0002	0,0006
29	0,1200	0,0700	0,0012	0,0007	0,0002	0,0014
30	0,2000	0,6000	0,0020	0,0060	-0,0034	0,0053
31	0,1500	0,0700	0,0015	0,0007	0,0004	0,0016
32	0,2100	0,1000	0,0021	0,0010	0,0005	0,0023
33	0,0600	0,0400	0,0006	0,0004	0,0001	0,0007

Tabela I.B - Dados de linha do sistema-teste de 33 barras em diferentes representações

N°	Linhas		r (Ω)	x (Ω)	Norm. Convencional			Norm. Complexa		
	De	Para			r (p.u.)	x (p.u.)	x/r	r (c.p.u.)	x (c.p.u.)	x/r
1	1	2	0,0922	0,0470	0,0575	0,0293	0,5	0,0131	0,0632	4,8
2	2	3	0,4930	0,2510	0,3076	0,1566	0,5	0,0702	0,3380	4,8
3	3	4	0,3661	0,1864	0,2284	0,1163	0,5	0,0521	0,2510	4,8
4	4	5	0,3811	0,1941	0,2378	0,1211	0,5	0,0542	0,2613	-27,4
5	5	6	0,8190	0,7070	0,5110	0,4411	0,9	-0,0246	0,6746	-1,5
6	6	7	0,1872	0,6188	0,1168	0,3861	3,3	-0,2282	0,3326	19,8
7	7	8	1,7118	1,2358	1,0680	0,7710	0,0	0,0664	1,3156	19,0
8	8	9	1,0300	0,7400	0,6426	0,4617	0,7	0,0416	0,7902	16,9
9	9	10	1,0441	0,7400	0,6514	0,4617	0,7	0,0472	0,7971	2,7
10	10	11	0,1967	0,0651	0,1227	0,0406	0,3	0,0451	0,1211	2,7
11	11	12	0,3744	0,1237	0,2336	0,0772	0,3	0,0859	0,2306	109,9
12	12	13	1,4680	1,1550	0,9159	0,7206	0,8	0,0106	1,1654	-4,0
13	13	14	0,5416	0,7129	0,3379	0,4448	1,3	-0,1357	0,5419	-19,3
14	14	15	0,5910	0,5260	0,3687	0,3282	0,9	-0,0255	0,4930	22,2
15	15	16	0,7463	0,5450	0,4656	0,3400	0,7	0,0259	0,5760	-3,9
16	16	17	1,2890	1,7211	0,8042	1,0738	1,3	-0,3349	1,2991	93,6
17	17	18	0,7320	0,5740	0,4567	0,3581	0,8	0,0062	0,5803	-11,5
18	2	19	0,1640	0,1564	0,1023	0,0976	1,0	-0,0122	0,1409	-17,3
19	19	20	1,5042	1,3555	0,9385	0,8457	0,9	-0,0729	1,2613	-5,3
20	20	21	0,4095	0,4784	0,2555	0,2985	1,2	-0,0731	0,3861	-4,0
21	21	22	0,7089	0,9373	0,4423	0,5848	1,3	-0,1797	0,7109	13,1
22	3	23	0,4512	0,3084	0,2815	0,1924	0,7	0,0259	0,3400	137,3
23	23	24	0,8980	0,7091	0,5603	0,4424	0,8	0,0052	0,7139	85,5
24	24	25	0,8960	0,7011	0,5590	0,4374	0,8	0,0083	0,7098	4,8
25	6	26	0,2031	0,1034	0,1267	0,0645	0,5	0,0289	0,1392	4,8
26	26	27	0,2842	0,1447	0,1773	0,0903	0,5	0,0404	0,1948	-21,3
27	27	28	1,0590	0,9338	0,6607	0,5826	0,9	-0,0414	0,8799	-24,4
28	28	29	0,8043	0,7006	0,5018	0,4371	0,9	-0,0272	0,6649	4,8
29	29	30	0,5074	0,2585	0,3166	0,1613	0,5	0,0722	0,3479	-9,6
30	30	31	0,9745	0,9630	0,6080	0,6008	1,0	-0,0885	0,8502	-5,3
31	31	32	0,3105	0,3619	0,1937	0,2258	1,2	-0,0550	0,2924	-3,0
32	32	33	0,3411	0,5302	0,2128	0,3308	1,6	-0,1250	0,3729	4,8

