

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DOS CURSOS DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

AILSON PEREIRA DE MOURA

**SIMULAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA MONOFÁSICAS E
TRIFÁSICAS**

Tese apresentada à Coordenação de Pós -
Graduação em Engenharia Elétrica
COPELE - da Universidade Federal da
Paraíba - UFPB, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do grau
de Doutor em Ciências.

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
PROCESSAMENTO DA ENERGIA**

ORIENTADORES

**MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR
WELLINGTON SANTOS MOTA**

**CAMPINA GRANDE - PARAÍBA
DEZEMBRO - 1996**



M929s Moura, Ailson Pereira de
 Simulacao de redes de distribuicao de energia eletrica
 monofasicas e trifasicas / Ailson Pereira de Moura. -
 Campina Grande, 1996.
 159 f. : il.

 Tese (Doutorado em Engenharia Eletrica) - Universidade
 Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.

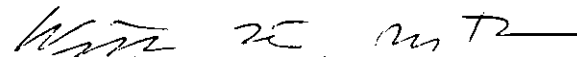
 1. Energia Eletrica - 2. Energia Eletrica - 3. Energia
 Eletrica - 4. Tese I. Mota, Wellington Santos, Dr. II.
 Carvalho Junior, Manoel Afonso de, Dr. III. Universidade
 Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 621.311.8(043)

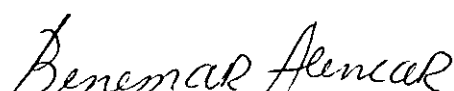
**“SIMULAÇÃO DE SISTEMAS MONOFÁSICOS E TRIFÁSICOS DE REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA”**

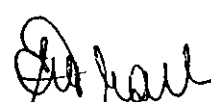
AILSON PEREIRA DE MOURA

Tese Aprovada em 17.12.1996


WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFPB
Orientador


MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR, Ph.D., UFPE
Orientador


BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFPB
Componente da Banca


ANDRÉ LUIZ MORELATO FRANÇA, Ph.D., UNICAMP
Componente da Banca


LUIZ JAIRO BRANCO MACHADO, Ph.D., UFSC
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
Dezembro - 1996

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Aluísio e Maria, que desenvolveram o meu gosto pela arte de estudar.

A minha esposa Edilene e aos meus dois filhos Adriano e André, em quem encontro inspiração para criar e viver.

Aos orientadores, professores Afonso e Wellington, pela compreensão humana demonstrada ao longo de todo o trabalho, o que tornou possível a realização do mesmo.

E a todos que indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho: membros da Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPB, professores do DEE - UFC, membros da banca examinadora e tantos outros, como o motorista que cruza o sertão da Paraíba e do Rio Grande do Norte, noite e dia, atravessando aquele mundo onde se sucedem secas e enchentes, onde se planta e se colhe de meia, onde a esperança pela posse de terra reside nos corações; mundo da roça, da enxada, da casa de farinha, do poço, dos rios e dos açudes; mundo da pesca, da caça, das vaquejadas, das queimadas, da construção da taipa, das veredas, do barro, da cal, do terreiro, do alpendre e da rede; mundo de sonho e de esperança.

RESUMO

O principal objetivo desta Tese é demonstrar que, para a simulação de sistemas de distribuição monofásicos e trifásicos, no planejamento ou na operação dos mesmos, é possível empregar algoritmos de fluxo de carga baseados no método clássico dos momentos e no método desacoplado modificado com acumulação de potências equivalentes, usando computadores pessoais.

Inicialmente, são apresentados os algoritmos dos fluxos de carga mais usados na simulação de sistemas de potência: método de Gauss-Seidel, Newton-Raphson e método desacoplado rápido. O enfoque dado nessa apresentação inclui a dedução das equações, apresentação de fluxogramas e aspectos computacionais.

O desenvolvimento do fluxo de carga monofásico baseado no método clássico dos momentos é iniciado com a apresentação do algoritmo básico desse método, com as equações escritas na forma polar. São feitas algumas simplificações e desenvolvidos os modelos usados nas simulações computacionais. A formulação matemática das equações do método envolve a inclusão das perdas ativas e reativas, os ângulos de tensões, os tapes dos transformadores, o ângulo entre as tensões de barras e o uso da corrente da própria barra para o cálculo das tensões. Resultados numéricos do método proposto foram comparados com os dos métodos mais tradicionalmente usados e com resultados do método original dos momentos.

Para o desenvolvimento da versão trifásica do método já comentado, seguiu-se passos semelhantes como no desenvolvimento do fluxo de carga monofásico. Foi introduzida a tensão de neutro nas equações matemáticas para cálculo de módulos e ângulos de tensões. Resultados numéricos mostram uma boa performance do método trifásico proposto.

Estudos de desempenho de três versões do método desacoplado rápido e do próprio fluxo de carga desacoplado rápido, na simulação de sistemas de distribuição, mostraram que esses métodos desacoplados podem divergir. O estudo foi focado sob os aspectos de carregamento elevado nas barras do sistema; efeito da estrutura radial e parâmetros físicos R e X e efeito do aumento da maior relação R / X .

O desenvolvimento do fluxo de carga desacoplado modificado com acumulação de potências equivalentes é iniciado com noções sobre erros de arredondamento. O desenvolvimento do algoritmo é descrito e justificado. Os testes, em precisão simples e dupla, de seis sistemas de distribuição são comparados com os resultados das versões do método desacoplado rápido e do próprio método desacoplado rápido comprovando a excelente performance do método proposto.

O equacionamento da versão trifásica do método anterior, inicia-se com a modelagem de componentes do sistema de distribuição. A inclusão do efeito das correntes de neutro e cabo pára-raios é feito de forma rigorosa. A inclusão do efeito das impedâncias mútuas, de forma aproximada, permitiu o estudo de fenômenos como o aumento de tensão em barras devido à influência das mútuas. Finalmente, para demonstrar a eficiência do algoritmo trifásico do método desacoplado modificado com acumulação de potências equivalentes, resultados do sistema radial do IEEE com treze barras são apresentados, comprovando a boa performance do método proposto.

ABSTRACT

The principal objective of this Thesis is to demonstrate that for the planning or operation of single-phase and three-phase distribution systems simulation is possible use load flow based on the classical moment method and on the modified decoupled load flow with equivalent power accumulation, using single personal computers.

Initially, are presented the load flow algorithm based on the Gauss-Seidel, Newton-Raphson and fast decoupled method. The emphasis of this presentation is on the equations deduction, presentation of the flow-chart algorithm and computational aspects.

The development of the single-phase load flow based in the classical moment method is start with the presentation of the basic algorithm, where the equations are write in the polar form. Initially are made simplification and is proposed a model for the computational simulation. The equations mathematical formulation include the losses active and reactive, the calculation of the voltages angles, the load tap changing equipment, the voltage angle difference and the current calculation usig the self bus voltage. Numerical results were confront with the results of the Gauss-Seidel, Newton-Raphson, fast decoupled load flow method and original moment method.

The development of the version of the three-phase load flow based in the same method follow identical derivation. The neutral voltage is added in the mathematical single-phase load flow equations for three-phase voltages modulo and angle calculation. The results of distribution systems are presented accusing the good evolution for proposed three-phase load flow.

The study of performing distribution systems simulation three versions of the fast decoupled method and of the self fast decoupled method can to diverge from. The study was centralized in the aspects of bus systems with rise load; radial topology effect and physical paremeter R and X and rise effect of the larger relation R / X .

The development of modified decoupled load flow with equivalent power accumulation is initiate with roundoff error. The algorithm advanced is describe and justified. The numerical results with double and single precision of six balanced distribution systems were confront with results of the decoupled load flow versions of the fast decoupled method and the self fast decoupled load flow, certifying the excellent performing of the proposed method.

The three-phase version of the previous method is initiated with the modelling of power distribution plant. The effect of ground currents and earth wires are included of rigourous manner. The inclusion of the mutual coupling, of approximated manner, permitted the rise voltage phenomenon study.

Finally, for demonstrate the three phase algorithm of the modified decoupled method with equivalent power accumulation, results of the thirteen busbar IEEE radial system are presented, verifying the good performing of the proposed method.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO

Generalidades.	1
Contribuições do trabalho.	15
Descrição de cada capítulo.	15

CAPÍTULO 1 - Fluxo de carga Gauss-Seidel, Newton-Raphson e desacoplado rápido

Resumo.	18
1.1 - Introdução.	18
1.2 - Método de Gauss-Seidel usando a matriz de admitâncias de barra.	19
1.3 - Fluxo de carga Newton-Raphson.	24
1.4 - Fluxo de carga desacoplado rápido.	28
1.5 - Conclusão.	33

CAPÍTULO 2 - Fluxo de carga baseado no método dos momentos

Resumo.	34
2.1 - Introdução.	34
2.2 - Dedução do algoritmo básico do método original dos momentos.	35
2.3 - Hipóteses e aproximações.	37
2.4 - Modelos.	38
2.5 - Formulação matemática do problema.	40
2.6 - Análise de resultados.	48
2.7 - Formulação alternativa.	57
2.8 - Conclusão.	58

CAPÍTULO 3 - Fluxo de carga trifásico baseado no método dos momentos

Resumo.	60
3.1 - Introdução.	60
3.2 - Hipóteses e modelos.	61
3.3 - Formulação matemática do problema.	64
3.4 - Resultados numéricos.	72

3.5 - Conclusão.	76
------------------	----

CAPÍTULO 4 - Fluxo de carga desacoplado modificado

Resumo.	77
4.1 - Introdução.	77
4.2 - Versão devido a Dragoslav Rajicic e Anjan Bose.	78
4.3 - Versão devido a Robert A. M. Van Amerongen.	79
4.4 - Versão devido a L. Wang e outros.	80
4.5 - Análise de resultados.	85
4.6 - Conclusão.	91

CAPÍTULO 5 - Fluxo de carga desacoplado modificado com acumulação de potências equivalentes

Resumo.	93
5.1 - Introdução.	93
5.2 - Erros de arredondamento.	94
5.3 - Novo fluxo de potência.	95
5.4 - Resultados numéricos.	100
5.5 - Conclusão.	104

CAPÍTULO 6 - Fluxo de carga desacoplado trifásico utilizando circuitos por fase

Resumo.	105
6.1 - Introdução.	105
6.2 - Modelagem de componentes.	107
6.3 - Método de solução.	117
6.4 - Resultados numéricos.	126
6.5 - Conclusão.	132

CONCLUSÃO	133
-----------	-----

BIBLIOGRAFIA	136
--------------	-----

APÊNDICE A	147
------------	-----

LISTA DAS FIGURAS

Capítulo 2

2.1-Equivalente monofásico e diagrama fasorial de um segmento de linha de distribuição.	36
2.2-Diagrama fasorial para cálculo de queda de tensão aproximada em uma linha de distribuição.	37
2.3-Modelo de gerador.	38
2.4-Modelo de carga.	38
2.5-Modelo de linha de distribuição.	38
2.6-Modelo de capacitor.	39
2.7-Modelo de regulador de tensão automático	39
2.8-Modelo de autobooster.	39
2.9-Carga fictícia com distribuição triangular.	41
2.10-Carga fictícia com distribuição retangular.	42
2.13-Diagrama unifilar do sistema 1.	49
2.12-Diagrama unifilar do sistema 2.	52

Capítulo 3

3.1-Modelo de gerador trifásico.	62
3.2-Modelo de carga trifásica.	62
3.3-Modelo de linha de distribuição trifásica.	62
3.4-Modelo de capacitor trifásico.	63
3.5-Banco de reguladores ligados em estrela.	63
3.6-Banco de autoboosters ligados em estrela.	64
3.7-Equivalente estrela e diagrama fasorial de linha de distribuição trifásica.	65
3.8-Triângulos perpendiculares semelhantes.	68
3.9-Parte de um diagrama fasorial estrela de uma linha de distribuição trifásica.	68
3.11-Diagrama unifilar - sistema 3.	73
3.12-Diagrama unifilar - sistema 4.	74

Capítulo 4

4.1-Diagrama geométrico de $f(k)$.	83
4.3-Diagrama unifilar - sistema 5.	86

TABELAS

Capítulo 2

2.1-Número de iterações de GS, FCDR e MM para sistema 1.	50
2.2-Resultados de módulos de tensões do sistema 1 e erros de tensão.	50
2.3-Resultados de ângulos de tensões do S1.	51
2.4-Resultados de fluxos de potência do S1.	51
2.5-Resultados de módulos e ângulos de tensões do S2 e erros (%).	53
2.6-Resultados de módulos e ângulos de tensões - Simulação MM.	55
2.7-Resultados de módulos e ângulos de tensões FCDR e MM.	57

Capítulo 3

3.1-Variáveis usadas para simulação de bancos de reguladores.	70
3.2-Resultados de módulos e ângulos de tensões - S3.	74
3.3-Resultados de módulos e ângulos de tensões - S4.	75

Capítulo 4

4.1-Resultados de módulos de tensão - S1.	87
4.2-Resultados de ângulos de tensões - S1.	88
4.3-Resultados de fluxos de potência - S1.	88
4.4-Número de iterações para convergência.	89
4.5-Resultados de determinantes normalizados - S1.	89
4.6-Resultados de determinantes normalizados - S5.	90
4.7-Número de iterações para convergência.	91

Capítulo 5

5.1-Número de iterações do FCDR, MFDPFM, NDPFM, BX e FCDMAPE - precisão simples.	101
5.2-Número de iterações do FCDR, MFDPFM, NDPFM, BX e FCDMAPE - precisão dupla.	101

5.3-Raio espectral (RE), Cond e Rcond - Sistema IEEEER - 13.	102
5.4-Resultados de módulos e ângulos de tensões - Sistema IEEEER - 13.	104

Capítulo 6

6.1-Número de iterações para convergência - precisão simples.	127
6.2-Número de iterações para convergência - precisão dupla.	127
6.3-Módulo de tensão (pu) - grau de desequilíbrio de tensões (%).	128
6.4-Ângulos de tensões (graus).	128
6.5-Módulos de tensões de barra com efeito das impedâncias mútuas e grau de desequilíbrio de tensões.	129
6.6-Ângulos de tensões com efeito das impedâncias mútuas (graus).	130
6.7-Tensões de barras desequilibradas.	130
6.8-Módulo e ângulo de tensões mútuas,respectivamente em pu e em graus.	131

FLUXOGRAMAS

Capítulo 1

1.1-Método de Gauss-Seidel.	22
1.2-Método de Newton-Raphson.	26
1.3-Método desacoplado rápido.	31

Capítulo 2

2.11-Fluxo de carga baseado no método dos momentos com perdas determinadas através de RI^2 e de IX^2	47
2.12- Fluxo de carga baseado no método dos momentos com perdas calculadas pela soma de fluxos de potência.	48

Capítulo 3

3.10-Fluxo de carga trifásico baseado no método dos momentos.	72
---	----

Capítulo 4

4.2-Fluxo de carga de L. Wang e outros.	85
---	----

Capítulo 5

5.4-Método FCDMAPE.	103
---------------------	-----

Capítulo 6

6.8-Fluxo de carga trifásico com circuitos por fase.	125
--	-----

SIMBOLOGIA

Neste trabalho o significado de cada termo das equações apresentadas, está descrito a seguir.

Caracteres Latinos

- I_k - módulo da corrente injetada na barra k.
- I_p - módulo da parcela ativa da corrente total.
- I_q - módulo da parcela reativa da corrente total.
- l_k - comprimento da linha de distribuição.
- R_k - resistência da linha de distribuição.
- X_k - reatância da linha de distribuição.
- S_k - módulo da potência complexa injetada na barra k.
- V_i - módulo de tensão na barra i.
- V_k - módulo de tensão na barra k.
- $[Y_{ik}]$ - matriz de admitância de barra.
- E_i - tensão fasorial na barra i.
- E_k - tensão fasorial na barra k.
- P_i - potência ativa injetada na barra i.
- P_k - potência ativa injetada na barra k.
- Q_i - potência reativa injetada na barra i.
- Q_k - potência reativa injetada na barra k.
- G_{ik} - elemento da matriz de admitâncias - condutância.
- B_{ik} - elemento da matriz de admitâncias - susceptância.
- H_{ik} - elemento da matriz jacobiana - submatriz H.
- N_{ik} - elemento da matriz jacobiana - submatriz N.
- J_{ik} - elemento da matriz jacobiana - submatriz J.
- L_{ik} - elemento da matriz jacobiana - submatriz L.
- $[B']$ - matriz de elementos constantes - FCDR.
- $[B'']$ - matriz de elementos constantes - FCDR.
- P_{ik} - fluxo de potência ativa da barra i para a barra k.
- P_{ki} - fluxo de potência ativa da barra k para a barra i.

Q_{ik} - fluxo de potência reativa da barra i para a barra k.

Q_{ki} - fluxo de potência reativa da barra k para a barra i.

P_{ik}^p - perdas de potência ativa.

Q_{ik}^p - perdas de potência reativa.

I_n - corrente fasorial de neutro.

Z_{acum} - impedância de uma linha de distribuição.

$P_{k, \text{acum}}$ - potência ativa acumulada à jusante da barra k.

$Q_{k, \text{acum}}$ - potência reativa acumulada à jusante da barra k.

S_k - módulo da potência complexa à jusante da barra k.

[E] - matriz de elementos constantes - FCDMAPE.

[B'''] - matriz de elementos constantes - FCDMAPE.

Caracteres Gregos

ϵ - tolerância especificada para convergência em um processo iterativo.

δ - ângulo de tensões entre duas barras.

ΔV - diferenças de tensões entre duas barras.

θ - ângulo do fator de potência.

θ_{ik} - ângulo entre duas tensões de barras.

α_i - ângulo de tensão da barra i.

α_k - ângulo de tensão da barra k.

ϕ_{ik} - ângulo do elemento da matriz de admitâncias.

ΔP_i - resíduo de potência ativa na barra i.

ΔQ_i - resíduo de potência reativa na barra i.

Σ - somatório.

∂ - operador de derivada parcial.

$\Delta \alpha$ - variação do ângulo de tensão.

ΔV_n - tensão fasorial de neutro.

φ - ângulo da tensão de neutro.

$\Delta \theta_i$ - variação do ângulo de tensão da barra i.

Abreviações e Acrônimos

FCDR - Fluxo de carga desacoplado rápido.

NR - Fluxo de carga Newton-Raphson.

GS - Fluxo de carga Gauss-Seidel.
MCM - Método clássico dos momentos.
MM - Fluxo de carga baseado no método dos momentos.
MFDPFM - Fluxo de carga - versão devido a Rajicic e Bose.
NDPFM - Fluxo de carga - versão devido a L.Wang e outros.
BX - Fluxo de carga - versão devido a Amerongen.
FCDMAPE - Fluxo de carga desacoplado modificado com acumulação de potências equivalentes.

INTRODUÇÃO

Generalidades

A análise de fluxo de carga é talvez o mais importante e o mais freqüente dos vários estudos que se fazem modernamente em sistemas de potência. Essa análise é extensivamente usada nas fases de projeto, planejamento e operação de sistemas, constituindo-se no estudo em si, e como parte de estudos mais complexos, tais como os de otimização, estabilidade, contingências etc.

O objetivo de um fluxo de carga é a determinação das tensões em módulo e ângulo para todos os nós do sistema, dada uma certa configuração e uma condição de carga, e, a partir daí, a determinação dos fluxos de potência nos ramos e as potências ativas e reativas geradas, consumidas e perdida no sistema. Portanto, em resumo, o que se deseja é a determinação do estado de operação do sistema, dadas sua topologia e uma condição de carga.

A análise de fluxo de carga antigamente (antes de 1930) era feita à mão, o que pressupunha inúmeras simplificações e impossibilitava a análise de grandes sistemas, uma vez que o volume de cálculo envolvido é enorme mesmo para sistemas pequenos. Mais tarde (depois de 1930), passou-se a utilizar o analisador de redes. O mesmo é meramente um dispositivo para fazer analogias elétricas. Para problemas elétricos, a analogia é direta, isto é, a corrente elétrica no sistema do problema é representada por uma corrente no análogo, a tensão é representada por uma tensão, e assim por diante. O sistema que está sendo investigado é representado por outro circuito em uma escala bastante reduzida.

Porém o problema básico de imprecisão e lentidão de cálculo continuou e só pode ser sanado mais tarde com a utilização de computadores digitais.

Os primeiros algoritmos para a análise de sistemas de potência em computadores digitais apareceram em 1940.

A disponibilidade do computador alterou grandemente os métodos matemáticos usados na solução de sistemas elétricos. Os cálculos à mão que eram executados mais facilmente usando as equações de laços, foram automatizados pelos primeiros programas de computador escritos para analisar os fluxos nos sistemas, como mostra Henderson, na referência [Henderson, 1955].

O primeiro programa de fluxo de carga que teve realmente sucesso foi desenvolvido por Ward e Hale [Ward & Hale, 1956]. Eles usaram a formulação nodal do problema e resolveram as equações quadráticas simultâneas que descrevem o circuito elétrico através de um método iterativo de Newton modificado. O método não foi usado em programas de produção, que foram implementados imediatamente após a publicação do trabalho, devido à grande facilidade de programação do algoritmo de Gauss-Seidel desenvolvido por Glimn e Stagg [Glimn & Stagg, 1957].

Apesar do sucesso dos métodos usando equações nodais, desde que estes provaram ser bastantes superiores para a solução de problemas de circuitos em computadores, vários investigadores trabalharam consideravelmente com os algoritmos da matriz incidente e da matriz de conexão para determinar automaticamente laços independentes no circuito, pois esta era a parte mais difícil da preparação dos dados para a formulação do problema por laços [Tinney & Mcintyre, 1960], [Edelman, 1964]. O método teve algum sucesso, mas em compensação aumentou o problema da limitada disponibilidade de memória do computador, que existia naquele tempo.

Já nesta época trabalhos voltados exclusivamente para sistema de distribuição radiais são desenvolvidos. Cita-se aqui o trabalho devido a Hatcher e Busby [Hatcher & Busby, 1961]. Neste trabalho Hatcher e Busby usaram um método de aproximações sucessivas para o cálculo das tensões e correntes do sistema radial. As

linhas são tratadas como tendo somente impedância série e os transformadores são modelados sem a representação do tape.

O aumento das interligações de alta tensão entre sistemas na década de 60 e a disponibilidade de grandes computadores aumentaram grandemente o tamanho dos sistemas estudados. Estudos de fluxo de carga de sistemas maiores pelo método de Gauss-Seidel requerem maior número de iterações para se obter uma solução ou se tornam matematicamente instáveis, mesmo que o sistema em estudo seja realmente um sistema viável. Durante o processo iterativo, no método de Gauss-Seidel, os efeitos de ajustes em uma iteração se refletem somente nos nós vizinhos. A propagação de um ajuste em um grande sistema, portanto, exige várias iterações. Neste ínterim ajustes conflitantes poderão estar sendo feitos e sendo transmitidos e refletidos através do sistema.