Tabela I.C - Estado do sistema-teste de 33 barras para o Caso A

Barras	Caso A0		Caso A1	
	V_k (p.u.)	θ_k (rad)	V_k (p.u.)	θ_k (rad)
1	1,000	0,000	1,000	0,000
2	0,997	0,015	0,997	0,015
3	0,983	0,097	0,983	0,097
4	0,975	0,163	0,975	0,163
5	0,968	0,230	0,968	0,230
6	0,949	0,136	0,949	0,136
7	0,946	-0,095	0,946	-0,095
8	0,932	-0,249	0,932	-0,249
9	0,926	-0,324	0,926	-0,324
10	0,920	-0,387	0,920	-0,387
11	0,919	-0,380	0,919	-0,380
12	0,918	-0,368	0,918	-0,368
13	0,912	-0,461	0,912	-0,461
14	0,909	-0,542	0,909	-0,542
15	0,908	-0,580	0,908	-0,580
16	0,906	-0,604	0,906	-0,604
17	0,904	-0,683	0,904	-0,683
18	0,904	-0,693	0,904	-0,693
19	0,996	0,004	0,996	0,004
20	0,993	-0,063	0,993	-0,063
21	0,992	-0,083	0,992	-0,083
22	0,992	-0,103	0,992	-0,103
23	0,979	0,066	0,979	0,066
24	0,973	-0,023	0,973	-0,023
25	0,969	-0,066	0,969	-0,066
26	0,948	0,176	0,948	0,176
27	0,945	0,232	0,945	0,232
28	0,934	0,315	0,934	0,315
29	0,925	0,393	0,925	0,393
30	0,922	0,498	0,922	0,498
31	0,918	0,414	0,918	0,414
32	0,917	0,391	0,917	0,391
33	0,916	0,383	0,916	0,383

Tabela I.D - Estado do sistema-teste de 33 barras para o Caso B

Barras	Caso B0		Caso B1	
	V_k (p.u.)	θ_k (rad)	V_k (p.u.)	θ_k (rad)
1	1,000	0,000	1,000	0,000
2	0,997	0,014	0,997	0,014
3	0,987	0,052	0,987	0,052
4	0,984	0,058	0,984	0,058
5	0,980	0,062	0,980	0,062
6	0,973	-0,031	0,973	-0,031
7	0,973	-0,103	0,973	-0,103
8	0,971	-0,182	0,971	-0,182
9	0,968	-0,208	0,968	-0,208
10	0,968	-0,224	0,968	-0,224
11	0,968	-0,228	0,968	-0,228
12	0,968	-0,237	0,968	-0,237
13	0,966	-0,221	0,966	-0,221
14	0,966	-0,219	0,966	-0,219
15	0,966	-0,206	0,966	-0,206
16	0,964	-0,183	0,964	-0,183
17	0,959	-0,191	0,959	-0,191
18	0,958	-0,157	0,958	-0,157
19	0,995	-0,004	0,995	-0,004
20	0,978	-0,121	0,978	-0,121
21	0,974	-0,187	0,974	-0,187
22	0,970	-0,246	0,970	-0,246
23	0,982	0,043	0,982	0,043
24	0,971	-0,015	0,971	-0,015
25	0,964	-0,026	0,964	-0,026
26	0,972	-0,021	0,972	-0,021
27	0,971	-0,006	0,971	-0,006
28	0,966	-0,011	0,966	-0,011
29	0,963	-0,004	0,963	-0,004
30	0,960	0,061	0,960	0,061
31	0,957	-0,070	0,957	-0,070
32	0,957	-0,107	0,957	-0,107
33	0,957	-0,129	0,957	-0,129

Tabela I.E - Estado do sistema-teste de 33 barras para o Caso C

Barras	Caso C0		Caso C1	
	V_k (p.u.)	θ_k (rad)	V_k (p.u.)	θ_k (rad)
1	1,000	0,000	1,000	0,000
2	0,998	0,016	0,998	0,016
3	0,990	0,066	0,990	0,066
4	0,987	0,080	0,987	0,080
5	0,986	0,092	0,986	0,092
6	0,979	0,012	0,979	0,012
7	0,978	-0,059	0,978	-0,059
8	0,976	-0,126	0,976	-0,126
9	0,973	-0,138	0,973	-0,138
10	0,973	-0,157	0,973	-0,157
11	0,974	-0,160	0,974	-0,160
12	0,974	-0,169	0,974	-0,169
13	0,972	-0,151	0,972	-0,151
14	0,972	-0,145	0,972	-0,145
15	0,972	-0,130	0,972	-0,130
16	0,971	-0,095	0,971	-0,095
17	0,969	-0,031	0,969	-0,031
18	0,969	0,017	0,969	0,017
19	0,996	0,001	0,996	0,001
20	0,982	-0,083	0,982	-0,083
21	0,978	-0,133	0,978	-0,133
22	0,975	-0,179	0,975	-0,179
23	0,985	0,063	0,985	0,063
24	0,976	0,025	0,976	0,025
25	0,970	0,031	0,970	0,031
26	0,978	0,023	0,978	0,023
27	0,977	0,039	0,977	0,039
28	0,972	0,045	0,972	0,045
29	0,969	0,060	0,969	0,060
30	0,967	0,129	0,967	0,129
31	0,966	0,044	0,966	0,044
32	0,966	0,026	0,966	0,026
33	0,968	0,034	0,968	0,034

Anexo II – Dados e resultados do sistema-teste de 69 barras

Tabela II.A - Dados de barra do sistema-teste de 69 barras em diferentes representações

Barras	P_d (MW)	Q_d (MVA _r)	Norm. Convencional		Norm. Complexa	
			P_d (p.u.)	Q_d (p.u.)	P_d (c.p.u.)	Q_d (c.p.u.)
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6	0,0026	0,0022	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	0,0404	0,0300	0,0004	0,0003	0,0000	0,0005
8	0,0750	0,0540	0,0008	0,0005	0,0000	0,0009
9	0,0300	0,0220	0,0003	0,0002	0,0000	0,0004
10	0,0280	0,0190	0,0003	0,0002	0,0000	0,0003
11	0,1450	0,1040	0,0015	0,0010	-0,0001	0,0018
12	0,1450	0,1040	0,0015	0,0010	-0,0001	0,0018
13	0,0080	0,0055	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001
14	0,0080	0,0055	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001
15	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
16	0,0455	0,0300	0,0005	0,0003	0,0000	0,0005
17	0,0600	0,0350	0,0006	0,0004	0,0000	0,0007
18	0,0600	0,0350	0,0006	0,0004	0,0000	0,0007
19	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
20	0,0010	0,0006	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
21	0,1140	0,0810	0,0011	0,0008	-0,0001	0,0014
22	0,0053	0,0035	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001
23	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
24	0,0280	0,0200	0,0003	0,0002	0,0000	0,0003
25	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
26	0,0140	0,0100	0,0001	0,0001	0,0000	0,0002
27	0,0140	0,0100	0,0001	0,0001	0,0000	0,0002
28	0,0260	0,0185	0,0003	0,0002	0,0000	0,0003
29	0,0260	0,0185	0,0003	0,0002	0,0000	0,0003
30	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
31	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
32	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
33	0,0140	0,0100	0,0001	0,0001	0,0000	0,0002
34	0,0195	0,0140	0,0002	0,0001	0,0000	0,0002
35	0,0060	0,0040	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001
36	0,0260	0,0186	0,0003	0,0002	0,0000	0,0003
37	0,0260	0,0186	0,0003	0,0002	0,0000	0,0003
38	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
39	0,0240	0,0170	0,0002	0,0002	0,0000	0,0003
40	0,0240	0,0170	0,0002	0,0002	0,0000	0,0003
41	0,0012	0,0010	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

42	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
43	0,0060	0,0043	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001
44	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
45	0,0392	0,0263	0,0004	0,0003	0,0000	0,0005
46	0,0392	0,0263	0,0004	0,0003	0,0000	0,0005
47	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
48	0,0790	0,0564	0,0008	0,0006	0,0000	0,0010
49	0,3847	0,2745	0,0038	0,0027	-0,0002	0,0047
50	0,3847	0,2745	0,0038	0,0027	-0,0002	0,0047
51	0,0405	0,0283	0,0004	0,0003	0,0000	0,0005
52	0,0036	0,0027	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
53	0,0043	0,0035	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001
54	0,0264	0,0190	0,0003	0,0002	0,0000	0,0003
55	0,0240	0,0172	0,0002	0,0002	0,0000	0,0003
56	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
57	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
58	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
59	0,1000	0,0720	0,0010	0,0007	-0,0001	0,0012
60	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
61	1,2440	0,8880	0,0124	0,0089	-0,0008	0,0153
62	0,0320	0,0230	0,0003	0,0002	0,0000	0,0004
63	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
64	0,2270	0,1620	0,0023	0,0016	-0,0001	0,0028
65	0,0590	0,0420	0,0006	0,0004	0,0000	0,0007
66	0,0180	0,0130	0,0002	0,0001	0,0000	0,0002
67	0,0180	0,0130	0,0002	0,0001	0,0000	0,0002
68	0,0280	0,0200	0,0003	0,0002	0,0000	0,0003
69	0,0280	0,0200	0,0003	0,0002	0,0000	0,0003

Tabela II.B - Dados de linha do sistema-teste de 69 barras em diferentes representações