Felizmente, já em 1961 pesquisadores estavam investigando outros métodos de resolução dos problemas de fluxo de carga. E Van Ness, referências [Ness, 1959] e [Ness & Griffin, 1961], descreveu um método de fluxo de carga usando a representação de Newton-Raphson na íntegra. Pequenos problemas testes demonstraram que o algoritmo resolveria problemas que não poderiam ser resolvidos pelo uso do método de Gauss-Seidel, principalmente em sistemas com impedâncias negativas. A técnica fornecia uma solução com pouquíssimas iterações. Tinha aparentemente uma vantagem em velocidade sobre o outro método, mas era necessária memória adicional para armazenagem da matriz jacobiana, em comparação com a matriz de admitância nodal do algoritmo de Gauss-Seidel. Devido à capacidade de solucionar casos difíceis à uma aparente velocidade maior, o Bonneville Power Administration Group decidiu substituir o seu programa de fluxo de carga pelo algoritmo de Newton-Raphson. Durante o desenvolvimento verificou-se que o programa agora era mais lento que o método de Gauss-Seidel e exigia uma quantidade muito maior de memória. O Bonneville Group concluiu que a dificuldade

não estava na técnica de Newton, mas na ordenação das equações no procedimento de eliminação. A solução foi desenvolvida por Sato e Tinney e relatada na literatura, referências [Sato & Tinney, 1963] e [Tinney & Hart, 1967]. Porém o algoritmo mostrou-se um pouco mais susceptível de falha que os outros métodos, se os valores iniciais do perfil de tensões não fossem cuidadosamente escolhidos. Programas anteriores, como o desenvolvido por Tinney e Walker [Tinney & Walker, 1967], usavam uma iteração de Gauss-Seidel antes de iniciarem o procedimento Newton-Raphson. Isto foi desaconselhado porque o algoritmo de Gauss usualmente distorce o perfil de tensões nas primeiras iterações, fazendo com que algumas barras do sistema fiquem mais distantes da solução do que previa a estimativa inicial.

Outro método de fluxo de carga que evita a instabilidade do método de Gauss-Seidel é o algoritmo do fluxo de carga da matriz de impedância desenvolvido por Brown e outros, referências [Brown et alii, 1963] e [Brown, 1977]. Este método tem características de convergência semelhante às do método de Newton-Raphson para a média dos problemas de fluxo de carga dos sistemas elétricos. Entretanto, as necessidades de memória para a matriz de impedâncias são muito severas, pois a matriz Z é cheia e não esparsa, como é o caso da matriz Y do método de Gauss-Seidel ou a matriz jacobiana do método de Newton-Raphson. Estes problemas severos de memória podem ser superados subdividindo-se o sistema em partes e usando-se as técnicas diacópticas de Kron como mostra Andertich e outros [Andertich et alii, 1968].

Entre outros métodos de fluxo de carga, que foram propostos durante a década de 60 pode-se citar: O método de Carré [Carré, 1968], onde se apresenta um método de calcular fluxo de carga pelo particionamento do sistema em subsistemas na forma de árvores, para os quais as equações de tensão nos nós podem ser resolvidas por eliminação de Gauss com ordenação ótima —. O método de Takahashi e Sekine e Umezu [Takahashi & Sekine & Umezu, 1968], que aplica um método de fluxo em

rede, originalmente desenvolvido para resolução de problemas de transporte —. O método de Yehuda Wallach [Wallach, 1968], que aplica métodos de gradiente para estudos de fluxo de carga e o método de R. Berg, E. S. Hawkins e W. W. Pleines [Berg & Hawkins & Pleines, 1967], que descrevem um método computacional para calcular fluxo de carga ou correntes de falta desequilibradas em circuitos de distribuição radial multi-aterrados. Ainda na década de 60 temos mais duas contribuições importantes: a primeira devido a Carpentier [Carpentier, 1963] e a segunda devido a Laughton [Laughton, 1968]. Na primeira referência, Carpentier reconhecendo a independência comparativa da potência real para alterações na amplitude de tensão e da potência reativa para alterações no ângulo, sugeriu que as sub-matrizes [N] e [J] no método de Newton-Raphson fossem igualadas a zero; assim, as equações de watt e var seriam desacopladas.

Este desacoplamento diminuiria o tempo exigido por iteração, visto que há menos cálculos para serem feitos, e reduziria a necessidade de memória para armazenagem do programa. A técnica sugerida atraiu muito pouca atenção naquela época, pois a soma gasta nos cálculos de fluxo de carga ainda não tinha crescido ao ponto de exigir imediata atenção. Na segunda referência, Laughton apresentou os princípios de modelos de transformadores em coordenadas de fase e aplicou-os para o desenvolvimento de circuitos equivalentes por fase de transformadores polifásicos equilibrados e desequilibrados com multi-enrolamentos.

Na segunda metade da década de 60, o rápido crescimento do número de interconexões de alta tensão alargou a área de influência nos estudos dos sistemas para bem além dos limites da companhia, chegando até a barras situadas nos sistemas vizinhos. Isto exigiu o uso de cada vez mais barras para uma representação apropriada com conseqüente aumento do tempo de cálculo por caso e um grande aumento no número de condições de contingência que exigiam investigação. Com este incentivo, o método sugerido por Carpentier foi reinvestigado.

Os métodos apresentados por Despotovic e Babic e Mastilovic [Despotovic & Babic & Mastilovic, 1971], Stott [Stott, 1972] e Despotovic [Despotovic, 1973], que então surgiram, desacoplam as equações de potência real e reativa para se alcançar maior velocidade na obtenção da solução.

Independente da idéia de Carpentier outros métodos de fluxo de carga foram publicados. Citam-se aqui os seguintes: O método devido a Dusaonchet e outros [Dusaonchet et alii, 1970]. Neste método as equações do fluxo de carga são divididas em dois grupos. O primeiro grupo de equações, correspondentes às barras de carga, é resolvido pelo método do ponto de Jacobi generalizado; o segundo grupo, correspondentes às barras de tensão controlada é resolvido pelo método de Newton-Raphson —. O método devido a Kesavan e Pai e Bhat [Kesavan & Pai & Bhat, 1971]. Este trabalho apresenta a formulação de fluxo de carga através das matrizes de impedância e admitância resolvido por técnicas diacópticas com base em conceitos da teoria dos grafos —. O método de Roy [Roy, 1971]. L. Roy apresenta um novo método de solução de fluxo de carga usando superposição para grandes redes elétricas integradas —. O algoritmo de Sasson e Trevino e Aboytes [Sasson & Trevino & Aboytes, 1971]. Neste trabalho o método de Newton é alterado para que se obtenha uma melhor convergência do que a do método original de fluxo de carga Newton. O método proposto é obtido através da comparação com um procedimento de programação não linear.

O mais popular dos fluxos de potência do tipo Newton modificado foi lançado em 1973. O fluxo de carga desacoplado rápido devido a Stott e Alsac [Stott & Alsac, 1973], usando tangentes constantes e técnicas de esparsidade propostas por Zollenkopf [Zollenkopf, 1970], foi rapidamente adotado nos Centros de Operação em Tempo Real da Europa e de outros países. Este método tornou-se muito atrativo devido a sua confiabilidade e rapidez de convergência tendo como base duas matrizes constantes.

A partir de 1973 as pesquisas na área de fluxo de carga continuaram concentradas no método de Newton-Raphson e também no desacoplado rápido e foram propostos outros algoritmos de fluxo de carga como os citados a seguir: Método devido a Wasley e Shlash [Wasley & Shash, 1974]. R. G. Wasley e M. A. Shlash apresentam a versão trifásica do método de Newton — Método devido a Laha e outros [Laha et alii, 1974]. Este trabalho apresenta uma forma do método de Newton modificado que difere do método original na formulação do vetor de resíduos — Algoritmo devido a V. A. Venikov e outros [Venikov et alii, 1975]. Os autores mostram que quando se usa o método de Newton para resolver as equações de fluxo de carga, a medida do mal condicionamento é o valor do determinante do jacobiano, que diminui e eventualmente muda de sinal no decurso do processo iterativo de solução. Ainda segundo Venikov a mudança de sinal do jacobiano assinala a perda de estabilidade de regime permanente, também chamada de estabilidade para pequenas perturbações ou estabilidade estática. A proposta de Venikov para modificar o método de Newton consiste na definição de um coeficiente λ calculado a cada iteração. Na iteração em que a matriz jacobiana do sistema de equações for mal-condicionada, este coeficiente assume um valor menor que a unidade. Neste caso sua multiplicação pelo vetor de resíduos serve para evitar que o novo valor da variável sofra uma grande correção — Método de Birt e outros [Birt et alii, 1976]. Birt e outros apresentam um fluxo de carga trifásico geral desenvolvido para análise de redes elétricas de transmissão sob condições desequilibradas tais como linhas EHV não transpostas, cargas em uma só fase, chaveamento monofásico etc. O método usado é o de Newton-Raphson.

Também em 1976 foi proposto mais um fluxo de carga direcionado especificamente para sistemas de distribuição. A proposição de W. H. Kersting e D. L. Mendive [Kersting & Mendive, 1976], usa uma técnica iterativa adaptada da teoria de sistemas lineares em redes escalonadas.

Ainda durante a década de 70 pode-se citar mais alguns trabalhos desenvolvidos: Método de Sachdev e Medicheria [Sachdev & Medicheria, 1977]. Estes autores apresentam uma técnica de fluxo de potência de segunda ordem que visa maior sensibilidade para a convergência —. Trabalho de Johnson [Johnson, 1977]. Johnson, em seu trabalho, deu ênfase aos tipos de solução de fluxo de carga descrevendo dois mecanismos, que provocam, segundo o autor, soluções estranhas e falsas: o primeiro mecanismo está relacionado com sistemas que apresentam linhas longas muito carregadas, ou geradores alimentando cargas capacitivas. O segundo mecanismo é dependente das restrições de reativos aplicados em um algoritmo tradicional de Newton-Raphson —. Estudo teórico de Wu [Wu, 1977]. Felix F. Wu apresenta um estudo teórico para obter as condições de convergência do método de fluxo de carga desacoplado rápido. Na discussão deste trabalho B. Stott afirma que durante o desenvolvimento do fluxo de carga desacoplado rápido tentou sem sucesso determinar uma maneira rigorosa para explicar a convergência do método em estudo —. Trabalho de Abe e outros [Abe et alii, 1978]. S. Abe e outros estudaram uma região onde um conjunto de valores iniciais convergem para uma solução de fluxo de carga estável, quando o método de Newton é aplicado a um sistema de equações de potência representadas em coordenadas polares ou retangulares. E finalizando estas citações de trabalhos feitos nos anos 70 temos o trabalho de Arrilaga e Harker [Arrilaga & Harker, 1978] e [Arrilaga & Arnold, 1983], que publicaram a versão trifásica do método desacoplado rápido.

Durante a década de 80 as pesquisas continuaram enfocando o método de Newton-Raphson e o desacoplado rápido com ênfase em modificar estes métodos tendo como objetivo sua utilização em sistemas mal-condicionados. Também temos alguns trabalhos voltados para o sistema de distribuição. A seguir vários desses trabalhos são listados e comentados: Método devido a Iwamoto e Tamura [Iwamoto & Tamura, 1981]. Neste trabalho S. Iwamoto e Y. A. Tamura apresentam um método

de fluxo de potência para sistemas mal-condicionados. O método aplica um multiplicador ótimo ao método de Newton-Raphson —. Método devido a Rao e Rao e Nanda [Rao & Rao & Nanda, 1981]. P. S. Nagendra Rao e outros apresentam um modelo híbrido reunindo os modelos da matriz de impedâncias e do fluxo de carga de segunda ordem. Este método também é aplicado a sistemas mal-condicionados —. Trabalho de Braess e Grebe [Braess & Grebe, 1981]. D. Braess e E. Grebe através de uma análise numérica dos métodos de Newton e da matriz Z aplicados ao cálculo do fluxo de potência, determinam uma condição suficiente para se obter a convergência —. Outro método devido a Rao e Rao e Nanda [Rao & Rao & Nanda, 1982]. P. S. Nagendra Rao e outros apresentam um método de fluxo de carga rápido e exato incluindo termos de segunda ordem em coordenadas retangulares. O método é aplicado em sistemas onde o desacoplado rápido falha. —. Contribuição de Tripathy e outros [Tripathy, 1982]. Neste trabalho é usado o método matemático de K. M. Brown para resolver as equações do fluxo de potência. Segundo os autores o método é particularmente eficiente para a solução de sistemas mal-condicionados. O mesmo é uma variação do método de Newton incorporando eliminação de Gauss em um caminho que as informações mais recentes são usadas no passo seguinte, similarmente ao que acontece no método de Gauss-Seidel.

O problema da convergência do método desacoplado rápido discutida por Felix F. Wu retorna com a publicação de mais um artigo contestando a proposta de Wu e um critério empírico é proposto por P. S. Nagendra Rao e outros [Rao & Rao & Nanda, 1984]. Garcia e outros propõem uma rotação de eixos no método desacoplado rápido para aplicações em sistemas com relações R / X altas [Garcia et alii, 1984]. Também Paul H. Haley e Mark Ayres [Halley & Ayres, 1985] propõem uma modificação no método desacoplado rápido para sistemas com relações R / X altas.

Pode-se ainda citar os seguintes trabalhos realizados na década de 80: Trabalho devido a Shirmohammadi e outros [Shirmohammadi et alii, 1988]. D. Shirmohammadi e outros propõem um método de fluxo de potência para resolver redes de transmissão e distribuição fracamente malhadas usando uma técnica de compensação multi-porta e formulação com base nas leis de Kirchhoff. É o método chamado de soma de correntes —. Contribuição de Chang e Brandwajn [Chang & Brandwajn, 1988]. Show-Kang Chan e Vladimir Brandwajn propõem ajustes na solução do fluxo desacoplado rápido —. Método de Broadwater e outros [Broadwater et alii, 1988]. R. P. Broadwater e outros propõem o método da soma de potências. Este é um método próprio para solução de fluxo de potência em sistemas radiais. Esta técnica apresenta uma pequena necessidade de armazenamento de memória computacional aliada com uma grande velocidade de convergência —. Trabalho devido a Rajicic e Bose [Rajicic & Bose, 1988]. Dragoslav Rajicic e Anjan Bose apresentam uma modificação no fluxo desacoplado rápido para sistemas com relações R / X altas. O método é desenvolvido de acordo com a experiência —. Contribuição de Dehnel e Dommel [Dehnel & Dommel, 1989]. M. Dehnel e H. W. Dommel mostram nesse trabalho um método para identificar áreas com nós fracos que podem fazer divergir o método de fluxo de potência de Newton-Raphson.

Finalmente terminando as citações de trabalhos nos anos 80 temos o trabalho de Amerongen [Amerongen, 1989]. Neste importante artigo Robert A. M. Amerongen estudou quatro algoritmos por ele designados de BB, XB, BX e XX. Um deles é o método de fluxo de carga desacoplado rápido XB e os outros três são versões do mesmo.

O início da década de 90 apresenta uma quantidade grande de artigos voltados exclusivamente para os sistemas de distribuição, confirmando a tendência do final da década de 80. Também, ainda, temos vários trabalhos derivados do método de Newton-Raphson e do desacoplado rápido.

A dessiminação rápida da informática nos anos 90 com a diversidade de computadores de pequeno porte aponta para o desenvolvimento de programas que adaptem-se a este tipo de máquina, devido ao seu baixo custo e facilidade de operação.

O primeiro trabalho, aqui destacado, de janeiro de 1990 é devido a Wang e outros [Wang et alii, 1990]. Neste trabalho Wang e outros apresentam uma modificação no método desacoplado rápido para sistemas com relações R / X altas. O método é desenvolvido com uma base teórica e trabalha bem em sistemas com relações R / X altas e baixas.

A seguir os demais trabalhos publicados nos anos 90, que são aqui citados: Método de Céspedes [Céspedes, 1990]. Renato Céspedes apresenta um novo método para a solução de sistemas de distribuição. O método é baseado em equivalentes elétricos e elimina os ângulos de tensões das equações de solução, as quais permitem obter as soluções exatas, segundo o autor, somente com os módulos de tensões nas barras —. Método devido a Chen e outros [Chen et alii, 1990]. B. K. Chen e outros propõem um fluxo de potência trifásico híbrido com as matrizes de impedância e admitância e a técnica de solução de Gauss —. Contribuição de Chiang [Chiang, 1991]. Hsiao-Dong Chiang apresenta alguns algoritmos para redes de distribuição e faz estudos de convergência destes mesmos algoritmos —. Trabalho devido a Monticelli e Garcia e Saavedra [Monticelli & Garcia & Saavedra, 1990]. Alcir Monticelli e outros descrevem uma maneira unificada para o estudo do método desacoplado rápido, e mostram que para sistemas radiais e sob certas suposições, o acoplamento entre as sub-matrizes jacobianas, que são desprezadas durante a formulação do método citado, são corretamente consideradas no cálculo de ambas as versões BX e XB citadas por Amerongen —. Método de Luo e Semlyen [Luo & Semlyen, 1990]. Os autores apresentam um fluxo de carga para grandes sistemas de distribuição e transmissão fracamente malhados. Eles usaram uma técnica de

classificação de árvores que contribui, segundo os autores, para a eficiência computacional do método —. Método de Goswami e Basu [Goswami & Basu, 1991]. Este artigo relata uma técnica direta de fluxo de potência para redes radiais de distribuição. Um conjunto de equações é escrita para uma rede de distribuição pela aplicação das leis de Kirchhoff com as cargas sendo representadas como impedâncias constantes ao invés de potência complexa constante —. Algoritmos devidos a Crouch e outros [Crouch et alii, 1992]. P. E. Crouch e outros apresentam dois novos algoritmos que são modificações dos algoritmos BX e XB já comentados —. Método de Nanda e outros [Nanda et alii, 1992]. J. Nanda e outros propõem uma versão do fluxo desacoplado rápido onde todos os shunts de transformadores, linhas e barras são tratados como cargas com impedância constante. O efeito da resistência série das linhas é considerado enquanto forma-se a matriz B linha e é ignorado enquanto forma-se a matriz B duas linhas —. Contribuição de Garcia e Zago [Garcia & Zago, 1992]. Ariovaldo V. Garcia e Maria Goretti Zago apresentam um fluxo de carga trifásico baseado em teoria publicada na referência [Monticelli & Garcia & Saavedra, 1990] já comentada —. Contribuição devido a Tylavsky e outros [Tylavsky et alii, 1994]. Daniel J. Tylavsky e outros apresentam um estudo sobre os efeitos da precisão e pequenas impedâncias de ramos nos fluxos de carga Newton-Raphson e desacoplado rápido —. Método de Rajicic e Ackovski e Taleski [Rajicic & Taleski, 1994]. Dragoslav Rajicic e outros descrevem um fluxo de carga para redes de transmissão e distribuição fracamente malhadas. O algoritmo é baseado na ordenação orientada dos elementos da rede —. Trabalho de Zhang e Chen [Zhang & Chen, 1994]. Neste trabalho são apresentados estudos de fluxo de carga trifásico com dois métodos baseados na teoria de componentes simétricos: o método da admitância de barra e o método da compensação desacoplada —. Método de Das e Nagi e Kothari [Das & Nagi & Kothari, 1994]. Neste artigo é apresentado outro método para resolver redes radiais de distribuição. O método envolve o uso de expressões

algébricas de tensões sem nenhuma função trigonométrica —. Algoritmo de Overbye [Overbye, 1994]. Thomas J. Overbye propõe um algoritmo baseado no método de Newton-Raphson para aplicar em casos de solução difícil.

A partir desse levantamento bibliográfico observa-se duas tendências para lidar com o problema do fluxo de carga em sistemas de distribuição ou em sistemas com relações R / X altas inserindo-se, então, nesses, os sistemas de distribuição. Em uma delas, procura-se o melhoramento do desempenho do método original de fluxo de carga desacoplado rápido. Na outra, procura-se desenvolver métodos de fluxo de carga específicos para sistemas de distribuição. Com esse panorama montado surgiu a motivação para desenvolver-se algoritmos de fluxo de carga para o planejamento e para operação de sistemas de distribuição, fáceis de programar, de baixa capacidade de armazenamento computacional, de alta velocidade e confiabilidade de convergência, aplicados a computadores pessoais do tipo PC e de fácil aceitação em companhias de distribuição. Pois, vários algoritmos de fluxo de carga apresentam problemas de convergência em sistemas de distribuição, e além disso poder desenvolver contribuições originais de outros algoritmos para esses tipos de sistemas.

Para o desenvolvimento de um fluxo de carga específico para sistemas de distribuição com as características já comentadas optou-se em formular o mesmo baseado no tradicional método dos momentos, pois o mesmo é largamente usado nas concessionárias de energia para a determinação da queda de tensão em seus alimentadores. Em virtude de se considerar neste método, que a defasagem angular entre as tensões terminais é nula, os resultados obtidos são pouco precisos, a estimação das perdas é geralmente grosseira e pouca informação se tem sobre o fluxo de reativos. Além de não se ter informações sobre os reguladores de tensão, tornou-se um desafio desenvolver o fluxo de carga para distribuição radial baseado no método clássico dos momentos e compará-lo com algoritmos clássicos já consagrados como os de Gauss-Seidel, Newton-Raphson e desacoplado rápido, conforme a publicação

referida com a indicação [Moura & Carvalho & Mota, 1994-1]. Também, considera-se desafio o desenvolvimento da versão trifásica do método citado [Moura & Carvalho & Mota, 1994 - 2].

Seguindo a tendência de melhorar o algoritmo do fluxo de carga desacoplado rápido para aplicações em sistemas de distribuição, estudou-se as características específicas dos sistemas de distribuição e seus efeitos nas matrizes dos fluxos desacoplados. Com isso foi possível propor outro algoritmo usando uma versão do método desacoplado rápido e usando uma propriedade característica dos sistemas de distribuição conforme a referência [Moura & Carvalho & Mota, 1995]. Este método foi denominado de desacoplado modificado com acumulação de potências equivalentes.

Finalmente desenvolveu-se a versão trifásica desse último método, utilizando circuitos por fase.

Contribuições do Trabalho

Neste trabalho os seguintes pontos podem ser considerados como contribuições originais à área de sistemas de potência: 1) Apresenta-se o algoritmo de fluxo de carga monofásico para sistemas de distribuição radiais baseado no método clássico dos momentos e avalia-se o seu desempenho em relação a algoritmos clássicos de fluxo de potência como Gauss-Seidel, Newton-Raphson, desacoplado rápido e o próprio método clássico dos momentos; 2) Apresenta-se dentro do algoritmo proposto uma maneira de considerar a modelagem de reguladores de tensão, considerando-se a inclusão do compensador de queda de tensão; 3) Apresenta-se a versão trifásica do fluxo de carga baseado no método dos momentos; 4) Avalia-se o desempenho dos métodos desacoplados devido a Rajicic, Amerongen e Wang em sistemas de distribuição; 5) Apresenta-se o fluxo de carga desacoplado modificado com acumulação de potências equivalentes e avalia-se o seu desempenho frente ao algoritmo clássico do método desacoplado rápido e três versões, através de sistemas radiais padrões do IEEE; 6) Apresenta-se a versão trifásica do fluxo de carga desacoplado modificado com acumulação de potências equivalentes.

Descrição de cada capítulo

No capítulo 1 são apresentados os fundamentos teóricos dos métodos de fluxo de carga Gauss-Seidel (GS), Newton-Raphson (NR) e desacoplado rápido (FCDR).

No capítulo 2 apresenta-se inicialmente o algoritmo básico do método clássico dos momentos (MCM). A seguir as hipóteses, aproximações e modelos feitos para o desenvolvimento do fluxo de carga baseado no método dos momentos (MMM). Em

seguida é descrito o algoritmo proposto. São, então, comparados os resultados obtidos com esse método frente a resultados obtidos com os métodos de GS, NR, FCDR, e MCM. Por último, apresenta-se as conclusões obtidas.

No capítulo 3 são apresentados, como na versão monofásica, os modelos utilizados no fluxo de carga trifásico baseado no método dos momentos. A seguir descreve-se o algoritmo proposto. Resultados obtidos são analisados e conclusões finais são formalizadas.

No capítulo 4 estuda-se três versões monofásicas do método FCDR: as versões devidas a 1) D. Rajicic e A. Bose; 2) Amerongen e 3) L. Wang e outros. Alguns comentários sobre sistemas mal-condicionados são feitos e resultados obtidos com os três métodos, através de sistemas de distribuição, são analisados. Conclusões finais são, então, formalizadas.

No capítulo 5 inicialmente são feitos alguns comentários sobre o desenvolvimento de fluxos desacoplados voltados para o sistema de distribuição. Em seguida são lembrados alguns aspectos teóricos sobre erros de arredondamento. A seguir, desenvolve-se os fundamentos do fluxo de carga desacoplado modificado com acumulação de potências equivalente. Resultados obtidos com o mesmo, com o FCDR e suas três versões descritas no capítulo 4 são comparados entre si. Então, conclusões finais são obtidas.

Finalmente no capítulo 6 é apresentado um algoritmo de fluxo de carga trifásico que utiliza circuitos por fase. Neste capítulo, inicialmente é descrita a modelagem utilizada para representar os componentes do sistema de distribuição. Em seguida, é apresentado o método de solução do fluxo de carga trifásico. Resultados numéricos do sistema do IEEE radial com 13 barras são apresentados. E finalmente, as conclusões do capítulo.

No apêndice A apresenta-se os dados de alguns sistemas simulados. No apêndice B apresenta-se os resíduos de potência ativa e reativa de alguns sistemas

simulados, através dos fluxos de carga monofásico e trifásico baseados no método dos momentos.

CAPÍTULO 1

FLUXO DE CARGA GAUSS-SEIDEL, NEWTON-RAPHSON E DESACOPLADO RÁPIDO

Resumo

Existem muitos algoritmos de fluxo de carga. Porém, os mais usados são os de Gauss - Seidel, Newton - Raphson e desacoplado rápido. Neste capítulo desenvolve-se as equações desses métodos, os quais são usados no próximo capítulo, para obter-se resultados através de comparações. Enfoca-se o desenvolvimento de equações, fluxogramas e aspectos computacionais dos métodos citados.

1.1. Introdução

Antes de 1930 a análise de fluxo de carga era feita manualmente o que pressupunha inúmeras simplificações e impossibilitava a análise de grandes sistemas. O uso de analisadores de rede deu-se no período de 1930 a 1956. Porém, o problema básico de imprecisão e lentidão de cálculo, associado as limitações de dimensão, só pode ser sanado posteriormente com a utilização de computadores digitais, quando foram desenvolvidos métodos matemáticos e conseqüentemente programas computacionais para uma melhor solução das equações de fluxo de potência.

Surgiram, então, diversas metodologias para resolver as equações de fluxo de carga. Entre estas as mais utilizadas são as de Gauss-Seidel, Newton-Raphson e desacoplado rápido.

Neste capítulo descreve-se as equações destas três técnicas mais usadas para a análise de sistemas de potência. Inicialmente é descrito o método de Gauss-Seidel usando a matriz de admitância de barra [Elgerd, 1982] e [Stagg & Abiad, 1968]. Em seguida descreve-se o fluxo de carga Newton-Raphson de acordo com Van Ness [Ness, 1959] e [Lima & Medeiros, 1980]. A formulação do método desacoplado rápido, de acordo com Stott e Alsac [Stott & Alçac, 1973] e [Heydt, 1986], vem logo a seguir. Finalmente as conclusões finais encerram o capítulo.

1.2. Método de Gauss-Seidel usando a matriz admitância de barra

Sabe-se das equações básicas do fluxo de carga que:

$$\operatorname{Re}\left[\sum_{k=1}^n Y_{ik} \cdot E_k\right] = \operatorname{Re}\left[\left(S_i^G - S_i^C\right)^* / E_i^*\right]$$

$$\operatorname{Im}\left[\sum_{k=1}^n Y_{ik} \cdot E_k\right] = \operatorname{Im}\left[\left(S_i^G - S_i^C\right)^* / E_i^*\right]$$

onde: Y_{ik} é um elemento da matriz de admitância de barra;

E_k é a tensão fasorial da barra k ;

E_i é a tensão fasorial da barra i ;

S_i^G é a potência complexa gerada na barra i ;

S_i^C é a potência complexa consumida na barra i .

Logo pode-se escrever as equações seguintes:

$$P_i = \operatorname{Re}\left[E_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} E_k\right] \quad (1.1)$$

$$Q_i = -\operatorname{Im}\left[E_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} E_k\right] \quad \text{onde} \quad (1.2)$$

$$P_i = P_i^G - P_i^C \quad Q_i = Q_i^G - Q_i^C$$

$$(P_i - jQ_i) / E_i^* = Y_{ii} \cdot E_i + \sum_{k=1, (k \neq i)}^n Y_{ik} \cdot E_k \quad (1.3)$$

com

$(k \neq i)$

Ainda, reescrevendo a equação (1.3) para usar o método de Gauss-Seidel vem:

$$E_{ii} = [(P_i - jQ_i) / E_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} \cdot E_k] / Y_{ii} \quad (1.4)$$

Consideração: $(k \neq i)$

a) Se i é a barra de referência o módulo e o ângulo de tensão são conhecidos. Portanto, não se necessita de seus cálculos. E não há necessidade da inclusão da equação referida a i em (1.4).

b) Se i for uma barra de carga (tipo PQ)

$$P_i = (P_i^G)^{esp} - P_i^C = P_i^{esp}$$

$$Q_i = (Q_i^G)^{esp} - Q_i^C = Q_i^{esp}$$

São especificados os valores de P_i e Q_i e usa-se a equação (1.4) para o cálculo do módulo e do ângulo de tensão.

c) Se i for uma barra de tensão controlada (tipo PV) temos: $P_i = (P_i^G)^{esp} - P_i^C$

É necessário calcular um valor aproximado, a cada iteração, para a potência reativa injetada nos nós PV. Valor esse compatível com o perfil de tensões do sistema naquela iteração.

$$S_i = E_i \cdot I_i^*$$

$$Q_i = \text{Im} \{ E_i \cdot I_i^* \} \text{ e pode-se escrever } Q_i = -\text{Im} \{ E_i^* \cdot I_i \}, \text{ mas}$$

$$I_i = \sum_{k=1}^n Y_{ik} \cdot E_k \quad \text{vem:}$$

Etapa 1

$$Q_i = -\text{Im} \{ E_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} \cdot E_k \}$$

Etapa 2

Cálculo do ângulo de tensão, através da equação (1.4).

Ao calcularmos o módulo da tensão através da equação (1.4) não podemos ter certeza de que o módulo da mesma será igual à tensão especificada. Por isso, ao calcular o módulo da tensão temos que fazer uma racionalização. Isto é, a tensão final considerada terá como módulo a tensão especificada e como ângulo aquele calculado através da equação (1.4).

Etapa 3

$$E_{i \text{ racionalizado}} = V_i^{\text{especificado}} \angle \theta_i$$

Fatores de aceleração

A utilização de fatores de aceleração convenientes aumenta a velocidade de convergência do método de Gauss-Seidel usando a matriz de admitância de barra. Em geral, o fator de aceleração ótimo para a componente real de tensão é diferente do fator de aceleração ótimo para a componente imaginária da tensão [Stevenson, 1982]. Para aplicar os fatores de aceleração corrija-se a tensão E_i , calculada através da equação (1.4), como segue:

$$E_i^{n+1} \text{ acelerado} = E_i^n \text{ acel} + \gamma [\text{Real}(E_i^{n+1}) - \text{Real}(E_i^n \text{ acel})] + j \beta [\text{Imag}(E_i^{n+1}) - \text{Imag}(E_i^n \text{ acel})] \quad (1.5)$$

Na ausência de melhores informações sobre o sistema, aconselha-se usar $\gamma = \beta = 1.5$.

Aspectos computacionais do método de Gauss-Seidel

Usando-se esparsidade o gasto total de memória é proporcional ao número de barras do sistema. O número de operações aritméticas por iteração também é proporcional ao número de barras do sistema.

Devido ao fraco acoplamento matemático existente entre os nós do sistema quando o método usa a matriz de admitância de barra, o ajuste feito na tensão de um nó reflete-se apenas nos nós vizinhos, naquela iteração, de forma que são necessárias muitas iterações para que o ajuste se propague por todo o sistema. Como as tensões de todos os nós são corrigidas a cada iteração, pode acontecer que ajustes conflitantes estejam propagando-se pelo sistema em um dado período durante a solução, de tal forma que a convergência seja não apenas retardada, mas até dificultada. Assim, o método realiza muitas iterações para a convergência.

Sempre que a matriz de admitância não for diagonalmente dominante pode-se esperar dificuldades de convergência com o método de Gauss - Seidel. Exemplos

destas situações são: sistema com compensação série; compensação shunt; trafos de três enrolamentos; barras as quais cheguem ramos com admitâncias de ordens de grandeza muito diferentes; sistemas fortemente radiais etc.

A seguir apresenta-se o fluxograma do método de Gauss-Seidel com matriz de admitância de barra [Ramos & Dias, 1982].

DIAGRAMA DE BLOCOS = GAUSS SEIDEL.

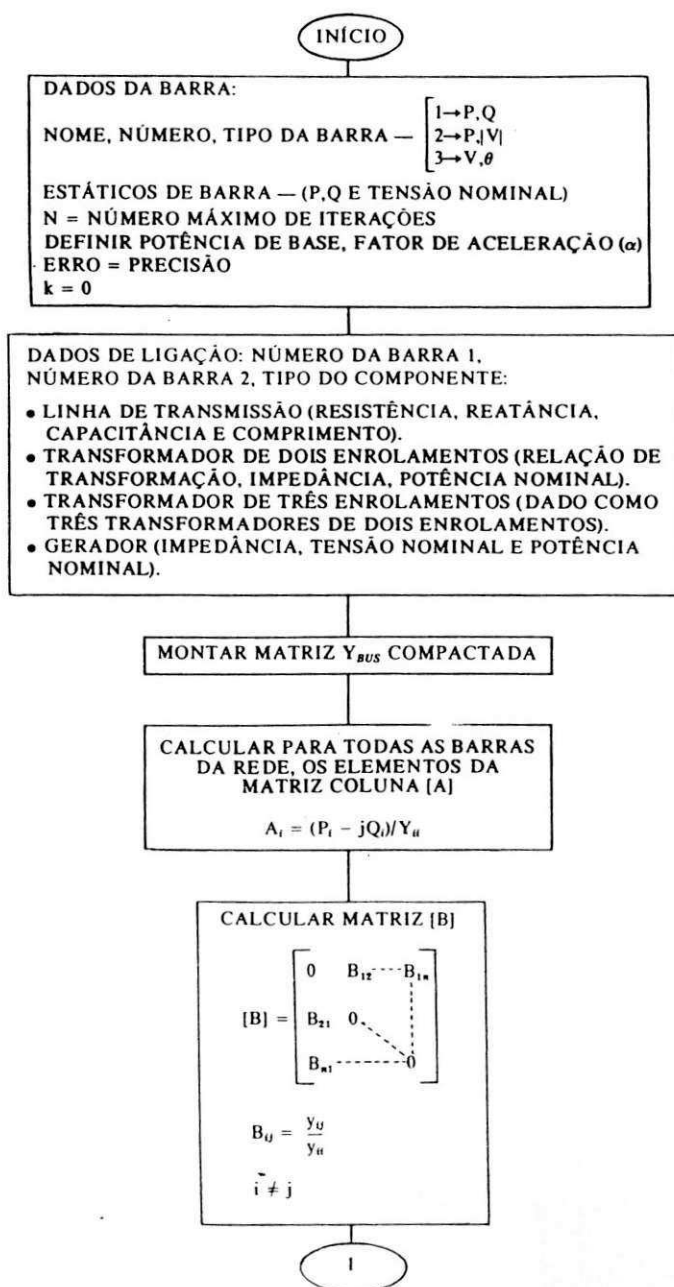


Figura 1.1 - Fluxograma do método de Gauss Seidel.

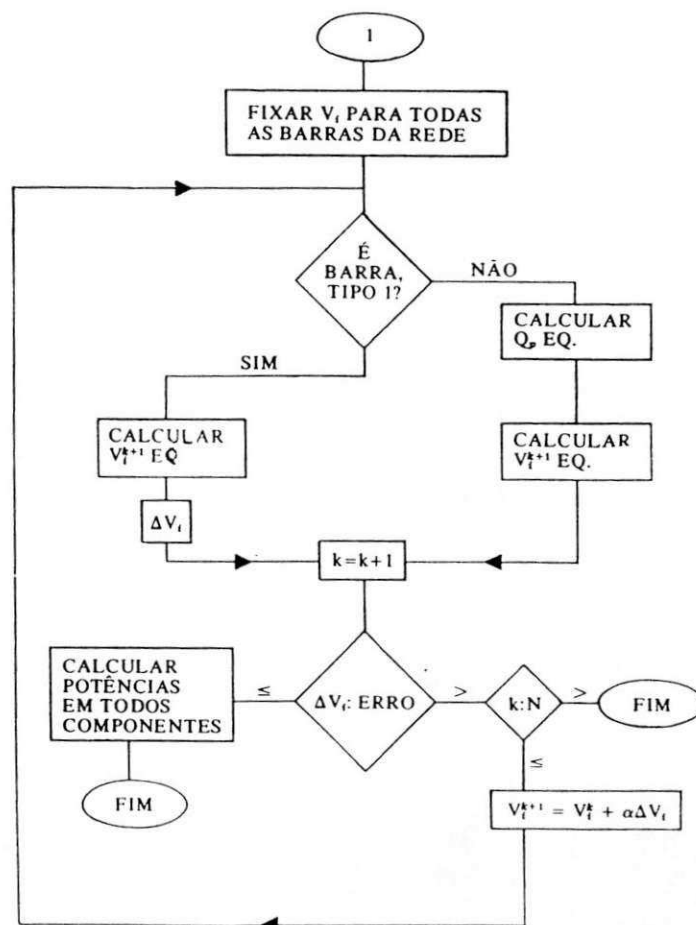


Figura 1. 1 - Continuação.

1.3. Fluxo de carga Newton - Raphson

Formula-se o fluxo de carga Newton - Raphson usando-se coordenadas polares.

A partir das equações (1.1) e (1.2) pode-se escrever

$$P_i + jQ_i = E_i \sum_{k=1}^n Y_{ik}^* \cdot E_i^* \quad (1.6)$$

Seja,

$$E_i = V_i \cdot e^{j\alpha_i} \quad E_k = V_k \cdot e^{j\alpha_k} \quad Y_{ik} = |Y_{ik}| \cdot e^{j\phi_{ik}} \quad (1.7)$$

Substituindo estas equações na equação (1.6) obtém-se a equação (1.8).

$$P_i + jQ_i = V_i e^{j\alpha_i} \sum_{k=1}^n V_k |Y_{ik}| e^{-j(\alpha_k + \phi_{ik})} \quad (1.8)$$

Separando-se a parte real da imaginária resulta as equações algébricas não lineares do fluxo de carga.

$$P_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k |Y_{ik}| \cos(\alpha_i - \alpha_k - \phi_{ik}) \quad (1.9)$$

$$Q_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k |Y_{ik}| \sin(\alpha_i - \alpha_k - \phi_{ik}) \quad (1.10)$$

Se

a) i for uma barra de referência, as equações (1.9) e (1.10) não serão necessárias já que não se tem incógnitas a serem determinadas.

b) i for uma barra de tensão controlada teremos que determinar o ângulo de tensão da barra i e usaremos a equação (1.9).

c) i for uma barra de carga, então, teremos que determinar o módulo de tensão e o ângulo de tensão da barra i através das equações (1.9) e (1.10).

A expressão iterativa para a solução do problema de fluxo de carga passará pela formação da matriz jacobiana. Neste trabalho estuda-se o método de Newton - Raphson segundo Van Ness [Ness, 1959].

A aplicação do método de Newton - Raphson de acordo com Van Ness é a seguinte:

$$\Delta P_i = [H]_i \cdot \Delta \alpha + [N]_i \cdot \Delta V / V \quad (1.11)$$

$$\text{e } \Delta Q_i = [J]_i \cdot \Delta \alpha + [L]_i \cdot \Delta V / V \quad (1.12)$$

Os elementos das submatrizes $[H]$, $[N]$, $[J]$ e $[L]$ são obtidos, derivando as equações (1.9) e (1.10) em relação a α_k , α_i , V_k , V_i conforme abaixo.

$$\begin{aligned} H_{ik} &= \partial P_i / \partial \alpha_k & H_{ii} &= \partial P_i / \partial \alpha_i \\ N_{ik} &= (\partial P_i / \partial V_k) \cdot V_k & N_{ii} &= (\partial P_i / \partial V_i) \cdot V_i \\ J_{ik} &= \partial Q_i / \partial \alpha_k & J_{ii} &= \partial Q_i / \partial \alpha_i \\ L_{ik} &= (\partial Q_i / \partial V_k) \cdot V_k & L_{ii} &= (\partial Q_i / \partial V_i) \cdot V_i \end{aligned}$$

As expressões finais para o cálculo dos elementos da matriz jacobiana são as seguintes:

$$\begin{aligned} H_{ik} &= V_i \cdot V_k \cdot |Y_{ik}| \cdot \sin(\alpha_i - \alpha_k - \phi_{ik}) \\ H_{ii} &= -Q_i - V_i^2 B_{ii} \\ N_{ik} &= V_i \cdot V_k \cdot |Y_{ik}| \cdot \cos(\alpha_i - \alpha_k - \phi_{ik}) \\ N_{ii} &= P_i + V_i^2 G_{ii} \\ J_{ik} &= -V_i \cdot V_k \cdot |Y_{ik}| \cdot \cos(\alpha_i - \alpha_k - \phi_{ik}) \\ J_{ii} &= P_i - V_i^2 G_{ii} \\ L_{ik} &= V_i \cdot V_k \cdot |Y_{ik}| \cdot \sin(\alpha_i - \alpha_k - \phi_{ik}) \\ L_{ii} &= Q_i - B_{ii} \cdot V_i^2 \end{aligned} \quad (1.13)$$

Aspectos computacionais do método de Newton - Raphson

O número de iterações para convergência é de 3 a 5 independente do tamanho do sistema. Os gastos com memória são proporcionais ao número de nós do sistema. Tem-se a necessidade de formar e inverter a matriz jacobiana a cada iteração. O método é sensível às condições iniciais porque sua convergência é baseada no uso de tangentes não constantes.

A seguir apresenta-se o fluxograma do método de Newton-Raphson [Ramos & Dias, 1982] e [Wood & Wollenberg, 1984].

DIAGRAMA DE BLOCOS — NEWTON RAPHSON
COORDENADAS POLARES

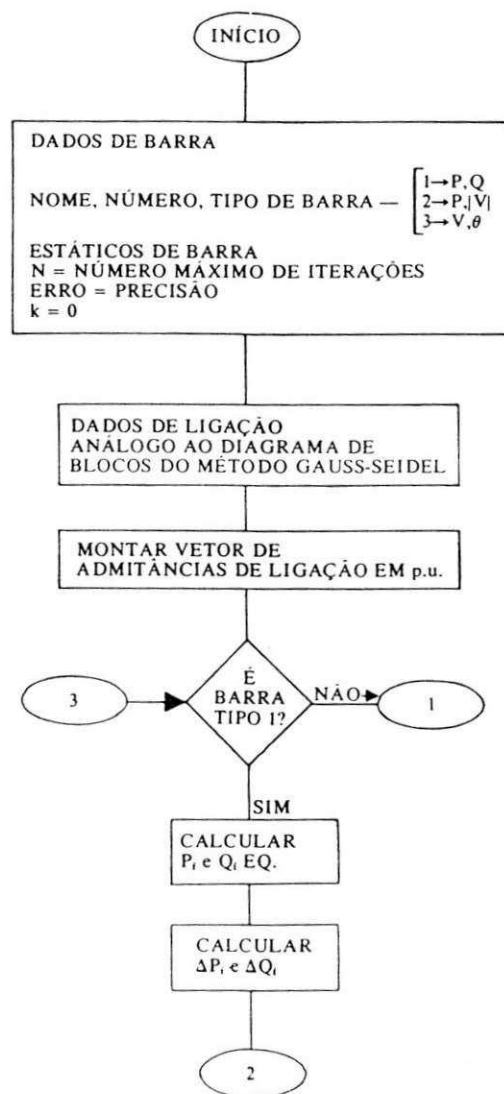


Figura 1.2 - Fluxograma do método de Newton Raphson.

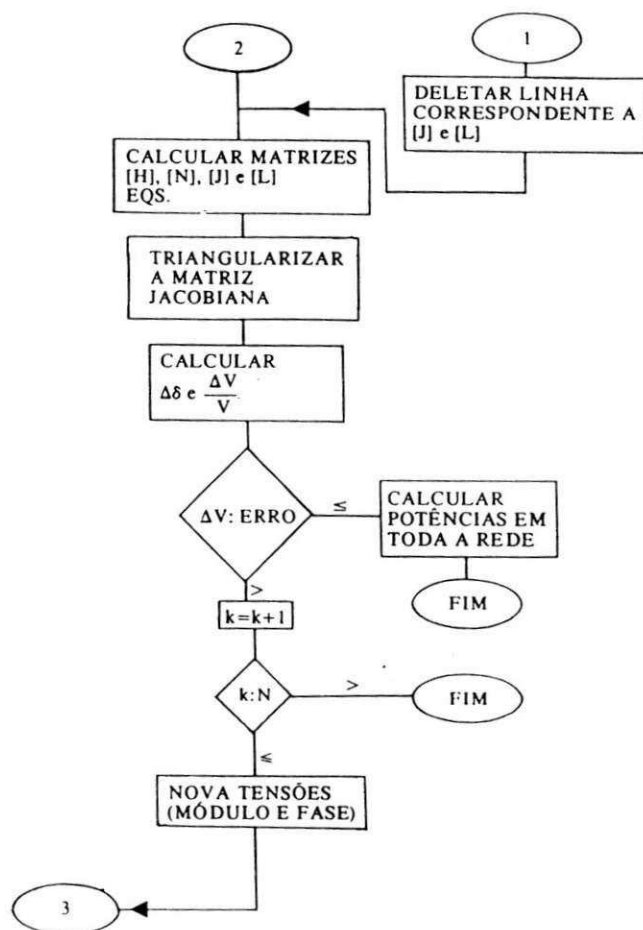


Figura 1. 2 - Continuação.

1.4. Fluxo de carga desacoplado rápido

O método desacoplado rápido, o qual passa-se a analisar com detalhes, deve-se a Stott e Alsac [Stott & Alçac, 1973], que publicaram um artigo em 1973.

O desenvolvimento analítico do mesmo é bastante simples, e é derivado do método de Newton-Raphson, onde ao invés da matriz jacobiana são usadas duas matrizes simétricas e constantes como instrumento de iteração.

Métodos numéricos são em sua maioria mais eficientes quando tiram vantagem das propriedades físicas do sistema a ser solucionado.

O método desacoplado rápido utiliza uma propriedade bastante conhecida dos sistemas elétricos, que é o fraco acoplamento existente entre os fluxos de potência ativa e reativa nos mesmos. Os fluxos de potência ativa são fortemente influenciados pelos ângulos de fase das tensões (e vice - versa) e praticamente independentes dos módulos das tensões (e vice - versa).

Por outro lado, os fluxos de potência reativa são fortemente dependentes dos módulos das tensões (e vice - versa) e apenas fracamente influenciados pelos ângulos de tensões (e vice - versa).