Nº	Linhas		r (Ω)	x (Ω)	Norm. Convencional			Norm. Complexa		
	De	Para			r (p.u.)	x (p.u.)	x/r	r (c.p.u.)	x (c.p.u.)	x/r
1	1	2	0,0005	0,0011	0,0003	0,0007	2,3	-0,0004	0,0006	-1,5
2	2	3	0,0005	0,0011	0,0003	0,0007	2,3	-0,0004	0,0006	-1,5
3	3	4	0,0014	0,0035	0,0009	0,0022	2,4	-0,0014	0,0019	-1,4
4	4	5	0,0252	0,0293	0,0157	0,0183	1,2	-0,0069	0,0231	-3,3
5	5	6	0,3661	0,1864	0,2284	0,1163	0,5	0,0255	0,2550	10,0
6	6	7	0,3811	0,1941	0,2378	0,1211	0,5	0,0265	0,2655	10,0
7	7	8	0,0922	0,0470	0,0575	0,0293	0,5	0,0064	0,0642	10,0
8	8	9	0,0494	0,0252	0,0308	0,0157	0,5	0,0034	0,0344	10,1
9	9	10	0,8190	0,2707	0,5110	0,1689	0,3	0,1339	0,5213	3,9
10	10	11	0,1872	0,0619	0,1168	0,0386	0,3	0,0306	0,1191	3,9
11	11	12	0,7113	0,2351	0,4438	0,1467	0,3	0,1163	0,4527	3,9
12	12	13	1,0300	0,3400	0,6426	0,2121	0,3	0,1686	0,6554	3,9
13	13	14	1,0441	0,3449	0,6514	0,2152	0,3	0,1708	0,6645	3,9
14	14	15	1,0580	0,3496	0,6601	0,2181	0,3	0,1730	0,6733	3,9
15	15	16	0,1967	0,0651	0,1227	0,0406	0,3	0,0321	0,1252	3,9
16	16	17	0,3744	0,1237	0,2336	0,0772	0,3	0,0612	0,2383	3,9
17	17	18	0,0046	0,0016	0,0029	0,0010	0,3	0,0007	0,0030	4,3
18	18	19	0,3276	0,1083	0,2044	0,0676	0,3	0,0535	0,2085	3,9
19	19	20	0,2106	0,0696	0,1314	0,0434	0,3	0,0345	0,1340	3,9
20	20	21	0,3416	0,1128	0,2131	0,0704	0,3	0,0559	0,2174	3,9
21	21	22	0,0139	0,0046	0,0087	0,0029	0,3	0,0023	0,0089	3,9
22	22	23	0,1592	0,0526	0,0993	0,0328	0,3	0,0260	0,1013	3,9
23	23	24	0,3464	0,1144	0,2161	0,0714	0,3	0,0566	0,2204	3,9
24	24	25	0,7488	0,2475	0,4672	0,1544	0,3	0,1224	0,4766	3,9
25	25	26	0,3089	0,1021	0,1927	0,0637	0,3	0,0505	0,1966	3,9
26	26	27	0,1733	0,0572	0,1081	0,0357	0,3	0,0283	0,1103	3,9
27	3	28	0,0043	0,0107	0,0027	0,0067	2,5	-0,0042	0,0059	-1,4
28	28	29	0,0640	0,1564	0,0399	0,0976	2,4	-0,0606	0,0863	-1,4
29	29	30	0,3978	0,1314	0,2482	0,0820	0,3	0,0651	0,2532	3,9
30	30	31	0,0702	0,0232	0,0438	0,0145	0,3	0,0115	0,0447	3,9
31	31	32	0,3510	0,1160	0,2190	0,0724	0,3	0,0574	0,2234	3,9
32	32	33	0,8391	0,2816	0,5235	0,1757	0,3	0,1349	0,5355	4,0
33	33	34	1,7079	0,5647	1,0656	0,3523	0,0	0,2791	1,0871	3,9
34	34	35	1,4739	0,4873	0,9196	0,3040	0,3	0,2409	0,9381	3,9
35	3	36	0,0043	0,0107	0,0027	0,0067	2,5	-0,0042	0,0059	-1,4
36	36	37	0,0640	0,1564	0,0399	0,0976	2,4	-0,0606	0,0863	-1,4
37	37	38	0,1053	0,1229	0,0657	0,0767	1,2	-0,0291	0,0967	-3,3
38	38	39	0,0305	0,0354	0,0190	0,0221	1,2	-0,0083	0,0279	-3,4
39	39	40	0,0018	0,0021	0,0011	0,0013	1,2	-0,0005	0,0016	-3,2
40	40	41	0,7283	0,8509	0,4544	0,5309	1,2	-0,2013	0,6692	-3,3
41	41	42	0,3100	0,3622	0,1934	0,2260	1,2	-0,0857	0,2848	-3,3
42	42	43	0,0410	0,0478	0,0256	0,0298	1,2	-0,0113	0,0376	-3,3
43	43	44	0,0091	0,0115	0,0057	0,0072	1,3	-0,0030	0,0087	-2,9
44	44	45	0,1088	0,1374	0,0679	0,0857	1,3	-0,0354	0,1034	-2,9

45	45	46	0,0010	0,0011	0,0006	0,0007	1,2	-0,0003	0,0009	-3,0
46	4	47	0,0034	0,0083	0,0021	0,0052	2,5	-0,0032	0,0046	-1,4
47	47	48	0,0851	0,2084	0,0531	0,1300	2,4	-0,0807	0,1149	-1,4
48	48	49	0,2898	0,7091	0,1808	0,4424	2,4	-0,2747	0,3911	-1,4
49	49	50	0,0822	0,2012	0,0513	0,1255	2,4	-0,0779	0,1110	-1,4
50	8	51	0,0928	0,0473	0,0579	0,0295	0,5	0,0064	0,0647	10,1
51	51	52	0,3319	0,1114	0,2071	0,0695	0,3	0,0534	0,2118	4,0
52	9	53	0,1741	0,0886	0,1086	0,0553	0,5	0,0121	0,1213	10,0
53	53	54	0,2031	0,1034	0,1267	0,0645	0,5	0,0142	0,1415	10,0
54	54	55	0,2842	0,1447	0,1773	0,0903	0,5	0,0198	0,1980	10,0
55	55	56	0,2813	0,1433	0,1755	0,0894	0,5	0,0196	0,1960	10,0
56	56	57	1,5900	0,5337	0,9920	0,3330	0,3	0,2556	1,0147	4,0
57	57	58	0,7838	0,2630	0,4890	0,1641	0,3	0,1260	0,5002	4,0
58	58	59	0,3042	0,1007	0,1898	0,0628	0,3	0,0497	0,1937	3,9
59	59	60	0,3861	0,1172	0,2409	0,0731	0,3	0,0686	0,2422	3,5
60	60	61	0,5074	0,2585	0,3166	0,1613	0,5	0,0353	0,3536	10,0
61	61	62	0,0975	0,0495	0,0608	0,0309	0,5	0,0068	0,0679	10,0
62	62	63	0,1451	0,0737	0,0905	0,0460	0,5	0,0102	0,1010	9,9
63	63	64	0,7105	0,3619	0,4433	0,2258	0,5	0,0494	0,4950	10,0
64	64	65	1,0410	0,5302	0,6495	0,3308	0,5	0,0724	0,7253	10,0
65	11	66	0,2012	0,0611	0,1255	0,0381	0,3	0,0357	0,1262	3,5
66	66	67	0,0046	0,0014	0,0029	0,0009	0,3	0,0008	0,0029	3,6
67	12	68	0,7394	0,2444	0,4613	0,1525	0,3	0,1208	0,4706	3,9
68	68	69	0,0046	0,0016	0,0029	0,0010	0,3	0,0007	0,0030	4,3

Tabela II.C - Estado do sistema-teste de 69 barras para o Caso A

Barras	Caso A0		Caso A1	
	V_k (p.u.)	θ_k (rad)	V_k (p.u.)	θ_k (rad)
1	1,000	0,000	1,000	0,000
2	1,000	-0,001	1,000	-0,001
3	1,000	-0,002	1,000	-0,002
4	1,000	-0,006	1,000	-0,006
5	0,999	-0,018	0,999	-0,018
6	0,990	0,050	0,990	0,050
7	0,981	0,122	0,981	0,122
8	0,979	0,139	0,979	0,139
9	0,977	0,148	0,977	0,148
10	0,972	0,232	0,972	0,232
11	0,971	0,251	0,971	0,251
12	0,968	0,304	0,968	0,304
13	0,965	0,351	0,965	0,351
14	0,962	0,397	0,962	0,397
15	0,959	0,443	0,959	0,443
16	0,959	0,451	0,959	0,451
17	0,958	0,465	0,958	0,465
18	0,958	0,466	0,958	0,466
19	0,958	0,474	0,958	0,474
20	0,957	0,480	0,957	0,480
21	0,957	0,488	0,957	0,488
22	0,957	0,489	0,957	0,489
23	0,957	0,490	0,957	0,490
24	0,957	0,493	0,957	0,493
25	0,956	0,496	0,956	0,496
26	0,956	0,497	0,956	0,497
27	0,956	0,498	0,956	0,498
28	1,000	-0,003	1,000	-0,003
29	1,000	-0,005	1,000	-0,005
30	1,000	-0,003	1,000	-0,003
31	1,000	-0,003	1,000	-0,003
32	1,000	-0,001	1,000	-0,001
33	0,999	0,004	0,999	0,004
34	0,999	0,010	0,999	0,010
35	0,999	0,011	0,999	0,011
36	1,000	-0,003	1,000	-0,003
37	1,000	-0,009	1,000	-0,009
38	1,000	-0,012	1,000	-0,012
39	1,000	-0,012	1,000	-0,012
40	1,000	-0,012	1,000	-0,012
41	0,999	-0,023	0,999	-0,023
42	0,999	-0,028	0,999	-0,028
43	0,999	-0,029	0,999	-0,029
44	0,999	-0,029	0,999	-0,029