Aproveitando-se deste fato Carpentier sugeriu a seguinte aproximação para o fluxo de carga Newton - Raphson, desprezando as derivadas $\partial P / \partial V$ e $\partial Q / \partial \alpha$;

$$[\Delta P] = [\partial P / \partial \alpha].[\Delta \alpha]$$

$$[\Delta Q] = [\partial Q / \partial V].[\Delta V]$$

Stott e Alsac, partindo da formulação de Van Ness propuseram:

$$[\Delta P] = [H].[\Delta \alpha]$$

$$[\Delta Q] = [L].[\Delta V / V]$$

Substituindo-se $Y_{ik} = G_{ik} + j B_{ik}$ nas equações (1.13) resulta:

$$H_{ik} = L_{ik} = V_i \cdot V_k \cdot [G_{ik} \cdot \sin(\alpha_i - \alpha_k) - B_{ik} \cdot \cos(\alpha_i - \alpha_k)]$$

Lembrando expressões já deduzidas:

$$H_{ii} = -Q_i - B_{ii} \cdot V_i^2$$

$$L_{ii} = Q_i - B_{ii} \cdot V_i^2$$

Em geral, as seguintes hipóteses simplificadoras, são válidas para sistemas de potência:

a) $\cos(\alpha_i - \alpha_k) \approx 1$

b) $G_{ik} \cdot \sin(\alpha_i - \alpha_k) \approx 0$

c) Quando expressos em valores por unidade, os termos $V_i^2 \cdot B_{ii}$ são muito maiores, em valor absoluto, que os termos Q_i . Portanto, as equações das sub-matrizes [H] e [L] podem escritas como:

$$H_{ik} = L_{ik} = -V_i \cdot V_k \cdot B_{ik}$$

$$H_{ii} = L_{ii} = -V_i \cdot V_i \cdot B_{ii}$$

As equações desacopladas podem, portanto, ser escritas como:

$$[\Delta P] = [VB'V] \cdot [\Delta \alpha]$$

$$[\Delta Q] = [VB''V] \cdot [\Delta V / V]$$

Para melhorar a performance do método os autores sugerem:

a) Dividir o 1 membro das equações desacopladas acima por V;

b) Os termos [V] à direita de [B'] ainda representam um fator de acoplamento, pois eles influenciam os fluxos de potência ativa. Esta influência é removida considerando os termos como sendo fixos no valor 1.0 pu;

c) Omite-se de [B'] a representação de componentes do sistema que afetam predominantemente os fluxos reativos, tais como reatâncias shunt e taps em fase de transformadores controladores;

d) Omite-se de [B''] a representação de componentes do sistema que afetam os fluxos ativos, tais como taps em quadratura de transformadores defasadores;

e) Despreza-se as resistências das linhas no cálculo dos elementos de [B'].

Considerando o que foi exposto, as equações podem ser aproximadas por:

$$[\Delta P / V] = [B'] \cdot [\Delta \alpha]$$

$$[\Delta Q / V] = [B''] \cdot [\Delta V]$$

que são as equações do método desacoplado rápido.

Aspectos computacionais do fluxo de carga desacoplado rápido

A preferência pelo método desacoplado rápido deve-se às vantagens computacionais do mesmo sobre os demais métodos.

De acordo com as considerações feitas no desenvolvimento do método nota-se que tanto $[B']$ como $[B'']$ são matrizes reais, esparsas, simétricas e constantes, portanto, somente o triângulo superior dessas matrizes necessita ser fatorado uma vez no começo da solução do fluxo de carga.

A introdução das matrizes $[B']$ e $[B'']$ no lugar da matriz jacobiana do método de Newton-Raphson, altera o processo de convergência do fluxo de carga. Isto é, muda o caminho percorrido entre o ponto inicial e a solução, mas não altera a solução final, pois o problema resolvido permanece o mesmo ($\Delta P = 0$, $\Delta Q = 0$). O desacoplamento é introduzido apenas no algoritmo de resolução, sem afetar o modelo da rede [Monticelli, 1977].

A convergência do método se dá de 4 a 7 iterações independente do tamanho do sistema para 0.01 Mw/Mvar. Os gastos de memória são cerca de 40 por cento menores que no método de Newton-Raphson. Uma iteração do método desacoplado rápido corresponde aproximadamente a 1,5 iterações Gauss-Seidel e 0,2 iterações Newton-Raphson.

A convergência do método é bastante confiável e funciona bem com sistemas difíceis devido a sua não sensibilidade com a forma das funções envolvidas.

A programação do método é simples, sendo outro fator atrativo para o uso do mesmo.

O fluxograma do método é mostrado na figura 1.3.

DIAGRAMA DE BLOCOS - DESACOPLADO RÁPIDO

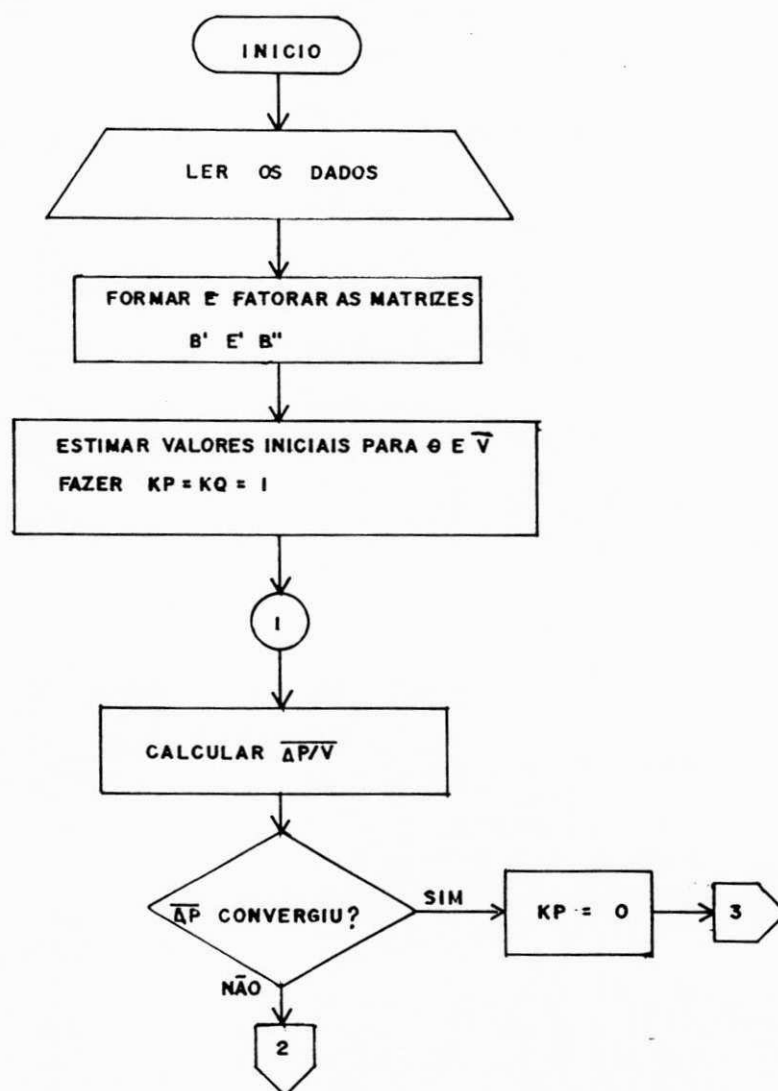


Figura 1.3 - Fluxograma do método desacoplado rápido.

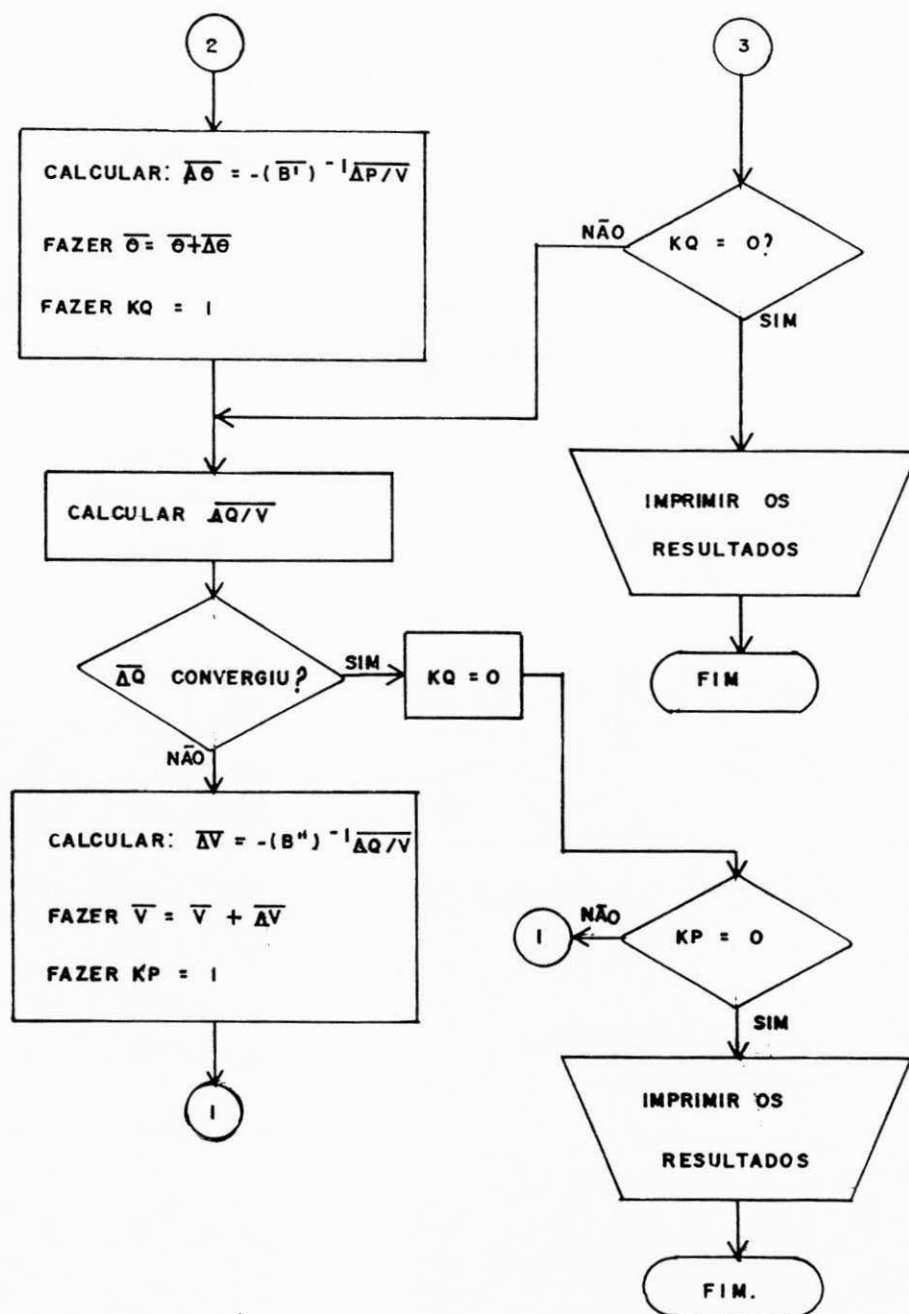


Figura 1.3 - Continuação.

1.5. Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os fundamentos teóricos dos métodos de Gauss-Seidel usando a matriz de admitância de barras, Newton-Raphson e desacoplado rápido. Apresentou-se os fluxogramas dos métodos citados e através dos mesmos, e das equações desenvolvidas neste capítulo, é possível fazer as implementações computacionais dos métodos citados.

CAPÍTULO 2

FLUXO DE CARGA BASEADO NO MÉTODO CLÁSSICO DOS MOMENTOS

Resumo

Um método para simular fluxo de carga em redes de distribuição radiais é apresentado neste capítulo. O fluxo de carga proposto é baseado nas equações do método clássico dos momentos, porém, leva em consideração a defasagem entre as tensões de barras, as perdas de potência ativa e reativa, o cálculo da corrente usando-se a tensão da mesma barra e o cálculo dos ângulos de tensões de barras. Resultados obtidos com o método proposto foram comparados com resultados obtidos através dos métodos de Gauss - Seidel, Newton - Raphson, desacoplado rápido e o próprio método original dos momentos. Os testes em dois sistemas de distribuição de companhias de distribuição do Nordeste são apresentados e mostram que o método proposto é uma alternativa para o planejamento de sistemas de distribuição radiais, em computadores pessoais do tipo PC .

2.1. Introdução

Existem muitos programas de fluxo de carga baseados em vários métodos numéricos, sendo os principais Gauss-Seidel (GS), Newton-Raphson (NR) e desacoplado rápido (FCDR). Estes métodos foram inicialmente desenvolvidos para simular sistemas de alta tensão. Os sistemas de distribuição possuem características

particulares que podem levar à formação de matrizes mal condicionadas causando problemas na convergência desses métodos.

Neste capítulo, apresenta-se um fluxo de carga próprio para sistemas de distribuição radiais. O mesmo é baseado no método clássico dos momentos, mas leva em consideração a defasagem entre as tensões das barras, as perdas de potência ativa e reativa, o cálculo da corrente usando-se a tensão da mesma barra, o cálculo do ângulo das tensões e a inclusão de modelagem para reguladores de tensão automáticos e autobusters.

Este capítulo é dividido em sete partes: Inicialmente apresenta-se o algoritmo básico do método clássico dos momentos (MCM); A seguir são feitas hipóteses e aproximações; Depois, descreve-se a modelagem dos componentes usados no fluxo de carga; Em seguida, apresenta-se a formulação matemática do problema; Resultados numéricos do fluxo de carga proposto são comparados com resultados dos fluxos de carga GS, NR, FCDR e com resultados do MCM; No item 2.6 apresenta-se uma formulação alternativa para o cálculo das tensões; E finalmente, são apresentadas as conclusões do capítulo.

2.2. Dedução do algoritmo básico do método original dos momentos

O método dos momentos é um método clássico, utilizado nas companhias de energia elétrica para calcular a queda de tensão em alimentadores radiais de distribuição.

O método dos momentos explora algumas características do sistema de distribuição, tais como: configuração radial; abertura angular pequena e efeito capacitivo desprezível. Com isto, o mesmo pode ser usado para determinar, de maneira aproximada, a queda de tensão em alimentadores de distribuição.

Seja uma linha de distribuição de comprimento l_k e impedância por fase e por unidade de comprimento $R_k + j X_k$. Esta linha interliga a barra i da subestação alimentadora à barra k da carga, que é representada pela corrente de módulo I_k , pela tensão fase-neutro de módulo V_k e pelo fator de potência indutivo $\cos\theta$. Supõe-se conhecido o módulo V_i da tensão da barra i conforme a figura 2.1.

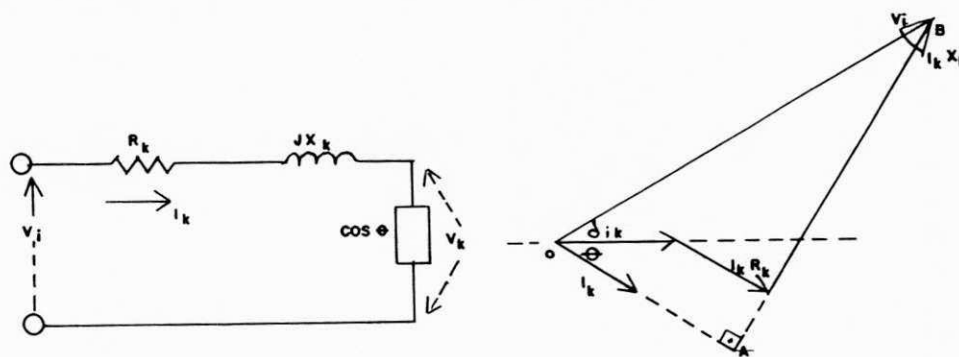


Figura 2.1-Equivalente monofásico e diagrama fasorial de um segmento de linha de distribuição.

Do diagrama fasorial tem-se:

$$V_i^2 = \overline{OA}^2 + \overline{AB}^2 \quad (2.1)$$

com

$$\overline{OA} = V_k \cdot \cos\theta + I_k \cdot R_k \quad \overline{AB} = V_k \cdot \sin\theta + I_k \cdot X_k$$

Substituindo-se em (2.1) vem:

$$V_i = (V_k \cdot \cos\theta + I_k \cdot R_k) + V_k \cdot \sin\theta + I_k \cdot X_k \quad (2.2)$$

A queda de tensão é dada por:

$$\Delta V = V_i - V_k$$

$$\Delta V = \sqrt{(V_k \cos(\theta + I_k R_k))^2 + (V_k \sin\theta + I_k X_k)^2} - V_k \quad (2.3)$$

A equação (2.3) é exata, mas pouco usada.

Costuma-se, em vez dessa equação, projetar V_i sobre V_k , medindo essa projeção como queda de tensão, como mostra a figura 2.2.

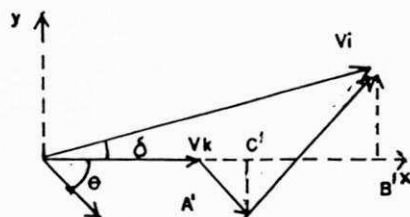


Figura 2.2 - Diagrama fasorial para cálculo de queda de tensão aproximada em uma linha de distribuição.

A queda de tensão AB' , vale:

$$AB' = AC' + CB' = I_k \cdot R_k \cdot \cos \theta + I_k \cdot X_k \cdot \sin \theta \quad (2.4)$$

$$\text{e} \quad \Delta V = V_i - V_k = I_k \cdot R_k \cdot \cos \theta + I_k \cdot X_k \cdot \sin \theta \quad (2.5)$$

que é a fórmula mais empregada para cálculos de queda de tensão.

No caso de um sistema radial com várias barras, calcula-se a queda de tensão em cada trecho de linha, começando por aquele (s) trecho (s) diretamente ligado (s) à barra i da subestação alimentadora. A carga da barra k é a soma das cargas de barras alimentadas à sua jusante. Calculada a queda de tensão ΔV e obtido o valor de $V_k = V_i - \Delta V$, procede-se de modo semelhante com as barras diretamente ligadas à barra k , e assim sucessivamente, até alcançar todas as barras do sistema.

2.3. Hipóteses e aproximações

Neste trabalho são mantidas as seguintes hipóteses que comumente se fazem em um cálculo convencional de fluxo de carga:

- a) As cargas ativas e reativas nos barramentos do sistema são supostas constantes, isto é: o problema é estático;
- b) Os elementos passivos do sistema são modelados com parâmetros concentrados;
- c) Admite-se que o sistema trifásico opera de maneira equilibrada, portanto, uma representação unifilar do sistema é suficiente.

2.4. Modelos

De acordo com as hipóteses acima, são utilizados os seguintes modelos, onde as unidades das grandezas estão denotadas.

Geradores

São modelados pelas potências complexas geradas.



$$S_i = P_i^G - j Q_i^G \quad \text{onde}$$

P_i^G é a potência ativa gerada na barra i em Kw.

Q_i^G é a potência reativa gerada na barra i em Kvar.

Figura 2.3 - Modelo de gerador.

Cargas

São modeladas pelas potências complexas consumidas (fixas).



$$S_i^C = P_i^C + j Q_i^C \quad \text{onde}$$

P_i^C é a potência ativa consumida na barra i em Kw.

Q_i^C é a potência reativa consumida na barra i em Kvar.

Figura 2.4 - Modelo de carga

Linhas de distribuição

São modeladas por sua impedância em série.

onde R_k é a resistência da linha em ohms/Km.

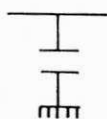
X_k é reatância da linha em ohms/Km.



Figura 2.5 - Modelo de linha de distribuição.

Capacitores

São modelados por suas reatâncias ligadas à referência.



onde

X_c é a reatância do capacitor em ohms.

Figura 2.6 - Modelo de capacitor.

Reguladores de tensão automáticos

São modelados por sua reatância indutiva em série com a reatância da linha. O efeito do controle do compensador de queda de tensão é incluído nas equações do método descritas adiante.

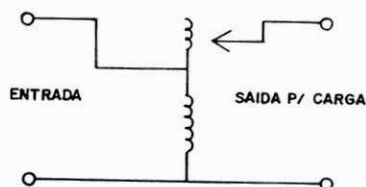


Figura 2.7 - Modelo de regulador automático de tensão

Supõe-se, neste trabalho, que a regulação do regulador automático é de + / - 10 % em degraus de 5 / 8 %.

Autoboosters

São modelados por sua reatância indutiva. O tap fixo do autobooster é incluído, também, nas equações do método descritas adiante.

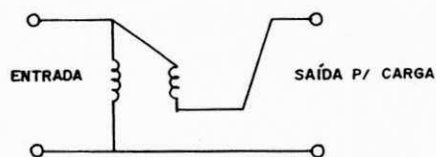


Figura 2.8 - Modelo de autobooster.

Supõe-se, neste trabalho, que a regulação pode ser feita em 4 degraus de 1,5 %, nas unidades de 6 % ou 4 degraus de 2,5 %, nas unidades de 10 %.

2.5. Formulação matemática do problema

Usando-se o diagrama fasorial da figura 2.1 e considerando-se a defasagem entre as duas tensões V_i e V_k , dadas pelo ângulo δ_{ik} , pode-se escrever a equação seguinte:

$$\Delta V = V_i \cdot \cos \delta_{ik} - V_k = (P_k \cdot R_k + Q_k \cdot X_k) / V_k \quad (2.1)$$

$$\text{com } I_k = S_k / V_k \quad (2.2)$$

$$\text{ou } \Delta V = S_k (R_k \cdot \cos \theta + X_k \cdot \sin \theta) / V_k \quad (2.3)$$

As perdas de potência ativa e reativa, podem ser consideradas como uma carga fictícia uniformemente distribuída ao longo da linha. As mesmas foram consideradas como uma carga fictícia distribuída no alimentador de forma triangular ou retangular [Westinghouse, 1965] e [Eletrobrás, 1982].

Perdas como uma carga fictícia com distribuição triangular

A figura 2.9 mostra um trecho da fase da linha i - k, no qual a potência das perdas como carga fictícia do alimentador é igual a W e a densidade dessas perdas consideradas como carga fictícia na área de influência do alimentador é igual a D, constante na área de influência do alimentador. A queda de tensão percentual é dada através da equação seguinte [Eletrobrás, 1982]:

$$\Delta V = G \cdot d \cdot (\text{potência da carga}) \%$$

onde G é o coeficiente unitário de queda de tensão, correspondente à queda de tensão percentual em um circuito com 1 Km de extensão, atendendo, no seu extremo, uma carga igual a 1 Mva.

A queda de tensão no elemento dx será:

$$dV = G. (Mva)_x. dx \quad (2.4)$$

onde $(Mva)_x$ é a demanda além do elemento dx .

$$(Mva)_x = D.Area = D (d.a - x^2 .tg\theta) \quad (2.5)$$

onde $tg\theta = a / d$

Substituindo-se (2.5) em (2.4), tem-se:

$$dV = G.D.(da - x^2 .tg\theta).dx$$

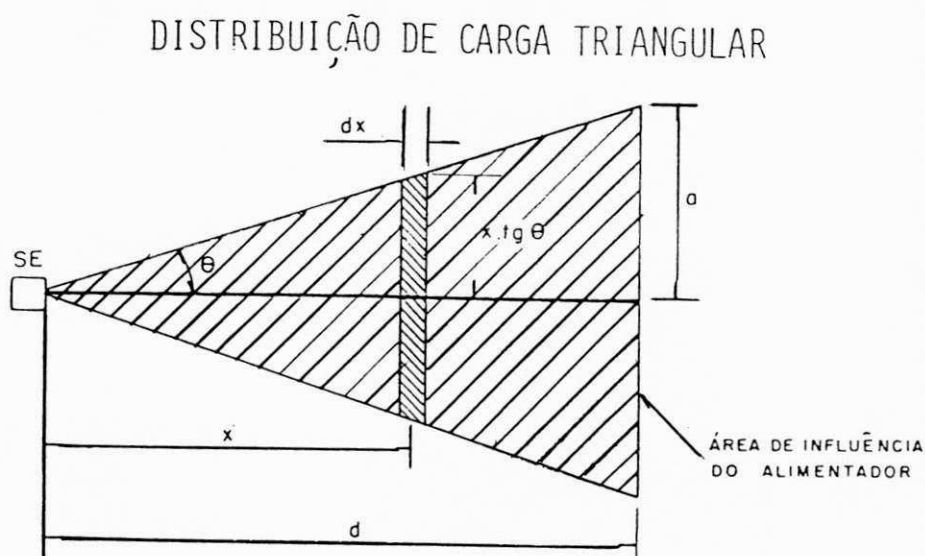


Figura 2.9 - Carga fictícia com distribuição triangular.