45	0,998	-0,031	0,998	-0,031
46	0,998	-0,031	0,998	-0,031
47	1,000	-0,007	1,000	-0,007
48	0,999	-0,052	0,999	-0,052
49	0,995	-0,191	0,995	-0,191
50	0,994	-0,211	0,994	-0,211
51	0,979	0,000	0,979	0,000
52	0,979	-0,001	0,979	-0,001
53	0,975	-0,002	0,975	-0,002
54	0,971	-0,006	0,971	-0,006
55	0,967	-0,018	0,967	-0,018
56	0,963	0,050	0,963	0,050
57	0,940	0,122	0,940	0,122
58	0,929	0,139	0,929	0,139
59	0,925	0,148	0,925	0,148
60	0,920	0,232	0,920	0,232
61	0,912	0,251	0,912	0,251
62	0,912	0,304	0,912	0,304
63	0,912	0,351	0,912	0,351
64	0,910	0,397	0,910	0,397
65	0,909	0,443	0,909	0,443
66	0,971	0,451	0,971	0,451
67	0,971	0,465	0,971	0,465
68	0,968	0,466	0,968	0,466
69	0,968	0,474	0,968	0,474

Tabela II.D - Estado do sistema-teste de 69 barras para o Caso B

Barras	Caso B0		Caso B1	
	V_k (p.u.)	θ_k (rad)	V_k (p.u.)	θ_k (rad)
1	1,000	0,000	1,000	0,000
2	1,000	-0,001	1,000	-0,001
3	1,000	-0,002	1,000	-0,002
4	1,000	-0,004	1,000	-0,004
5	1,000	-0,011	1,000	-0,011
6	0,997	-0,029	0,997	-0,029
7	0,994	-0,049	0,994	-0,049
8	0,994	-0,054	0,994	-0,054
9	0,993	-0,058	0,993	-0,058
10	0,991	-0,082	0,991	-0,082
11	0,991	-0,089	0,991	-0,089
12	0,991	-0,069	0,991	-0,069
13	0,991	-0,067	0,991	-0,067
14	0,991	-0,067	0,991	-0,067
15	0,991	-0,068	0,991	-0,068
16	0,990	-0,069	0,990	-0,069
17	0,990	-0,074	0,990	-0,074
18	0,990	-0,074	0,990	-0,074
19	0,990	-0,081	0,990	-0,081
20	0,990	-0,086	0,990	-0,086
21	0,990	-0,076	0,990	-0,076
22	0,990	-0,076	0,990	-0,076
23	0,990	-0,075	0,990	-0,075
24	0,990	-0,074	0,990	-0,074
25	0,990	-0,074	0,990	-0,074
26	0,990	-0,071	0,990	-0,071
27	0,990	-0,071	0,990	-0,071
28	1,000	-0,002	1,000	-0,002
29	1,000	-0,004	1,000	-0,004
30	1,000	-0,003	1,000	-0,003
31	1,000	-0,003	1,000	-0,003
32	1,000	-0,002	1,000	-0,002
33	1,000	-0,001	1,000	-0,001
34	1,000	-0,000	1,000	-0,000
35	1,000	-0,004	1,000	-0,004
36	1,000	-0,007	1,000	-0,007
37	0,998	-0,083	0,998	-0,083
38	0,997	-0,080	0,997	-0,080
39	0,997	-0,079	0,997	-0,079
40	0,997	-0,079	0,997	-0,079
41	0,992	-0,052	0,992	-0,052
42	0,990	-0,041	0,990	-0,041
43	0,990	-0,039	0,990	-0,039
44	0,990	-0,041	0,990	-0,041