A queda de tensão total será então:

$$\Delta V = \int_0^d dV = \int_0^d GD (da - x^2 tg\theta) dx = 2.G.(Dda) d / 3 = 2.GWd / 3.$$

Então, para efeito de queda de tensão percentual no final do tronco de um alimentador que possua as perdas como distribuição de carga fictícia triangular, pode-se considerar as perdas concentradas a dois terços de seu comprimento, a partir da fonte.

Perdas como uma carga fictícia com distribuição retangular

Considere as mesmas variáveis definidas no caso anterior.

Assim, a queda de tensão no elemento dx será:

$$dV = G (Mva)_x dx \quad (2.6)$$

onde $(Mva)_x$ é a demanda além do elemento dx .

$$(Mva)_x = D (d - x) a \quad (2.7)$$

Substituindo-se (2.7) em (2.6), tem-se:

$$dV = GD (d - x) a dx$$

A queda de tensão total será então:

$$\Delta V = \int_0^d dV = \int_0^d GD (d - x) a dx = G (Dad) d / 2 = GWd / 2$$

Significando que, para as perdas consideradas como cargas fictícias distribuídas uniformemente ao longo do alimentador, o efeito produzido no final do tronco de alimentador, em termos de quedas de tensão, é tal como se as perdas estivessem concentradas em seu ponto intermediário.

DISTRIBUIÇÃO DE CARGA RETANGULAR

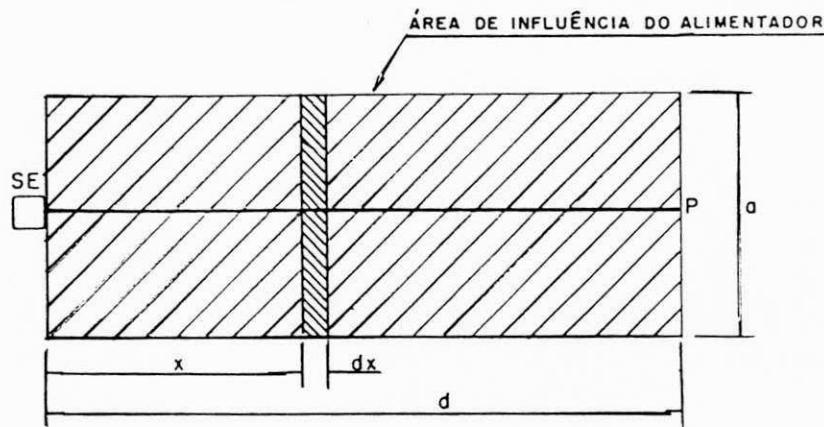


Figura 2.10 - Carga fictícia com distribuição retangular

O cálculo das perdas ativas e devido à circulação de reativos foi calculada de duas maneiras, gerando dois algoritmos diferentes:

1) A estimativa aproximada das perdas ativas e reativas é feita através das equações seguintes:

$$P_{ik}^p = R |I|^2 \quad \text{e} \quad P_{ik}^p = R.(S / V)^2$$

$$Q_{ik}^p = X |I|^2 \quad \text{e} \quad Q_{ik}^p = X.(S / V)^2$$

2) A potência das perdas ativas de uma única fase é:

$P_{ik}^p = P_{ik} + P_{ki}$ onde P_{ik} e P_{ki} são, respectivamente, os fluxos de potências ativa da barra i para a barra k e da barra k para a barra i.

Analogamente, as perdas de potência devido à circulação de reativos são dadas por:

$Q_{ik}^p = Q_{ik} + Q_{ki}$ onde Q_{ik} e Q_{ki} são, respectivamente, os fluxos de potências reativa da barra i para a barra k e da barra k para a barra i.

Para o cálculo dos ângulos de tensão das barras, parte-se novamente do diagrama fasorial da figura 2.1. Do mesmo pode-se escrever:

$$\delta_{ik} = \Delta\alpha = \alpha_i - \alpha_k$$

com $\alpha_k = \alpha_i - \delta_{ik}$

onde: α_i é o ângulo de tensão da barra i;

α_k é o ângulo de tensão da barra k;

δ_{ik} é o ângulo de diferença entre os ângulos de tensões de barras.

Ainda do diagrama fasorial da figura 2.1, pode-se escrever:

$$\text{sen}(\theta + \delta_{ik}) = (V_k \cdot \text{sen}\theta + I_k \cdot X_k) / V_i$$

onde θ é o ângulo da corrente de carga.

Assim,

$$\theta + \delta_{ik} = \arcsen[(V_k \cdot \text{sen}\theta + S_k \cdot X_k / V_k) / V_i]$$

logo $\alpha_k = \alpha_i - \{\arcsen[(V_k \cdot \text{sen}\theta + S_k \cdot X_k / V_k) / V_i] + \theta\}$ (2.8)

No caso de um sistema radial com várias barras, calcula-se a queda de tensão em cada

trecho da linha, começando por aquele(s) trecho(s) diretamente ligado(s) à barra i da subestação alimentadora. Usa-se a equação (2.1) para o referido cálculo. A carga da barra k é a soma das cargas de barras alimentadas à jusante dela. Calculada a queda de tensão ΔV_k , procede-se de modo semelhante com as barras diretamente ligadas à barra k , e assim sucessivamente, até alcançar todas as barras do sistema. Caso exista geração na barra, esta pode ser considerada como carga negativa.

Terminado o cálculo dos módulos de tensão, procede-se o cálculo dos ângulos de tensão usando-se a equação (2.8).

Um algoritmo para o método é detalhado a seguir:

ETAPA 1

Iniciação do processo iterativo.

$$V_k^{(0)} = 1.0 \text{ pu} \quad \alpha_k = 0 \quad P_{ik} = Q_{ik} = 0 \quad \delta_{ik} = 0 \quad \text{para,} \\ k = 2, 3, \dots, n$$

A barra número 1 é considerada como sendo a barra da subestação alimentadora, onde a tensão é suposta conhecida e o ângulo é considerado zero graus.

ETAPA 2

Cálculo das potências acumuladas.

$$P_k^{(x) \text{ acum}} = P_k^{(x-1)} + P_{ik}^{(x-1)} + \sum_{j \in n} [P_j^{(x-1)} + k \cdot P_{ikj}^{(x-1)}]$$

$$Q_k^{(x) \text{ acum}} = Q_k^{(x-1)} + Q_{ik}^{(x-1)} + \sum_{j \in n} [Q_j^{(x-1)} + k \cdot Q_{ikj}^{(x-1)}] \quad \text{onde } k = 1/2 \text{ ou } k = 2/3.$$

$P_k^{(x) \text{ acum}}$ e $Q_k^{(x) \text{ acum}}$ são as potências ativas e reativas acumuladas na barra k , na iteração x , e n é um conjunto que inclui todas as barras alimentadas à jusante da barra k .

ETAPA 3

Cálculo da potência aparente acumulada, cosseno e seno.

$$[S_k^{(x) \text{ acum}}]^2 = [P_k^{(x) \text{ acum}}]^2 + [Q_k^{(x) \text{ acum}}]^2$$

$$\cos\theta_k = P_k^{(x) \text{ acum}} / S_k^{(x) \text{ acum}}$$

$$\sin\theta_k = Q_k^{(x) \text{ acum}} / S_k^{(x) \text{ acum}}$$

ETAPA 4

Cálculo do módulo da tensão na barra k.

a) Se a barra é de referência, o módulo e o ângulo são especificados.

b) Se a barra é de carga sem regulador automático de tensão e sem autoboster.

$$V_k^{(x)} = V_i^{(x)} \cdot \cos\delta_{ik} - (P_k^{(x) \text{ acum}} R_k + Q_k^{(x) \text{ acum}} X_k^{(x-1)}) / V_k$$

c) Se a barra é de carga com regulador de tensão automático faz-se:

$$DVA1 = (P_k^{(x) \text{ acum}} R_k + Q_k^{(x) \text{ acum}} X_k^{(x-1)}) / V_k$$

$$DVA = \text{parte inteira arredondada} (DVA1 / 0.00625)$$

$$AUX = 0.00625 \cdot DVA$$

$$V_i = V_i + AUX$$

$$V_k = V_i \cdot \cos\delta_{ik} - DVA1$$

d) Se a barra é de carga com autoboster faz-se:

$$DVA = (P_k^{(x) \text{ acum}} R_k + Q_k^{(x) \text{ acum}} X_k^{(x-1)}) / V_k \cdot \text{Tap}$$

$$V_k = (V_i \cos\delta_{ik} / \text{Tap} - DVA)$$

ETAPA 5

Cálculo dos ângulos de tensão.

$$\theta_k^{(x)} = \arccos (P_k^{(x) \text{ acum}} / Q_k^{(x) \text{ acum}})$$

a) Se a barra é de carga sem regulador de tensão automático e sem autoboster:

$$\alpha_k = \alpha_i - \{ \arcsen [((V_k \cdot \sin \theta_k + S_k^{(x) \text{ acum}} X_k^{(x-1)}) / V_k) / V_i] + \theta_k \}$$

b) Se a barra é de carga com regulador de tensão automático, procede-se como no caso anterior.

c) Se a barra é de carga com autoboster:

$$\alpha_k = \alpha_i - \{ \arcsen [((V_k \cdot \sin \theta_k + S_k^{(x) \text{ acum}} X_k^{(x-1)}) / V_k \cdot \text{Tap}) / V_i] + \theta_k \}$$

ETAPA 6

Cálculo das perdas

$$P_{ik}^p = \sum \text{perdas ativas}$$

$$Q_{ik}^p = \sum \text{perdas reativas}$$

ETAPA 7

Verificação da convergência:

$$|V_k^{(x)} - V_k^{(x-1)}| \leq \varepsilon$$

$$|\alpha_k^{(x)} - \alpha_k^{(x-1)}| \leq \varepsilon \quad k=2,3, \dots, n$$

onde ε é a tolerância especificada.

ETAPA 8

Se o critério de convergência não for satisfeito e o número de iterações não tiver atingido o limite máximo fixado, o processo recomeça atualizando-se os valores de tensão e a ordem da iteração.

$$V_k^{(x-1)} = V_k^{(x)}$$

$$x = x + 1$$

$$k = 2, 3, \dots, n$$

De acordo com o cálculo das perdas são possíveis dois fluxogramas para o método:

1) Perdas determinadas através de $R \cdot |I|^2$ e $X \cdot |I|^2$.

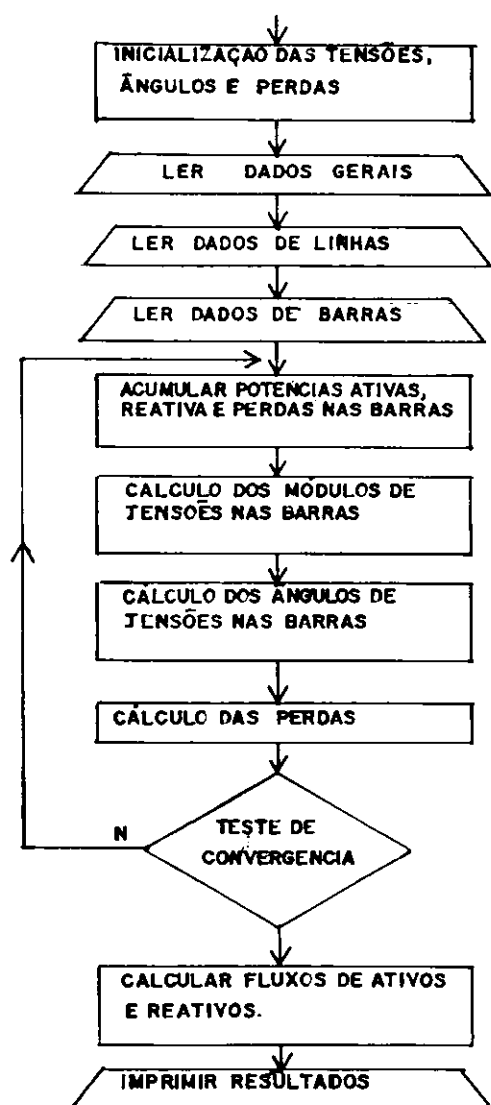


Figura 2.11 - Fluxograma do fluxo de carga baseado no método dos momentos com perdas determinadas através de $R \cdot |I|^2$ e $X \cdot |I|^2$.

2) Perdas determinadas pela soma dos fluxos de potências ativas e reativas.

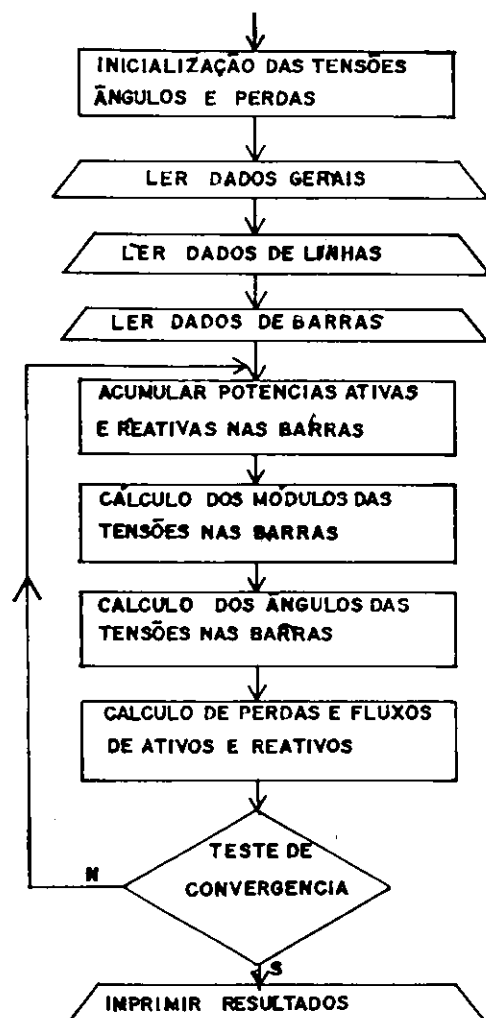


Figura 2.12 - Fluxograma do fluxo de carga baseado no método dos momentos com perdas calculadas pela soma de fluxos de potência.

2.6. Análise de resultados

Resultados de dois sistemas de companhias de distribuição do Nordeste são apresentados.

sistema 1 (S1) - sistema com seis barras e um cogerador.

sistema 2 (S2) - sistema com cinquenta e cinco barras, um auto-booster com tape fora do nominal e um banco de capacitores.

Os diagramas unifilares dos mesmos estão mostrados nas figuras 2.13 e 2.14. São comparados resultados obtidos com os métodos: Gauss-Seidel (GS), Newton - Raphson (NR), desacoplado rápido (FCDR); método dos momentos modificado (MMM) e método original dos momentos (MCM).

Para a implementação computacional dos métodos citados, foi usado um computador pessoal do tipo PC.

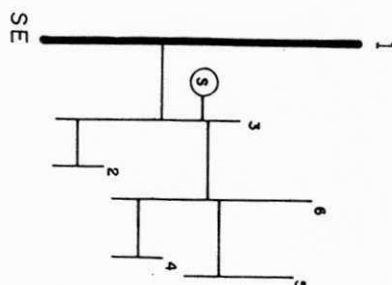


Figura 2.13 - Diagrama unifilar do sistema S1.

O programa, que utiliza o método de Newton - Raphson como instrumento de iteração, usado para as simulações computacionais foi o FLOWINT. Este programa é a versão do programa POWERMOD para microcomputadores do tipo PC. Os programas que utilizam os métodos de Gauss-Seidel, desacoplado rápido e método clássico dos momentos foram desenvolvidos pelo autor da Tese.

Para a simulação do sistema 1, a tolerância de convergência para os quatro métodos foi fixada em 10^{-5} pu. Deve-se ressaltar que os métodos de GS e MMM, usados neste trabalho, convergem por tensão. Enquanto o FCDR converge por resíduos absolutos de barra. O método de NR (flowint), pode convergir por tensão ou por resíduo absoluto de barra. A convergência do programa FLOWINT é feita com o critério que primeiro for atingido.

O número de iterações para convergência, como resultado da simulação de três programas, usando dados do sistema 1, está na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Número de iterações de GS, FCDR e MMM para sistema 1

Método	Número de iterações para convergência
GS	18
FCDR	5
MMM	4

O programa Flowint (NR) calcula a solução simplificada (fluxo de carga linear), quando é processado com os dados do sistema S1.

Na tabela 2.2 apresenta-se os resultados dos módulos de tensões do sistema 1. simulados com os métodos de GS, FCDR, MMM e MCM e os erros (%) entre os resultados do MMM e do MCM.

Tabela 2.2 - Resultados de módulos de tensões do S1 e erros de tensões

Número da barra	Módulo de tensão em pu				E %
	GS	MMM	FCDR	MCM	
1	1.100	1.100	1.100	1.100	0.1
2	1.077	1.077	1.077	1.078	0.1
3	1.083	1.083	1.083	1.082	0.1
4	1.055	1.055	1.055	1.056	0.1
5	1.056	1.055	1.056	1.056	0.1
6	1.067	1.066	1.067	1.067	0.1

Observa-se na tabela 2.2, que os resultados obtidos com os métodos de GS, FCDR e MMM são praticamente os mesmos, diferindo dos resultados de MCM na terceira casa decimal. Nas tabelas de resíduos de potência ativa e reativa, dadas no apêndice B, nota-se que os menores resíduos de potência ativa são calculados no FCDR. Enquanto que os maiores resíduos de potência ativa são os do MMM. Por outro lado, os menores resíduos de potência reativa são, também os do método FCDR e os maiores encontram-se no MMM.

Concluí-se, também da tabela 2.2, que os erros no cálculo do módulo de tensão através do MCM são desprezíveis para esse sistema. O S1 apresenta pequenas perdas de potência ativa e reativa nos ramos.

A tabela 2.3 mostra os resultados dos ângulos de tensões do S1.

Tabela 2.3 - Resultados de ângulos de tensões do S1

Número da barra	Ângulo de tensão em graus		
	GS	FCDR	MMM
1	0.00	0.00	0.00
2	-0.36	-0.36	-0.36
3	-0.28	-0.28	-0.28
4	-0.17	-0.17	-0.17
5	-0.15	-0.14	-0.14
6	-0.21	-0.21	-0.20

Novamente os resultados obtidos com os métodos de GS, FCDR e MMM são praticamente os mesmos.

A tabela 2.4 apresenta os fluxos de potências ativa e reativa para o sistema 1, em MW e MVAR, respectivamente.

Tabela 2.4 - Resultados de fluxos de potência do S1

Barra emissora / Barra receptora	Fluxos de potência ativa e reativa		
	MW	/ MVAR	
	GS	FCDR	MMM
1 - 3	0.785	0.785	0.784
	0.464	0.464	0.467
3 - 2	0.402	0.402	0.403
	0.101	0.101	0.102
3 - 6	0.856	0.856	0.863
	0.545	0.545	0.549
6 - 5	0.506	0.505	0.509
	0.336	0.336	0.338
6 - 4	0.337	0.337	0.339
	0.202	0.202	0.203

Os fluxos de potência obtidos no MMM diferem dos de GS e FCDR na terceira casa decimal.

Não obteve-se resultados do S2 quando se utilizou os métodos de NR (flowint) e FCDR. Com o método de GS o número de iterações para convergência foi de 1072 e com o MMM foi de 9. A tolerância fixada para a convergência nos métodos citados foi fixada em 10^{-5} pu.

A figura 2. 14, a seguir, apresenta o diagrama unifilar do sistema 2.

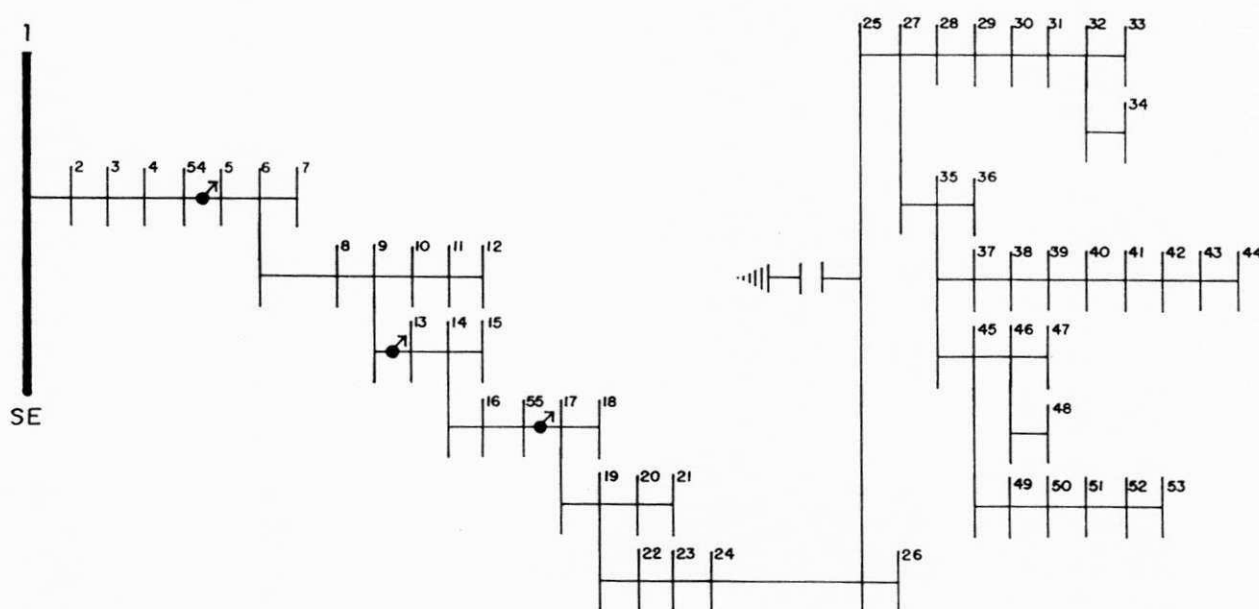


Figura 2.14.- Diagrama unifilar do sistema 2.

A tabela 2.5 mostra os resultados de módulos e ângulos de tensões obtidos com os métodos de GS, MMM e MCM, e os erros de tensão relativos entre os resultados do GS e MMM (Erro 1) e entre os resultados do MMM e MCM (Erro 2).