45	0,989	-0,057	0,989	-0,057
46	0,989	-0,057	0,989	-0,057
47	1,000	-0,005	1,000	-0,005
48	0,998	-0,041	0,998	-0,041
49	0,992	-0,149	0,992	-0,149
50	0,991	-0,160	0,991	-0,160
51	0,994	-0,053	0,994	-0,053
52	0,991	-0,030	0,991	-0,030
53	0,992	-0,062	0,992	-0,062
54	0,992	-0,060	0,992	-0,060
55	0,991	-0,059	0,991	-0,059
56	0,991	-0,058	0,991	-0,058
57	0,988	-0,029	0,988	-0,029
58	0,987	-0,014	0,987	-0,014
59	0,986	-0,009	0,986	-0,009
60	0,984	0,043	0,984	0,043
61	0,980	0,079	0,980	0,079
62	0,980	0,076	0,980	0,076
63	0,981	0,072	0,981	0,072
64	0,983	0,053	0,983	0,053
65	0,989	0,007	0,989	0,007
66	0,991	-0,105	0,991	-0,105
67	0,991	-0,105	0,991	-0,105
68	0,991	-0,064	0,991	-0,064
69	0,991	-0,064	0,991	-0,064

Tabela II.E - Estado do sistema-teste de 69 barras para o Caso C

Barras	Caso C0		Caso C1	
	V_k (p.u.)	θ_k (rad)	V_k (p.u.)	θ_k (rad)
1	1,000	0,000	1,000	0,000
2	1,000	-0,001	1,000	-0,001
3	1,000	-0,001	1,000	-0,001
4	1,000	-0,002	1,000	-0,002
5	1,000	-0,006	1,000	-0,006
6	0,998	-0,008	0,998	-0,008
7	0,996	-0,011	0,996	-0,011
8	0,996	-0,013	0,996	-0,013
9	0,996	-0,015	0,996	-0,015
10	0,994	-0,032	0,994	-0,032
11	0,993	-0,036	0,993	-0,036
12	0,993	-0,020	0,993	-0,020
13	0,994	-0,019	0,994	-0,019
14	0,994	-0,020	0,994	-0,020
15	0,994	-0,022	0,994	-0,022
16	0,994	-0,024	0,994	-0,024
17	0,993	-0,026	0,993	-0,026
18	0,993	-0,026	0,993	-0,026
19	0,993	-0,031	0,993	-0,031
20	0,993	-0,035	0,993	-0,035
21	0,993	-0,028	0,993	-0,028
22	0,993	-0,028	0,993	-0,028
23	0,993	-0,027	0,993	-0,027
24	0,994	-0,027	0,994	-0,027
25	0,994	-0,027	0,994	-0,027
26	0,994	-0,027	0,994	-0,027
27	0,994	-0,028	0,994	-0,028
28	1,000	-0,001	1,000	-0,001
29	1,000	-0,003	1,000	-0,003
30	1,000	-0,002	1,000	-0,002
31	1,000	-0,002	1,000	-0,002
32	1,000	-0,001	1,000	-0,001
33	1,000	0,001	1,000	0,001
34	1,000	0,001	1,000	0,001
35	1,000	-0,002	1,000	-0,002
36	1,000	-0,004	1,000	-0,004
37	0,999	-0,039	0,999	-0,039
38	0,998	-0,026	0,998	-0,026
39	0,998	-0,022	0,998	-0,022
40	0,998	-0,022	0,998	-0,022
41	0,995	0,001	0,995	0,001
42	0,993	0,012	0,993	0,012
43	0,993	0,013	0,993	0,013
44	0,993	0,012	0,993	0,012

45	0,992	0,003	0,992	0,003
46	0,992	0,003	0,992	0,003
47	1,000	-0,003	1,000	-0,003
48	0,998	-0,027	0,998	-0,027
49	0,994	-0,094	0,994	-0,094
50	0,993	-0,094	0,993	-0,094
51	0,996	-0,011	0,996	-0,011
52	0,994	0,016	0,994	0,016
53	0,995	-0,017	0,995	-0,017
54	0,994	-0,014	0,994	-0,014
55	0,994	-0,011	0,994	-0,011
56	0,994	-0,008	0,994	-0,008
57	0,991	0,024	0,991	0,024
58	0,990	0,040	0,990	0,040
59	0,990	0,046	0,990	0,046
60	0,988	0,093	0,988	0,093
61	0,984	0,127	0,984	0,127
62	0,984	0,124	0,984	0,124
63	0,985	0,120	0,985	0,120
64	0,987	0,099	0,987	0,099
65	0,992	0,051	0,992	0,051
66	0,993	-0,050	0,993	-0,050
67	0,993	-0,050	0,993	-0,050
68	0,994	-0,018	0,994	-0,018
69	0,994	-0,018	0,994	-0,018

Anexo III – Dados do sistema-teste de 57 barras do IEEE

Tabela III.A – Dados de barra do sistema-teste de 57 barras do IEEE

Barras	P_g (MW)	Q_g (MVar)	P_d (MW)	Q_d (MVar)
1	128,9	-16,1	55	17
2	0	-0,8	3	88
3	40	-1	41	21
4	-	-	0	0
5	-	-	13	4
6	0	0,8	75	2
7	-	-	0	0
8	450	62,1	150	22
9	0	2,2	121	26
10	-	-	5	2
11	-	-	0	0
12	310	128,5	377	24
13	-	-	18	2,3
14	-	-	10,5	5,3
15	-	-	22	5
16	-	-	43	3
17	-	-	42	8
18	-	-	27,2	9,8
19	-	-	3,3	0,6
20	-	-	2,3	1
21	-	-	0	0
22	-	-	0	0
23	-	-	6,3	2,1
24	-	-	0	0
25	-	-	6,3	3,2
26	-	-	0	0
27	-	-	9,3	0,5
28	-	-	4,6	2,3
29	-	-	17	2,6
30	-	-	3,6	1,8
31	-	-	5,8	2,9
32	-	-	1,6	0,8
33	-	-	3,8	1,9
34	-	-	0	0
35	-	-	6	3
36	-	-	0	0
37	-	-	0	0
38	-	-	14	7
39	-	-	0	0
40	-	-	0	0
41	-	-	6,3	3

42	-	-	7,1	4,4
43	-	-	2	1
44	-	-	12	1,8
45	-	-	0	0
46	-	-	0	0
47	-	-	29,7	11,6
48	-	-	0	0
49	-	-	18	8,5
50	-	-	21	10,5
51	-	-	18	5,3
52	-	-	4,9	2,2
53	-	-	20	10
54	-	-	4,1	1,4
55	-	-	6,8	3,4
56	-	-	7,6	2,2
57	-	-	6,7	2

Tabela III.B - Dados de linha do sistema-teste de 57 barras do IEEE

N°	Linhas		r (p.u.)	x (p.u.)	b (p.u.)
	De	Para			
1	1	2	0,028	0,0083	0,129
2	2	3	0,085	0,0298	0,0818
3	3	4	0,0366	0,0112	0,038
4	4	5	0,132	0,0625	0,0258
5	4	6	0,148	0,043	0,0348
6	6	7	0,102	0,02	0,0276
7	6	8	0,173	0,0339	0,047
8	8	9	0,0505	0,0099	0,0548
9	9	10	0,1679	0,0369	0,044
10	9	11	0,0848	0,0258	0,0218
11	9	12	0,295	0,0648	0,0772
12	9	13	0,158	0,0481	0,0406
13	13	14	0,0434	0,0132	0,011
14	13	15	0,0869	0,0269	0,023
15	1	15	0,091	0,0178	0,0988
16	1	16	0,206	0,0454	0,0546
17	1	17	0,108	0,0238	0,0286
18	3	15	0,053	0,0162	0,0544
19	4	18	0,555	0	0
20	4	18	0,43	0	0
21	5	6	0,0641	0,0302	0,0124
22	7	8	0,0712	0,0139	0,0194
23	10	12	0,1262	0,0277	0,0328
24	11	13	0,0732	0,0223	0,0188
25	12	13	0,058	0,0178	0,0604
26	12	16	0,0813	0,018	0,0216
27	12	17	0,179	0,0397	0,0476
28	14	15	0,0547	0,0171	0,0148
29	18	19	0,685	0,461	0
30	19	20	0,434	0,283	0
31	21	20	0,7767	0	0
32	21	22	0,117	0,0736	0
33	22	23	0,0152	0,0099	0
34	23	24	0,256	0,166	0,0084
35	24	25	1,182	0	0
36	24	25	1,23	0	0
37	24	26	0,0473	0	0
38	26	27	0,254	0,165	0
39	27	28	0,0954	0,0618	0
40	28	29	0,0587	0,0418	0
41	7	29	0,0648	0	0
42	25	30	0,202	0,135	0
43	30	31	0,497	0,326	0
44	31	32	0,755	0,507	0

45	32	33	0,036	0,0392	0
46	34	32	0,953	0	0
47	34	35	0,078	0,052	0,0032
48	35	36	0,0537	0,043	0,0016
49	36	37	0,0366	0,029	0
50	37	38	0,1009	0,0651	0,002
51	37	39	0,0379	0,0239	0
52	36	40	0,0466	0,03	0
53	22	38	0,0295	0,0192	0
54	11	41	0,749	0	0
55	41	42	0,352	0,207	0
56	41	43	0,412	0	0