Tabela 2.5 - Resultados de módulos e ângulos de tensões do S2 e erros (%)

Número da barra	Erro 1 (%)	Módulo de tensões pu			Erro 2 (%)	Âng. de tensões gr	
		GS	MMM	MCM		GS	MMM
1	0.	1.000	1.000	1.000	0.0	0.00	0.00
2	0.	0.987	0.987	0.989	0.2	-0.22	-0.22
3	0.1	0.968	0.969	0.974	0.5	-0.55	-0.56
4	0.2	0.959	0.961	0.967	0.6	-0.71	-0.72
5	0.2	0.945	0.947	0.957	1.1	-1.16	-1.17
6	0.3	0.924	0.927	0.940	1.4	-1.58	-1.59
7	0.3	0.923	0.926	0.939	1.4	-1.56	-1.58
8	0.3	0.909	0.912	0.928	1.8	-1.92	-1.94
9	0.4	0.882	0.886	0.907	2.4	-2.53	-2.56
10	0.3	0.881	0.884	0.906	2.5	-2.55	-2.58
11	0.4	0.879	0.883	0.905	2.5	-2.56	-2.59
12	0.4	0.879	0.883	0.905	2.5	-2.57	-2.59
13	0.4	1.013	1.017	0.907	10.8	-2.81	-2.83
14	0.4	1.002	1.006	0.897	10.8	-3.06	-3.08
15	0.5	0.999	1.004	0.894	10.9	-3.04	-3.06
16	0.6	0.992	0.998	0.889	10.9	-3.28	-3.30
17	0.5	0.982	0.987	0.879	10.9	-3.79	-3.81
18	0.5	0.981	0.986	0.879	10.9	-3.78	-3.80
19	0.6	0.979	0.985	0.878	10.9	-3.85	-3.84
20	0.5	0.979	0.984	0.877	10.9	-3.84	-3.86
21	0.5	0.977	0.982	0.875	10.9	-3.83	-3.85
22	0.5	0.967	0.972	0.867	10.8	-4.21	-4.24
23	0.5	0.939	0.944	0.842	10.8	-5.03	-5.05
24	0.5	0.933	0.938	0.837	10.8	-5.21	-5.24
25	0.5	0.931	0.936	0.835	10.8	-5.28	-5.31
26	0.6	0.930	0.936	0.835	10.8	-5.28	-5.31
27	0.5	0.922	0.927	0.827	10.8	-5.37	-5.40
28	0.5	0.921	0.926	0.826	10.8	-5.36	-5.39
29	0.6	0.919	0.925	0.825	10.8	-5.35	-5.38
30	0.5	0.918	0.923	0.824	10.7	-5.34	-5.36
31	0.5	0.918	0.923	0.823	10.8	-5.33	-5.36
32	0.5	0.917	0.922	0.822	10.8	-5.32	-5.35
33	0.5	0.917	0.922	0.822	10.8	-5.32	-5.35
34	0.5	0.916	0.921	0.822	10.7	-5.32	-5.35
35	0.4	0.909	0.915	0.816	10.8	-5.51	-5.54
36	0.5	0.909	0.914	0.816	10.7	-5.51	-5.54
37	0.5	0.904	0.909	0.812	10.7	-5.46	-5.49
38	0.5	0.902	0.907	0.809	10.8	-5.44	-5.47
39	0.5	0.897	0.902	0.805	10.7	-5.39	-5.42
40	0.4	0.895	0.899	0.803	10.7	-5.37	-5.40

Continuação da tabela 2.5

Número da barra	Erro 1 (%)	Módulo de tensões		pu MCM	Erro 2 (%)	Ang. de tensões gr	
		GS	MM			GS	MMM
41	0.6	0.891	0.896	0.799	10.8	-5.33	-5.37
42	0.7	0.887	0.894	0.798	10.7	-5.31	-5.35
43	0.7	0.886	0.892	0.795	10.9	-5.29	-5.33
44	0.6	0.882	0.887	0.792	10.7	-5.25	-5.28
45	0.5	0.906	0.911	0.813	10.7	-5.55	-5.58
46	0.5	0.905	0.910	0.812	10.8	-5.54	-5.57
47	0.4	0.905	0.909	0.812	10.7	-5.54	-5.57
48	0.5	0.905	0.910	0.812	10.8	-5.54	-5.57
49	0.5	0.905	0.910	0.812	10.8	-5.55	-5.59
50	0.5	0.903	0.908	0.810	10.8	-5.58	-5.61
51	0.5	0.898	0.903	0.806	10.7	-5.63	-5.66
52	0.5	0.894	0.899	0.802	10.8	-5.63	-5.66
53	0.5	0.893	0.898	0.801	10.8	-5.63	-5.66
54	0.3	0.946	0.949	0.957	0.8	-0.94	-0.96
55	0.5	0.983	0.988	0.880	10.9	-3.52	-3.55

Da tabela 2.5 pode-se notar diferenças de resultados, entre os métodos de GS e MMM, na segunda casa decimal. Observando-se os resíduos de potência ativa e reativa dados no apêndice B, verifica-se que o método de GS apresenta resíduos menores que os obtidos com o MMM. A coluna de erros (Erro 2), entre os métodos MMM e MCM, mostra erros muito grandes nos módulos de tensões calculados através do método original dos momentos. Isto, porque o sistema S2 é mais carregado do que o sistema S1 e as perdas, juntamente com a modelagem do tape dos autoboostrers, não considerados no MCM, leva à grande diferença de resultados. Já a coluna de erros (Erro 1), entre os métodos de GS e MMM, nos módulos de tensões, apresenta erros relativos muito pequenos. Isto já era esperado, pois os resíduos de potência ativa e reativa apresentados no método MMM foram pequenos e compatíveis com os resíduos de potência apresentados no método de GS.

As perdas de potência ativa e devido à circulação de reativos, obtidos com GS, representam 1.5 % e 3.3 % das parcelas de geração ativa e reativa. No caso das perdas obtidas com o MMM, os percentuais são respectivamente, 1.5 % e 3.6 %.

Os resultados dos módulos e ângulos de tensões dos sistemas 1 e 2 foram obtidos com as perdas sendo consideradas como cargas fictícias com distribuição triangular e calculando-se as mesmas através das somas dos fluxos de potências ativa e reativa. Quando se utilizam as perdas determinadas por $R \cdot |I|^2$ e $X \cdot |I|^2$, os resultados são praticamente os mesmos. Porém, o cálculo das perdas como distribuição retangular de cargas fictícias, apresenta resultados com resíduos de potências ativas e reativas maiores do que calculando-se as perdas como distribuição triangular de cargas fictícias.

O sistema 2 também foi simulado retirando-se o autobooster entre as barras 9 e 13. O mesmo foi substituído por um regulador de tensão automático de tape. Os resultados obtidos com o fluxo de carga MMM estão listados na tabela 2.6.

A tolerância para convergência foi especificada em 10^{-5} pu e o método convergiu em 9 iterações.

O tape do regulador de tensão automático ficou posicionado no segundo degrau, para compensar a queda de tensão na linha 9 - 13, com $R = 0.4203$ pu e $X = 0.5490$ pu.

Tabela 2.6 - Resultados de módulos e ângulos de tensões - simulação MMM

Número da barra	Módulo de tensões pu	Ângulo de tensões em graus
1	1.000	0.00
2	0.986	-0.19
3	0.967	-0.47
4	0.958	-0.60
5	0.943	-1.02
6	0.921	-1.38
7	0.919	-1.36

Continuação da tabela 2.6

Número da barra	Módulo de tensões pu	Ângulo de tensões em graus
8	0.900	-1.67
9	0.889	-2.19
10	0.874	-2.21
11	0.873	-2.22
12	0.873	-2.23
13	0.875	-2.80
14	0.861	-3.08
15	0.858	-3.05
16	0.849	-3.32
17	0.835	-3.98
18	0.834	-3.96
19	0.832	-4.04
20	0.831	-4.03
21	0.829	-4.01
22	0.815	-4.46
23	0.778	-5.41
24	0.769	-5.63
25	0.767	-5.72
26	0.767	-5.72
28	0.755	-5.85
29	0.753	-5.81
30	0.751	-5.79
31	0.751	-5.79
32	0.749	-5.78
33	0.749	-5.77
34	0.749	-5.77
35	0.740	-6.06
36	0.740	-6.06
37	0.734	-5.98
38	0.731	-5.95
39	0.725	-5.88
40	0.722	-5.85
41	0.717	-5.79
42	0.715	-5.76
43	0.712	-5.73
44	0.706	-5.66
45	0.736	-6.12
46	0.735	-6.11
47	0.734	-6.10
48	0.735	-6.11
49	0.735	-6.13
50	0.732	-6.16

Continuação da tabela 2.6

51	0.726	-6.25
52	0.722	-6.25
53	0.720	-6.25
54	0.945	-0.81
55	0.837	-3.60

Com a finalidade de demonstrar que o método MMM pode convergir, também, onde o método de GS diverge, o sistema 1 foi simulado colocando-se uma impedância negativa entre as barras 5 e 6. Neste caso, como já era esperado, o método de GS não convergiu. A tabela 2.7 mostra os resultados obtidos.

Tabela 2.7 Resultados de módulos e ângulos de tensões, FCDR e MMM

Número da barra	Módulos de tensões em pu		Ângulos de tensões em graus	
	FCDR	MMM	FCDR	MMM
1	1.000	1.000	0.00	0.00
2	1.077	1.077	-0.36	-0.36
3	1.083	1.083	-0.27	-0.27
4	1.056	1.056	-0.17	-0.17
5	1.078	1.078	-0.26	-0.26
6	1.067	1.067	-0.20	-0.20

2.7. Formulação alternativa

O método dos momentos também foi experimentado usando outra formulação de equação para o cálculo do módulo de tensão.

A partir do diagrama fasorial da figura 2.1 têm-se:

$$V_i^2 = (V_k \cdot \sin\theta + I_k \cdot X_k)^2 + (V_k \cdot \cos\theta + I_k \cdot X_k)^2$$

Desenvolvendo-se a equação acima tem-se:

$$V_k^2 - V_k \cdot (2.I_k \cdot X_k \cdot \sin\theta + 2.I_k \cdot R_k \cdot \cos\theta)^2 + (I_k \cdot X_k)^2 + (I_k \cdot R_k)^2 - V_i = 0$$

Fazendo-se $B = 2.I_k \cdot X_k \cdot \sin\theta + 2.I_k \cdot R_k \cdot \cos\theta$

$$e \quad C = I_k^2 \cdot X_k^2 + I_k^2 \cdot R_k^2 - V_i^2$$

a) Se a barra é de carga sem regulador automático e sem autoboster

$$V_k = (-B + \text{termo}) / 2$$

$$\text{onde termo} = \sqrt{B^2 - 4C}$$

b) Se a barra é de carga com autoboster

$$V_k = (-B + \text{termo}) / 2.Tap$$

c) Se a barra é de carga com regulador automático

$$V_k = (-B + \text{termo}) / 2$$

$$\Delta V = V_i \cdot \cos\delta - V_k$$

$$DVA = \text{parte inteira arredondada de } (\Delta V / 0.00625)$$

$$AUX = 0.00625 \cdot DVA$$

$$V_i = V_i + AUX$$

$$V_k = V_i \cdot \cos\delta - \Delta V$$

Os resultados obtidos calculando-se as perdas como distribuição triangular de cargas fictícias, com as novas equações, são os mesmos que os obtidos anteriormente e portanto, não foram listados novamente. Os resultados obtidos comprovam a formulação alternativa proposta.

2.8. Conclusão

Neste capítulo apresentou-se a formulação do fluxo de carga baseado no método dos momentos. Foram detalhados as hipóteses, modelos, equacionamento e algoritmos para o mesmo.

A validade dos resultados do fluxo de carga MMM foi comprovada pela comparação de resultados obtidos através dos métodos de GS, NR e FCDD. Através das tabelas apresentadas pode-se verificar que todos os resultados determinados através do MMM são compatíveis com os resultados dos outros métodos.

Além disso, o MMM pode convergir em sistemas onde os métodos de GS, NR e FCDD divergem como já foi demonstrado.

O MCM apresenta erros muito grandes em relação a resultados do MMM, para sistemas com perdas relativamente altas e consideração dos taps de autoboosters.

O MMM apresenta erros pequenos em relação a resultados do método de GS.

A modelagem para regulador de tensão, introduzida nas equações do MMM, permite simular e conhecer a operação desse equipamento, bastante usado em sistemas de distribuição radiais.

De acordo com tudo o que foi exposto neste capítulo, conclui-se finalmente, que o fluxo de carga proposto é um método alternativo para ser usado na simulação de sistemas de distribuição radiais, tendo como objetivo o planejamento desses sistemas.

CAPÍTULO 3

FLUXO DE CARGA TRIFÁSICO BASEADO NO MÉTODO DOS MOMENTOS

Resumo

Este capítulo descreve um fluxo de carga trifásico desenvolvido para a análise de sistemas de distribuição radiais sob condições equilibradas e desequilibradas. O método de solução é derivado da versão do fluxo de carga monofásico baseado no método dos momentos desenvolvido no capítulo anterior. O método permite o uso de vetores para indexar todas as variáveis, fazendo com isso uma apreciável economia de memória, sem precisar usar técnicas de esparsidade. A modelagem implementada permite a simulação, entre outros equipamentos, de bancos de reguladores de tensão automáticos e auto-boosters. Resultados de dois sistemas, obtidos com dados reais, são apresentados, comprovando uma boa performance para o fluxo de carga proposto.

3.1. Introdução

O desenvolvimento de técnicas computacionais para a simulação de sistemas de potência têm, em sua maioria, sido direcionadas especificamente para os sistemas de geração - transmissão. Isto é um fato natural, já que, é neste setor onde estão envolvidas grandes somas de recursos financeiros e onde se faz a transmissão de grandes blocos de potência.

Ao mesmo tempo, o sistema de distribuição reveste-se de grande importância por ser a parte do sistema de potência que alimenta diretamente os consumidores de média e

baixa tensão. Esta parte do sistema de potência apresenta características particulares, como por exemplo: cargas desequilibradas; relações R / X altas; equipamentos como os reguladores de tensão automáticos; configuração radial etc.

Neste capítulo apresenta-se a versão trifásica do fluxo de carga baseado no método dos momentos. Como no capítulo anterior, inicialmente faz-se hipóteses, mostra-se os modelos usados e faz-se o equacionamento matemático do método. Resultados obtidos com dois sistemas de distribuição são analisados e conclusões finais são formalizadas.

3.2. Hipóteses e modelos

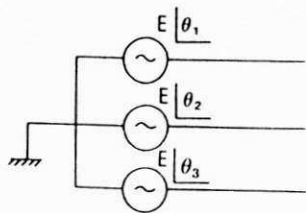
São feitas as seguintes hipóteses:

- a) As cargas ativas e reativas nos barramentos do sistema são supostas constantes, isto é, o problema é estático;
- b) Os elementos passivos do sistema são representados com parâmetros concentrados;
- c) São desprezadas as impedâncias mútuas.

De acordo com as hipóteses acima, são utilizadas os seguintes modelos:

Geradores trifásicos

São modelados pelas potências complexas geradas especificadas.



$$S_i^G = P_i^G + j Q_i^G \quad \text{onde}$$

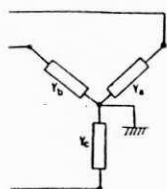
P_i^G e Q_i^G são as potências ativas e reativas geradas na barra i em Kw e Kvar.

$$\begin{aligned} \theta_2 &= \theta_1 - 120 \\ \theta_3 &= \theta_2 + 120 \end{aligned}$$

Figura 3.1 - Modelo de gerador trifásico

Cargas trifásicas

São modeladas por potência constante. Esta é a forma tradicional de modelagem empregada na análise de fluxo de carga. Neste caso, as cargas são admitidas ligadas em estrela com o neutro solidamente aterrado.



$$S_i^C = P_i^C + j Q_i^C \quad \text{onde}$$

P_i^C e Q_i^C são as potências ativas e reativas consumidas na fase da barra i em Kw e Kvar.

Figura 3.2 - Modelo de carga trifásica.

Linhas de distribuição trifásicas

São modeladas por sua impedância em série.

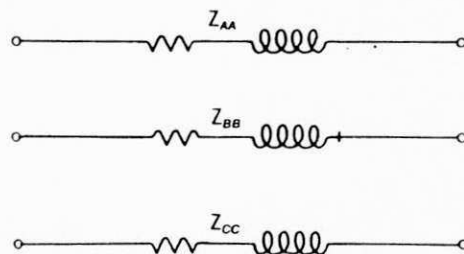


Figura 3.3 - Modelo de linha de distribuição trifásica

Capacitores trifásicos

A modelagem de elementos em derivação nas barras, é formalmente a mesma representação de uma carga de potência constante, como mostrado na figura 3.4.

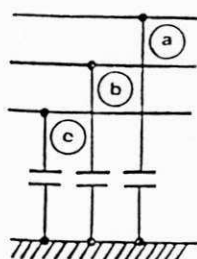


Figura 3.4 - Modelo de capacitor trifásico.

Reguladores de tensão automáticos trifásicos

São modelados por sua reatância indutiva e usados reguladores de tensão monofásicos para formar bancos de reguladores .

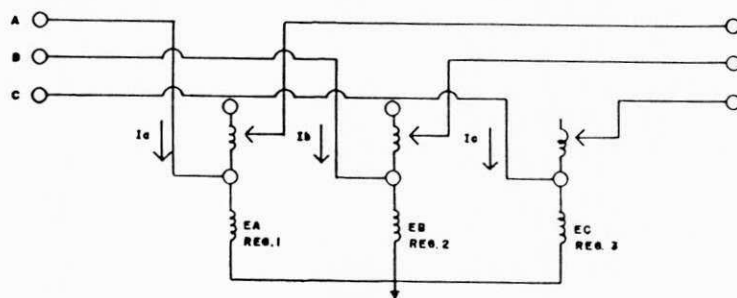


Figura 3.5 - Banco de reguladores ligados em estrela

O regulador automático é basicamente um autotransformador em que o enrolamento série tem vários tapes, que podem ser comutados em carga. Possui uma chave reversora de polaridade que permite adicionar ou subtrair a tensão do enrolamento série. Sua regulação é de $\pm 10\%$ em 32 degraus de $5/8\%$, ou de $\pm 5\%$ em 16 degraus.

Os reguladores automáticos são normalmente aplicados em subestações ou linhas de distribuição longas, principalmente rurais, para corrigir a queda de tensão excessiva e melhorar a regulação.

Além do controle do nível de tensão, o regulador automático permite ajustes de largura de faixa, tempo de retardo e faixa de regulação. Inclui também um dispositivo de extrema utilidade: o compensador de queda de tensão, que é modelado nas equações do método aqui proposto.

Autoboosters trifásicos

São modelados por sua reatância indutiva, e usados autoboostrers monofásicos para formar bancos de reguladores.

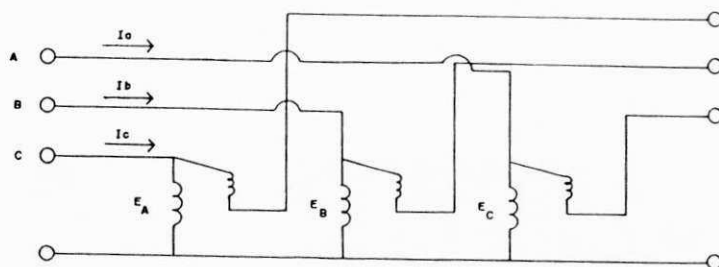


Figura 3.6 Banco de autoboostrers ligados em estrela.

O autoboostrer é um transformador de distribuição ligado como autotransformador, com o enrolamento secundário em série com a linha. Conforme a ligação seja com polaridade aditiva ou subtrativa, o autoboostrer aumenta ou diminui a tensão. A regulação pode ser feita em quatro degraus de 1,5 %, nas unidades de 6 % ou de 2,5 %, nas unidades de 10 %.

O autoboostrer apenas controla o nível de tensão e funciona só como elevador ou só como abaixador de tensão. Devido a estas restrições sua aplicação é limitada a alimentadores com baixa densidade de carga ou com regulação de retaguarda. Seu custo é apenas cerca de 60 % do custo do regulador automático.

3.3. Formulação matemática do problema

Seja uma linha de distribuição de comprimento l_k e impedância por fase e por unidade de comprimento $R_k + j X_k$. Esta linha interliga as barras i da subestação alimentadora às barras k da carga, que é representada pelas correntes I_{1k} , I_{2k} e I_{3k} , pelas tensões fase-neutro de módulos V_{1k} , V_{2k} e V_{3k} e pelos fatores de potência indutivos $\cos\theta_1$, $\cos\theta_2$ e $\cos\theta_3$. Supõe-se conhecidos os módulos das tensões V_{1i} , V_{2i} e V_{3i} das barras i , como também os ângulos de tensões das barras i α_{1i} , α_{2i} e α_{3i} .

Na figura 3.7 representa-se o equivalente estrela e o diagrama fasorial da linha de distribuição trifásica.

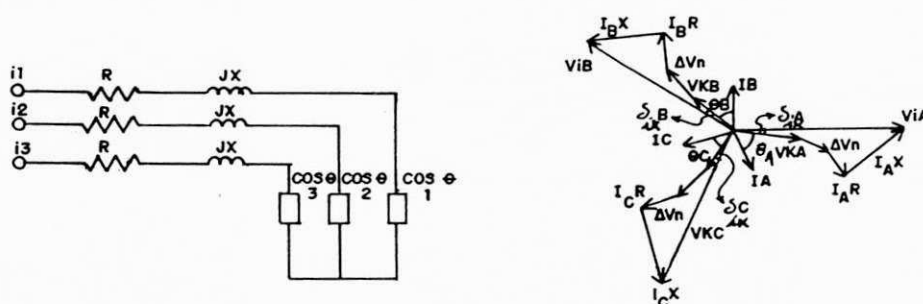


Figura 3.7- Equivalente estrela e diagrama fasorial da linha de distribuição trifásica.

Do diagrama fasorial e de acordo com a equação (3.1) pode-se escrever as seguintes equações para o cálculo das tensões trifásicas:

$$\Delta V_1 = V_{1i} \cos \delta_1 - V_{1k} = (P_{1k} R + Q_{1k} X) / V_{1k} + |\Delta V_n| \cos \varphi \quad (3.1)$$

$$\Delta V_2 = V_{2i} \cos \delta_2 - V_{2k} = (P_{2k} R + Q_{2k} X) / V_{2k} + |\Delta V_n| \cos \varphi \quad (3.2)$$

$$\Delta V_3 = V_{3i} \cos \delta_3 - V_{3k} = (P_{3k} R + Q_{3k} X) / V_{3k} + |\Delta V_n| \cos \varphi \quad (3.3)$$

onde $|\Delta V_n|$ é o módulo da tensão de deslocamento de neutro e φ é o ângulo dessa mesma tensão.

A equação clássica para a determinação da tensão de deslocamento de neutro está mostrada a seguir.

$$\Delta V_n = [(V_{1ni} / Z_1) + (V_{2ni} / Z_2) + (V_{3ni} / Z_3)] / [(1 / Z_1) + (1 / Z_2) + (1 / Z_3)] \quad (3.4)$$

onde:

$$Z_1 = |V_{1k}|^2 (\cos \theta_1 + j \sin \theta_1) / S_1$$

$$Z_2 = |V_{2k}|^2 (\cos \theta_2 + j \sin \theta_2) / S_2$$

$$Z_3 = |V_{3k}|^2 (\cos \theta_3 + j \sin \theta_3) / S_3$$

sendo

Z_1, Z_2, Z_3 as impedâncias das cargas nas fases 1, 2 e 3.

S_1, S_2, S_3 os módulos das potências aparentes das cargas nas fases 1, 2 e 3.

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ os ângulos dos fatores de potência das cargas nas fases 1, 2 e 3.

$V_{1ni}, V_{2ni}, V_{3ni}$ as tensões fase neutro das barras i.

Separando-se as partes reais e imaginárias da equação (3.4) e fazendo-se:

$$V_{1ni} = |V_{1ni}| \angle \beta_{1n}$$

$$V_{2ni} = |V_{2ni}| \angle \beta_{2n}$$

$$V_{3ni} = |V_{3ni}| \angle \beta_{3n}$$

vem:

$$\begin{aligned} \text{Aux1} = & (S_1 \cdot |V_{1n}| \cdot \cos(\beta_{1n} - \theta_1)) / |V_{1k}|^2 + (S_2 \cdot |V_{2n}| \cdot \cos(\beta_{2n} - \theta_2)) / |V_{2k}|^2 + \\ & + (S_3 \cdot |V_{3n}| \cdot \cos(\beta_{3n} - \theta_3)) / |V_{3k}|^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aux2} = & (S_1 \cdot |V_{1n}| \cdot \sin(\beta_{1n} - \theta_1)) / |V_{1k}|^2 + (S_2 \cdot |V_{2n}| \cdot \sin(\beta_{2n} - \theta_2)) / |V_{2k}|^2 + \\ & + (S_3 \cdot |V_{3n}| \cdot \sin(\beta_{3n} - \theta_3)) / |V_{3k}|^2 \end{aligned}$$

$$\text{Aux3} = (S_1 \cdot \cos(-\theta_1)) / |V_{1k}|^2 + (S_2 \cdot \cos(-\theta_2)) / |V_{2k}|^2 + (S_3 \cdot \cos(-\theta_3)) / |V_{3k}|^2$$

$$\text{Aux4} = (S_1 \cdot \sin(-\theta_1)) / |V_{1k}|^2 + (S_2 \cdot \sin(-\theta_2)) / |V_{2k}|^2 + (S_3 \cdot \sin(-\theta_3)) / |V_{3k}|^2$$

$$|\Delta V_n| = \sqrt{[(\text{Aux1})^2 + (\text{Aux2})^2] / [(\text{Aux3})^2 + (\text{Aux4})^2]} \quad (3.5)$$

$$\varphi = \arctg(\text{Aux2} / \text{Aux1}) - \arctg(\text{Aux4} / \text{Aux3}) \quad (3.6)$$

Para cargas trifásicas com neutro, bifásicas e monofásicas a queda de tensão de neutro é determinada como a seguir:

Seja I_n a corrente no neutro:

$$I_n = (S_1 / V_{1k})^* + (S_2 / V_{2k})^* + (S_3 / V_{3k})^*$$

Separando as partes reais e imaginárias e fazendo:

$$\text{Aux5} = [(\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}) / |V_{1k}|] \cdot \cos[\arctg(-Q_1 / P_1) + \alpha_1]$$

$$\text{Aux6} = [(\sqrt{P_2^2 + Q_2^2}) / |V_{2k}|] \cdot \cos[\arctg(-Q_2 / P_2) + \alpha_2]$$

$$\text{Aux7} = [(\sqrt{(P_3)^2 + (Q_3)^2}) / | V_{3k} |].\cos[\arctg (-Q_3 / P_3) + \alpha_3]$$

$$\text{Aux8} = [(\sqrt{(P_1)^2 + (Q_1)^2}) / | V_{1k} |].\text{sen}[\arctg (-Q_1 / P_1) + \alpha_1]$$

$$\text{Aux9} = [(\sqrt{(P_2)^2 + (Q_2)^2}) / | V_{2k} |].\text{sen}[\arctg (-Q_2 / P_2) + \alpha_2]$$

$$\text{Aux10} = [(\sqrt{(P_3)^2 + (Q_3)^2}) / | V_{3k} |].\text{sen}[\arctg (-Q_3 / P_3) + \alpha_3]$$

$$| I_n | = \sqrt{(\text{Aux5} + \text{Aux6} + \text{Aux7})^2 + (\text{Aux8} + \text{Aux9} + \text{Aux10})^2} \quad (3.7)$$

$$\varphi = \arctg [(\text{Aux8} + \text{Aux9} + \text{Aux10}) / (\text{Aux5} + \text{Aux6} + \text{Aux7})] + \arctg(X_n/R_n) \quad (3.8)$$

onde

P_1, P_2, P_3 são as potências ativas da carga nas fases 1, 2 e 3.

Q_1, Q_2, Q_3 são as potências reativas da carga nas fases 1, 2 e 3.

$| V_{1k} |, | V_{2k} |, | V_{3k} |$ são os módulos de tensões nas cargas das fases 1, 2 e 3.

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ são os ângulos de tensões nas cargas das fases 1, 2 e 3.

vem:

$$| \Delta V_n | = | I_n | . \sqrt{(R_n)^2 + (X_n)^2} \quad (3.9)$$

onde

R_n, X_n são, respectivamente a resistência e a reatância do fio neutro em ohms.

Para o cálculo dos ângulos de tensões $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ usa-se novamente o diagrama da figura 3.7, a seguir representado, ampliado em parte na figura 3.9.

Também é necessário relembrar a teoria de triângulos através de dois teoremas citados a seguir.

Teorema 1 - Dois triângulos de lados respectivamente paralelos ou perpendiculares são semelhantes. Veja figura 3.8.

Teorema 2 - Dois triângulos que possuem seus ângulos respectivamente congruentes são semelhantes.

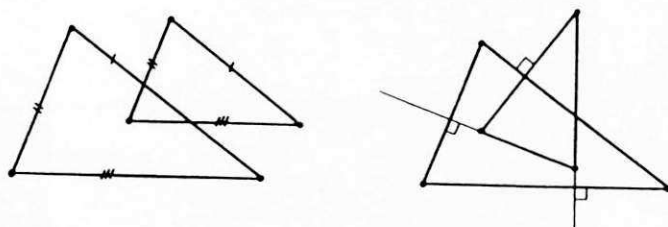


Figura 3.8 - Triângulos perpendiculares semelhantes.

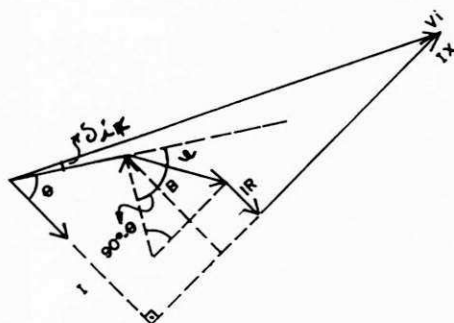


Figura 3.9 - Parte de diagrama fasorial estrela de uma linha de distribuição trifásica.

Da figura 3.9 pode-se escrever:

$$90 - \theta + \beta + \varphi = 90$$

$$\beta = \theta - \varphi$$

mas

$$\text{sen}\beta = \overline{BC} / |\Delta V_n|$$

logo

$$BC = |\Delta V_n| \cdot \text{sen}(\theta - \varphi)$$

e

$$\text{sen}(\theta + \delta_{ik}) = [V_k \text{sen}\theta + |\Delta V_n| \cdot \text{sen}(\theta - \varphi) + I X] / V_i$$

vem:

$$\delta_{ik} = \alpha_i - \alpha_k$$

$$\alpha_k = \alpha_i - \{ \arcsen[(V_k \text{sen}\theta + |\Delta V_n| \cdot \text{sen}(\theta - \varphi) + S_k X / V_k) / V_i] + \theta \} \quad (3.10)$$

As perdas de potência ativa e devido à circulação de reativos, são calculadas como na versão monofásica e dadas por:

O processo iterativo está descrito a seguir, acompanhado do respectivo fluxograma.

Considera-se um sistema radial com n barras, no qual a barra número um é aquela da subestação alimentadora, onde as tensões nas fases são supostas conhecidas e os ângulos são considerados iguais a 0, -120 e 120 graus nas fases 1, 2 e 3.

ETAPA 1

Iniciação do processo iterativo.

$$V_{k1}^{(0)} = V \quad \alpha_{k1}^{(0)} = 0$$

$$V_{k2}^{(0)} = V \quad \alpha_{k2}^{(0)} = -120$$

$$V_{k3}^{(0)} = V \quad \alpha_{k3}^{(0)} = 120 \quad P_{ik}^{P(0)} \text{ fase} = Q_{ik}^{P(0)} \text{ fase} = 0 \quad \delta_{ik}^{(0)} \text{ fase} = 0$$

para $k = 2, 3, \dots, n$

onde

$\alpha_{1k}, \alpha_{2k}, \alpha_{3k}$ são os ângulos das tensões de barras das fases 1, 2 e 3.

V_{1k}, V_{2k}, V_{3k} são os módulos de tensões de barras das fases 1, 2 e 3.

$P_{ik}^P \text{ fase}, Q_{ik}^P \text{ fase}$ são as perdas de potência ativa e reativa por fase.

$\delta_{ik} \text{ fase}$ é o ângulo de diferenças de barras por fase i e k .

ETAPA 2

Calcula-se as potências ativas e reativas por fase, acumuladas à jusante da barra k , como na versão monofásica.

ETAPA 3

Calcula-se a potência aparente acumulada na barra k , por fase, o cosseno e o seno.

ETAPA 4

Cálculo da tensão de neutro através das equações (3.5) e (3.6) para cargas trifásicas sem neutro, e usando as equações (3.8) e (3.9) para cargas trifásicas com neutro, bifásicas e monofásicas.

ETAPA 5

Cálculo dos módulos de tensões por fase usando as equações (3.1), (3.2) e (3.3). Como na versão monofásica faz-se as seguintes considerações: a) com barras de carga sem regulador de tensão automático e sem autoboster; b) com barras de carga com regulador automático e c) com barras de carga com autoboster.

As equações usadas para os cálculos são semelhantes às da versão monofásica.

Nesse processo usam-se três variáveis: IT para indicar o tipo de barra, ISIST para indicar em quantas fases vai atuar o banco de reguladores e IFASE, para indicar em quais fases vai atuar o banco de reguladores, conforme a tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1 - Variáveis usadas para simulação de bancos de reguladores

Variável			Código
IT	ISIST	IFASE	significado
4	3	0	Barra com reguladores nas 3 fases
4	2	4	Barra com regulad. nas fases 1-2
4	2	5	Barra com regulad. nas fases 1-3
4	2	6	Barra com regulad. nas fases 2-3
4	1	1	Barra com regulador na fase 1
4	1	2	Barra com regulador na fase 2
4	1	3	Barra com regulador na fase 3
2	0	0	Barra sem regulador e sem booster
3	3	0	Barra com autoboster nas 3 fases
3	2	4	Barra com autob. nas fases 1-2
3	2	5	Barra com autob. nas fases 1-3
3	2	6	Barra com autob. nas fases 2-3
3	1	1	Barra com autoboster na fase 1
3	1	2	Barra com autoboster na fase 2
3	1	3	Barra com autoboster na fase 3

ETAPA 6

Cálculo dos ângulos de tensões. Usa-se a equação (3.10) para cada fase.

Como na etapa de cálculo dos módulos de tensões também faz-se considerações à respeito do tipo de barra em que vai proceder-se o cálculo do ângulo de tensão.

ETAPA 7

Cálculo das perdas através das somas dos fluxos de potências ativas e reativas nas linhas.

ETAPA 8

Verificação da convergência do processo iterativo através de módulos e ângulos de tensões nas fases em relação à uma tolerância especificada.

Se o critério de convergência não for satisfeito e o número de iterações não tiver atingido o limite máximo fixado, o processo recomeça atualizando-se os valores de tensão e a ordem da iteração. Após o que reinicia-se as etapas de cálculo descritas anteriormente.

O fluxograma do método é mostrado a seguir.

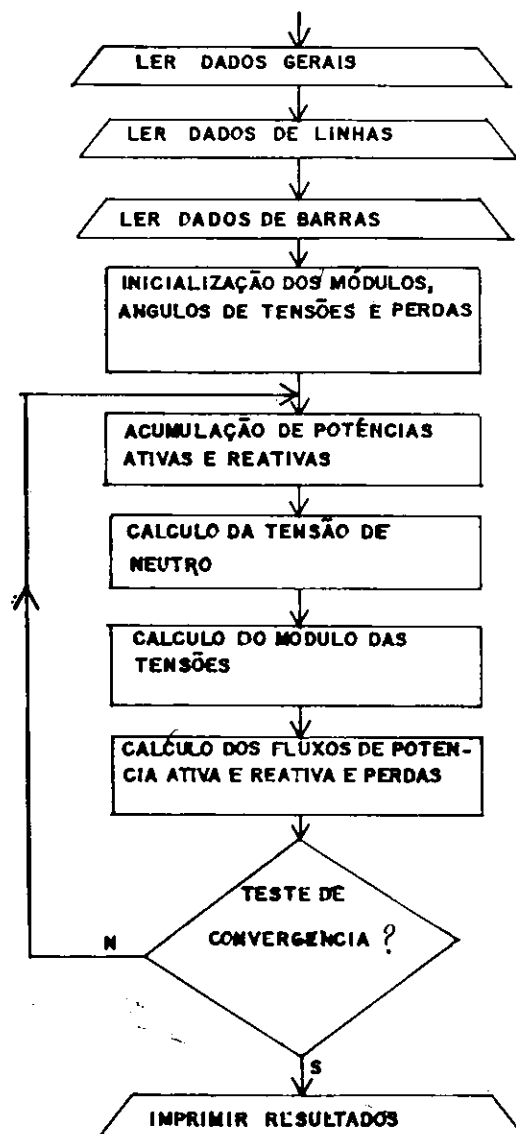


Figura 3.10-Fluxograma do fluxo de carga trifásico baseado no método dos momentos.

3.4. Resultados numéricos

Resultados de dois sistemas obtidos com dados reais são apresentados.

Sistema 3 (S3): sistema com dezoito barras, dezessete linhas com cargas equilibradas.

Sistema 4 (S4): sistema com trinta barras, vinte e nove linhas com cargas equilibradas e desequilibradas.

Os dados dos sistemas simulados estão no apêndice A e as figuras 3.11 e 3.12 mostram seus respectivos diagramas unifilares.

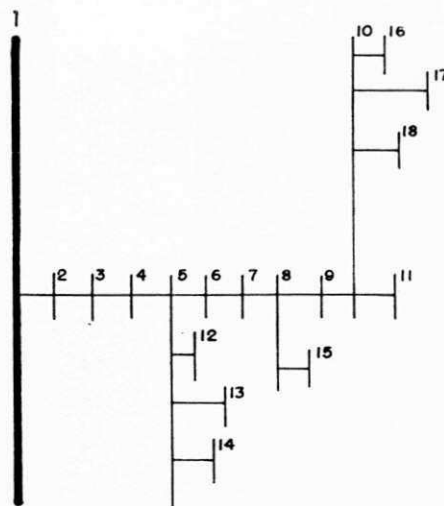


Figura 3.11 - Diagrama unifilar do sistema 3.

O sistema 3 apresenta uma simulação da rede primária de distribuição e convergiu em 4 iterações, com tolerância de 10^{-5} pu.

Os módulos e os ângulos de tensões estão listados na tabela 3.2.

A maior tensão de deslocamento de neutro é de 0.001 volts, entre as barras 8 - 15. E a menor é de 0.0005 volts entre as barras 2 - 3.

As perdas ativas e reativas são de 127,3 Kw e de 165,5 Kvar, representado respectivamente 1,9 % e %,1 % da geração total ativa e reativa.

Tabela 3.2 - Resultados de módulos e ângulos de tensões - S3

Número da barra	Módulo de tensão (pu)			Ângulo de tensão (graus)		
	Fase1	Fase2	Fase3	Fase1	Fase2	Fase3
1	1.050	1.050	1.050	0.00	-120.00	120.00
2	1.047	1.047	1.047	-0.09	-120.09	119.91
3	1.041	1.041	1.041	-0.27	-120.27	119.73
4	1.036	1.036	1.036	-0.44	-120.44	119.56
5	1.029	1.029	1.029	-0.66	-120.66	119.34
6	1.026	1.026	1.026	-0.79	-120.79	119.21
7	1.022	1.022	1.022	-0.89	-120.89	119.11
8	1.019	1.019	1.019	-0.99	-120.99	119.01
9	1.018	1.018	1.018	-1.05	-121.05	118.95
10	1.016	1.016	1.016	-1.11	-121.11	118.89
11	1.015	1.015	1.015	-1.13	-121.13	118.87
12	1.029	1.029	1.029	-0.66	-120.66	119.34
13	1.029	1.029	1.029	-0.66	-120.66	119.34
14	1.028	1.028	1.028	-0.65	-120.65	119.35
15	1.018	1.018	1.018	-0.98	-120.98	119.02
16	1.015	1.015	1.015	-1.11	-121.11	118.89
17	1.015	1.015	1.015	-1.10	-121.10	118.90
18	1.014	1.014	1.014	-1.09	-121.09	118.91

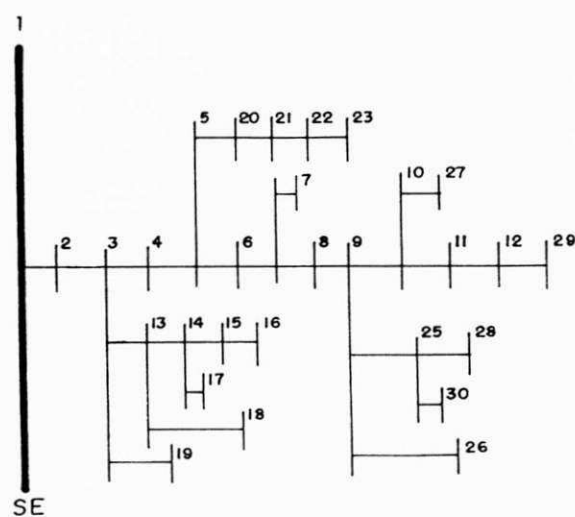


Figura 3.12 - Diagrama unifilar - sistema 4.

O sistema 4 apresenta uma simulação da rede primária de distribuição com cargas equilibradas e desequilibradas.

A simulação convergiu em 3 iterações com tolerância de 10^{-5} pu.

Os módulos e os ângulos de tensões estão ilustrados na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Resultados de módulos e ângulos de tensões - S4

Número da barra	Módulo de tensões (pu)			Ângulo de tensões (graus)		
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 1	Fase 2	Fase 3
1	1.00000	1.00000	1.00000	0.0000	-120.0000	120.0000
2	0.99233	0.99232	0.99232	-0.2559	-120.2562	119.7436
3	0.98295	0.98294	0.98233	-0.5701	-120.5707	119.4289
4	0.97307	0.97305	0.97303	-0.8567	-120.8578	119.1415
5	0.96619	0.96616	0.96614	-1.0511	-121.0525	118.9466
6	0.95858	0.95854	0.95851	-1.1592	-121.1608	118.8381
7	0.94973	0.94969	0.94966	-1.2715	-121.2732	118.7258
8	0.93534	0.93529	0.93526	-1.1635	-121.1651	118.8339
9	0.92693	0.92688	0.92685	-1.0999	-121.1016	118.8974
10	0.92401	0.92397	0.92393	-1.0778	-121.0794	118.9196
11	0.92282	0.92278	0.92275	-1.0811	-121.0827	118.9163
12	0.92233	0.92228	0.92225	-1.0831	-121.0827	118.9143
13	0.98051	0.98049	0.98049	-0.6522	-120.6528	119.3468
14	0.97868	0.97867	0.97866	-0.7137	-120.7143	119.2854
15	0.97808	0.97808	0.97807	-0.7329	-120.7335	119.2662
16	0.97778	0.97776	0.97776	-0.7429	-120.7435	119.2561
17	0.97928	0.97926	0.97926	-0.6429	-120.6435	119.3562
18	0.97795	0.97794	0.97793	-0.7092	-120.7097	119.2899
19	0.98224	0.98225	0.98222	-0.5716	-120.5722	119.4274
20	0.96091	0.96088	0.96086	-1.0098	-121.0112	118.9879
21	0.95687	0.95684	0.95682	-0.9781	-120.9785	119.0196
22	0.95279	0.95276	0.95274	-0.9461	-120.9475	119.0516
23	0.95145	0.95142	0.95139	-0.9361	-120.9376	119.0615
24	0.94823	0.94819	0.94816	-1.2622	-121.2638	118.7352
25	0.92358	0.92353	0.92349	-1.7578	-121.0774	118.9216
26	0.92547	0.92543	0.92539	-1.0908	-121.0924	118.9066
27	0.92282	0.92277	0.92274	-1.0682	-121.0698	118.9292
28	0.92198	0.92194	0.92191	-1.0655	-121.0671	118.9319
29	0.92212	0.92208	0.92205	-1.0847	-121.0863	118.9127
30	0.92322	0.92317	0.92314	-1.0776	-121.0792	118.9198

A menor tensão de neutro é de 0,107 volts entre as barras 14 - 18 e a maior é de 14,14 volts entre as barras 5- 6.

As perdas totais ativas e reativas são de 368,8 Kw e as reativas de 487,3 Kvar, representando, respectivamente, 3,3 % e 5,7 % da geração total ativa e reativa.

Observa-se, para sistemas desequilibrados, que ocorre uma deteriorização nos resíduos de potência ativa e reativa.

3.5. Conclusão

Neste capítulo foi apresentado um fluxo de carga trifásico para distribuição radial. O mesmo pode simular sistemas equilibrados e desequilibrados.

De acordo com os resultados obtidos, o fluxo de carga proposto constituiu-se como uma alternativa para a simulação de sistemas de distribuição radiais, tendo em vista sua aplicação no planejamento desses mesmos sistemas.

CAPÍTULO 4

FLUXO DE CARGA DESACOPLADO MODIFICADO

Resumo

Este capítulo apresenta um estudo comparativo do desempenho do método desacoplado rápido com três versões do mesmo: versão devido a Dragoslav e Bose, versão devido a Amerongen e versão devido a Wang e outros, em sistemas de distribuição. São enfocados os aspectos de carregamento do sistema, relações R / X altas e configuração radial complexa. Resultados de dois sistemas de distribuição mostram os desempenhos obtidos com os métodos citados.

4.1. Introdução

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos de três versões modificadas do fluxo de carga desacoplado rápido. As versões devido a Rajicic e Bose [Rajicic & Bose, 1988], Amerongen [Amerongen, 1989] e L.Wang e outros [Wang et alii, 1990] visam melhorar o desempenho do fluxo de carga desacoplado rápido em sistemas onde aparecem relações R / X altas.

Inicialmente são apresentados os desenvolvimentos teóricos dos três métodos; a seguir alguns noções de mal condicionamento de sistemas lineares são lembradas. Resultados numéricos de dois sistemas de distribuição são calculados pelos três métodos e pelo fluxo de carga desacoplado rápido e analisados os desempenhos relativos a carregamentos elevados, efeito da estrutura radial complexa e parâmetros físicos R e X , e aumento na maior relação R / X . Então, conclusões finais são feitas.

4.2. Versão devido a Dragoslav Rajicic e Anjan Bose

Para sistemas de transmissão a relação R / X é geralmente pequena e a suposição de que $G_{ij} \ll B_{ij}$ é quase sempre verdadeira. Na prática, todavia, tem sido experimentado que o fluxo de carga desacoplado rápido (FCDR) converge bem quando G_{ij} não excede significativamente B_{ij} . Em casos onde $G_{ij} \gg B_{ij}$, pode ser esperado que a inclusão do efeito da condutância nas iterações possa melhorar a convergência do processo.

Uma maneira de incluir G_{ij} no processo iterativo é adicionar as equações correspondentes aos resíduos de potência ativa e reativa como mostrado na equação abaixo.

$$(P_i + Q_i) / V_i = (G_{ii} - B_{ii})V_i + \sum_j V_j [(G_{ij} - B_{ij}) \cos(\theta_i - \theta_j) + (G_{ij} + B_{ij}) \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (4.1)$$

Então a equação do fluxo de carga modificado (FDM), em relação a $[B']$ pode ser escrita como:

$$\Delta P + \Delta Q = [B'''] \Delta V \quad (4.2)$$

onde B''' pode ser aproximada por

$$B'''_{ij} = G_{ij} - B_{ij} \quad B'''_{ii} = G_{ii} - B_{ii}$$

A equação do FDM, em relação a $[B']$, não se modifica mas o efeito de G_{ij} é incluído no cálculo de $[B']$, como mostram as equações abaixo.

$$B'_{ij} = -B_{ij} - 0.4 G_{ij} - 0.3 (G_{ij})^2 / B_{ij}$$

$$B'_{ii} = -\sum_j B'_{ij}$$

Os coeficientes 0.4 e 0.3 foram encontrados experimentalmente e eles mostraram, segundo os autores, boa convergência na equação que inclui a matriz $[B']$.

Assim o FDM consiste nas equações:

$$[\Delta P / V] = [B'] [\Delta \theta]$$

$$[\Delta P + \Delta Q] = [B'''] [\Delta V]$$

com

$$\begin{aligned} B'_{ij} &= -B_{ij} - 0.4.G_{ij} - 0.3.(G_{ij})^2 / B_{ij} \\ B''_{ii} &= - \sum B'_{ij} & B'''_{ij} &= G_{ij} - B_{ij} & B''''_{ii} &= G_{ii} - B_{ii} \end{aligned}$$

4.3. Versão devido a Robert A. M. Van Amerongen

Fluxos de carga baseados em métodos desacoplados são desenvolvidos a partir do desacoplamento das equações linearizadas dos mesmos. Para obter este desacoplamento, duas suposições são assumidas: primeiro, as resistências dos ramos são pequenas em relação às reatâncias; e segundo a diferença angular das barras do sistema é considerada pequena. No caso do fluxo de carga desacoplado rápido outras simplificações são feitas, como já foi descrito no capítulo 1.

Amerongen propõe duas modificações em relação à versão padrão do FCDR: primeiro, a resistência é desprezada na construção da matriz $[B'']$, ao invés da matriz $[B']$. Segundo o autor, este efeito traduz-se em um maior número de iterações para convergência, em sistemas normais (relações R / X baixas). Porém, para sistemas com relações R / X altas o efeito de desprezar-se a resistência em $[B']$, traduz-se em melhor convergência do fluxo de carga. A segunda modificação consiste no esquema de iteração que é usado. O esquema de iteração padrão permite a possibilidade de omitir uma ou mais iterações P e / ou Q , assim que os referidos resíduos de potência tenham convergido. Esta estratégia pode criar um comportamento cíclico (um laço dentro do programa) quando a resistência é desprezada na matriz $[B'']$. Para prevenir isto, um esquema de iteração diferente é usado: depois de cada sub-iteração, ambos ΔP e ΔQ são testados para uma tolerância especificada. Quando ambos convergirem o procedimento termina.

4.4. Versão devido a L. Wang e outros.

A grande importância desse método é o fato de que o mesmo é derivado de alguma base teórica e inclui o mesmo princípio de convergência do método de Rajicic e Bose.

As equações do fluxo de carga proposto por Wang e outros são as seguintes:

$$\theta_{k+1} = \theta_k - [V_k]^{-1} [E] [V_k]^{-1} \Delta P(\theta_k, V_k) \quad (4.3)$$

$$V_{k+1} = V_k - [B''']^{-1} [V_k]^{-1} [\Delta P(\theta_{k+1}, V_k) + \Delta Q(\theta_{k+1}, V_k)] \quad (4.4)$$

onde

$$B'''_{ij} = B_{ij} - G_{ij}$$

e $B'''_{ii} = B_{ii} - G_{ii}$

A matriz $[E]$ é a chave do método, e será desenvolvida abaixo, com o propósito de obter melhor convergência em sistemas com R / X altas e satisfazer a relação seguinte:

$$E_{ii} = - \sum_{j \neq i} E_{ij} \quad (4.5)$$

Fluxo de carga com iteração PQ-V

O resíduo $P + Q$ na equação (4.4) é:

$$\Delta P, \Delta Q = \Delta P + \Delta Q = (P_i + Q_i) - V_i \sum V_j [-(B_{ij} - G_{ij}) \cos \theta_{ij} + (B_{ij} + G_{ij}) \sin \theta_{ij}]$$

então,

$$N.L_{ij} = \partial \Delta P Q_i / \partial V_j = -V_i [-(B_{ij} - G_{ij}) \cos \theta_{ij} + (B_{ij} + G_{ij}) \sin \theta_{ij}]$$

$$N.L_{ii} = \partial \Delta P Q_i / \partial V_i = - \sum_{j \neq i} V_j [-(B_{ij} - G_{ij}) \cos \theta_{ij} + (B_{ij} + G_{ij}) \sin \theta_{ij}] + 2.V_i.(B_{ii} - G_{ii})$$

As seguintes suposições são geralmente verdadeiras:

$$V_i \cong V_j \cong 1 \quad \sin \theta_{ij} \cong 0 \quad \cos \theta_{ij} \cong 1$$

e portanto boas aproximações de $N.L_{ij}$ e $N.L_{ii}$, são respectivamente:

$$N.L_{ij} = V_i.(B_{ij} - G_{ij}) \quad (4.6)$$

$$N.L_{ii} = V_i.(B_{ii} - G_{ii}) \quad (4.7)$$

Pode-se observar que $(B_{ij} - G_{ij}) \gg (B_{ij} + G_{ij})$ não é geralmente verdadeiro porque $G_{ij} \ll B_{ij}$ para muitas linhas de transmissão. Assim a aproximação das equações (4.6) e (4.7) não é tão boa como parece. Isto faz com que a iteração PQ -V convirja mais lentamente do que a correspondente iteração Q isolada. Mesmo assim a iteração PQ-V converge muito bem.

Desenvolvimento do método

O desenvolvimento do método diz respeito principalmente ao equacionamento da matriz [E], a qual é usada na iteração P - θ .

Considere a iteração P - θ depois de processada uma iteração PQ -V. Das equações (4.4) e (5.5), a variação do fluxo de potência ativa esperada é expressa através de:

$$\Delta P'_{ij} = E_{ij}.(\Delta \theta_i - \Delta \theta_j) \quad (4.8)$$

Esta equação pode ser aproximada por:

$$(\Delta P'_{ij})^\theta = B_{ij}(\Delta \theta_i - \Delta \theta_j) \quad (4.9)$$

Agora considere a soma dos fluxos de potência ativa e reativa:

$$PQ_{ij} = P_{ij} + Q_{ij} = V_i.(B_{ij} - G_{ij}) - V_i.V_j.\cos\theta_{ij}.(B_{ij} - G_{ij}) + V_i.V_j.\sin\theta_{ij}.(B_{ij} + G_{ij}).$$

A derivada de PQ_{ij} com relação a θ_{ij} é:

$$\partial PQ_{ij} / \partial \theta_{ij} = V_i.V_j.\sin\theta_{ij}.(B_{ij} - G_{ij}) + V_i.V_j.\cos\theta_{ij}.(B_{ij} + G_{ij}) = B_{ij} + G_{ij}$$

Da equação anterior, a variação do fluxo de potência P + Q, depois da iteração P - θ é aproximadamente:

$$(\Delta PQ_{ij})^\theta = (B_{ij} + G_{ij}).(\Delta \theta_i - \Delta \theta_j) \quad (4.10)$$

Como a iteração PQ - V converge antes da iteração P - θ as variações expressa pela equação anterior levam para um novo resíduo P + Q. Num caso ideal, a iteração PQ - V pode ser escrita como:

$$(\Delta PQ_{ij})^v = -(\Delta PQ_{ij})^\theta \quad (4.11)$$

Isto é, tendo as mesmas variações que $(\Delta PQ_{ij})^\theta$.

Onde $(\Delta PQ_{ij})^v$ é a variação do fluxo de potência P + Q na iteração PQ - V. Das equações (4.4), (4.6) e (4.7) a variação anterior é aproximadamente igual a:

$$(\Delta PQ_{ij})^v = (B_{ij} - G_{ij})(\Delta V_i - \Delta V_j) \quad (4.12)$$

Também, a iteração PQ -V causará uma variação no fluxo de potência ativa expressa por:

$$(\Delta P_{ij})^v = -G_{ij}(\Delta V_i - \Delta V_j) \quad (4.13)$$

Assim,

A variação total no fluxo de potência ativa depois de uma iteração P - θ e de uma iteração PQ - V é dada por:

$$(\Delta P_{ij})^{\theta v} = (\Delta P_{ij})^\theta + (\Delta P_{ij})^v \quad (4.14)$$

E a variação total do fluxo de potência ativa (eq. 4.14) pode ser igual à variação do fluxo de potência ativa esperada (eq. 4.8), para obter uma convergência melhor do método proposto.

Das equações (4.11), (4.12) e (4.13), o resultado seguinte é obtido:

$$(\Delta P_{ij})^v = G_{ij} (\Delta PQ_{ij})^\theta / (B_{ij} - G_{ij}) \quad (4.15)$$

Se ΔPQ_{ij} for substituído pela equação (4.10) vem:

$$(\Delta P_{ij})^v = (B_{ij} + G_{ij}).G_{ij}.(\Delta \theta_i - \Delta \theta_j)$$

Substituindo $(\Delta P_{ij})^\theta$ (4.9) e a equação anterior na equação (4.14) obtém-se:

$$(\Delta P_{ij})^{\theta v} = [B_{ij} + (B_{ij} + G_{ij}).G_{ij}.(B_{ij} - G_{ij})](\Delta \theta_i - \Delta \theta_j) \quad (4.16)$$

Comparando (4.16) com (4.8) a matriz [E] pode ser escrita como:

$$E_{ij} = B_{ij} + (B_{ij} + G_{ij}) \cdot G_{ij} \cdot (B_{ij} - G_{ij}) \quad (4.17)$$

e da equação (4.5):

$$E_{ii} = - \sum_{j \neq i} E_{ij}$$

A matriz [E]

Suponha $k = -G_{ij} / B_{ij} = R_{ij} / X_{ij}$, E_{ij} definido pela equação (4.17) pode ser escrito como:

$$E_{ij} = B_{ij} \cdot [1 - (k - k)^2 / (1 + k)] = B_{ij} \cdot f(k) \quad \text{onde:}$$

$f(k) = 1 - (k - k)^2 / (1 + k)$. O diagrama geométrico de $f(k)$ é mostrado na figura 4.1.

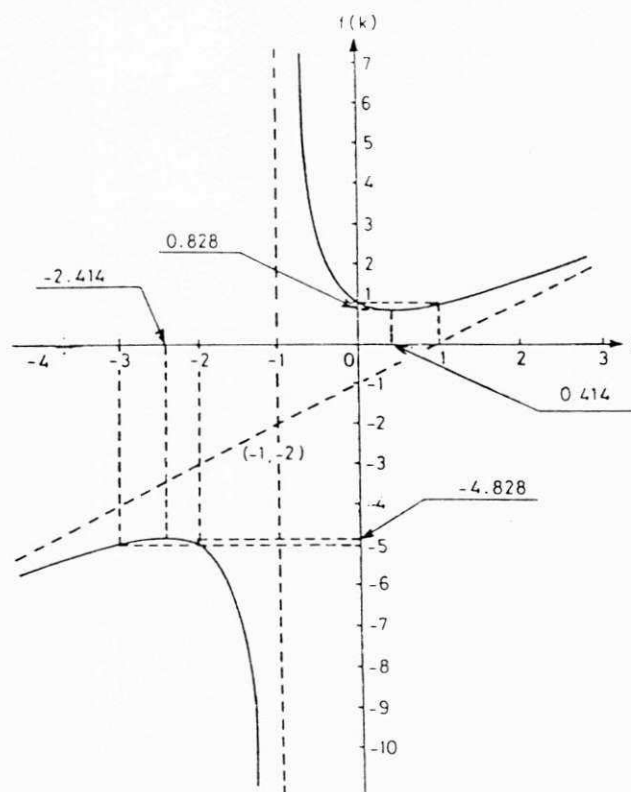


Figura 4.1 - Diagrama geométrico de $f(k)$

É mostrado na figura 4.1 que:

(i) Se $0 \leq k \leq 1$, $f(k) \leq 1$, e quando $k = 0,414$, $f(k) = 0,828$ (valor mínimo).

- (ii) Se $k > 1$, $f(k) > 1$; e quando $k \gg 1$, $f(k) \rightarrow k$
- (iii) Se $-1 < k < 0$, $f(k) > 1$; e quando $k \rightarrow -1$, $f(k) \rightarrow \infty$
- (iv) Se $k < -1$, $f(k) < 0$; e $f(k)$ é simétrica em relação ao ponto $(-1, -2)$ para a parte de $f(k)$ na região $k > -1$.

Foi mostrado na figura 4.1 que a relação $k = R / X$ de uma linha satisfaz $f(k) < 1$ se $0 < k < 1$, a qual faz E_{ij} menor do que B_{ij} , especialmente no caso $k = 0,414$, $E_{ij} = 0,828.B_{ij}$. Isto também significa que a variação do fluxo de potência ativa esperado $|\Delta P'_{ij}|$ é menor do que a variação do fluxo de potência $|\Delta P^{\theta}_{ij}|$ depois da iteração $P - \theta$. Ocorre uma variação em excesso em $|\Delta P^{\theta}_{ij}|$, a qual é expressa por:

$$\Delta P_{ij}(\text{ex}) = - (B_{ij} + G_{ij}).G_{ij}. (\Delta \theta_i - \Delta \theta_j) / (B_{ij} - G_{ij})$$

A variação excessiva no fluxo de potência ativa será removida na iteração PQ -V seguinte.

Não é muito bom definir E_{ij} pela equação (4.17) para linhas com $0 \leq k \leq 1$, em virtude de (i) ocorre alguma aproximação no desenvolvimento de (4.17), porque a variação excessiva no fluxo de potência ativa é pequena e a variação do fluxo de potência ativa causada na iteração PQ - V é também pequena, assim a aceleração da convergência do método é facilmente afetada pelas aproximações feitas, e algumas vezes ineficiente; (ii) a variação do fluxo de potência ativa dada pela equação (4.9) é maior do que a dada pela equação (4.8). Isto significa que $(\Delta \theta_i - \Delta \theta_j)$, para cada linha com $0 \leq k \leq 1$, é maior do que a esperada na iteração $P - \theta$ e isto causa problemas de convergência em alguns sistemas.

Uma equação revisada de E_{ij} para linhas com $0 \leq k \leq 1$ é proposta como a seguir:

$$E_{ij} = B_{ij} + 0,5.(B_{ij} + G_{ij}). G_{ij} / (B_{ij} - G_{ij}) \quad (4.18).$$

A equação (4.18) sacrifica a formalidade matemática, mas faz o método menos sensível às aproximações feitas no desenvolvimento da equação (4.17).

Para linhas interligando barras PV ou barras PV à referência e para linhas com $k < -0,6$, os elementos de $[E]$ são calculados como mostrado a seguir:

B_{ij} , para linhas conectando barras PV ou barras PV à referência

$B_{ij} + 0,5 \cdot (B_{ij} + G_{ij}) \cdot G_{ij} / (B_{ij} - G_{ij})$, se $0 \leq k \leq 1$

$E_{ij} =$

$B_{ij} + (B_{ij} + G_{ij}) \cdot G_{ij} / (B_{ij} - G_{ij})$, se $-0,6 \leq k$ ou $k > 1$

determinado pelo método da compensação série se $k < -0,6$.

$$E_{ii} = - \sum_{j \neq i} E_{ij}$$

O fluxograma do método está esquematizado na figura 4.2.

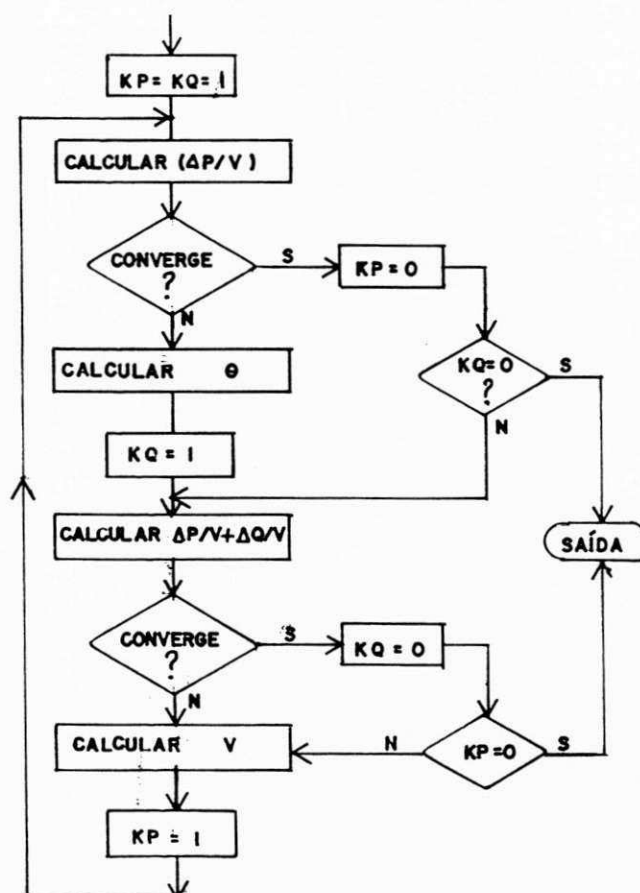


Figura 4.2 Fluxograma do método de fluxo de carga de L. Wang e outros.

4.5. Análise de resultados

A análise de resultados é enfocada em três aspectos: carregamento elevado nas barras do sistema; estrutura radial complexa e parâmetros físicos R e X e aumento da maior relação R / X.

Para fazer a análise do efeito da estrutura radial complexa e parâmetros físicos R e X, é necessário relembrar noções de mal condicionamento de sistemas lineares. Este aspecto é enfocado logo a seguir.

O computador usado para fazer as simulações foi um PC.

Vários sistemas foram testados, sendo escolhidos dois para a listagem de resultados:

Sistema 1 (S1) - mesmo sistema estudado no capítulo 2.

Sistema 5 (S5) - Rede radial com cinquenta e uma barras, cinquenta linhas e três autobusters, cujo diagrama unifilar está na figura 4.3.

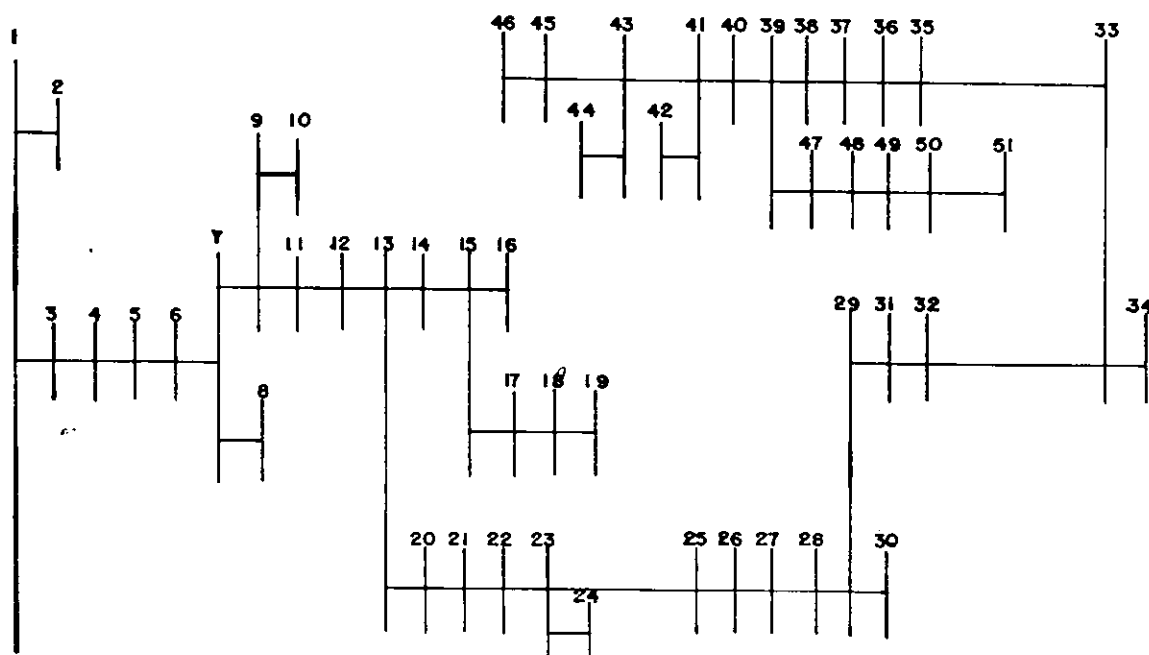


Figura 4.3 - Diagrama unifilar - sistema 5.

Noções de mal - condicionamento

Um modo de se detectar o mal condicionamento de um sistema linear do tipo $Ax = b$, é através do determinante normalizado da matriz dos coeficientes do sistema dado; se o determinante normalizado for sensivelmente menor que a unidade, o sistema será mal - condicionado [Barroso et alii, 1987], [Cláudio & Marrins, 1994], [Ralston, 1965] e [Demidovich & Maron, 1987].

Se $[A]$ é uma matriz de ordem n , seu determinante normalizado, denotado por $\det (norma)$, é dado por: $\det (norma) = \det ([A]) / (line1.line2....lineN)$ onde:

$$lin\ i = \sqrt{a_{i1}^2 + a_{i2}^2 + + a_{iN}^2} \quad i = 1, 2, , N.$$

Enfoque do carregamento elevado nas barras do sistema

Utilizou-se o sistema 1 com carga normal e com carga elevada a cinco vezes e meia e seis vezes e meia a normal, em todas as barras com carga. A tolerância para convergência foi fixada em 10^{-6} pu.

Usa-se a seguinte nomenclatura nas tabelas apresentadas a seguir: método desacoplado rápido (FCDR); versão devido a Rajicic e Bose (MFDPFM); versão devido a L. Wang e outros (NDPFM) e versão devido a Amerongen (BX).

A tabela 4.1 mostra os resultados de módulos de tensões para o sistema 1 , dos quatro métodos utilizados. O sistema 1 está com carga normal.

Tabela 4.1 - Resultados de módulos de tensões - S1

Método	FCDR	MFDPFM	NDPFM	BX
Número de iterações	P - Q 6 6	P - Q 9 8	P - Q 6 5	P - Q 11 11
Número da barra	Módulos de tensões (pu)			
1	1.100	1.100	1.100	1.100
2	1.077	1.077	1.077	1.077
3	1.083	1.083	1.083	1.083
4	1.055	1.055	1.055	1.055
5	1.055	1.055	1.055	1.055
6	1.067	1.067	1.067	1.067

Nota-se da tabela 4.1, que os resultados de módulos de tensões são exatamente iguais. Sendo que o NDPFM convergiu com um número menor de iterações.

A tabela 4.2 explicita os ângulos de tensões das barras.

Tabela 4.2 - Resultados de ângulos de tensões - S1

Número da barra	Ângulo de tensões (graus)			
	FCDR	MFDPFM	NDPFM	BX
1	0.000	0.000	0.000	0.000
2	-0.360	-0.360	-0.360	-0.360
3	-0.282	-0.282	-0.282	-0.282
4	-0.172	-0.173*	-0.173*	-0.173
5	-0.144	-0.145*	-0.145*	-0.145
6	-0.208	-0.208	-0.208	-0.208

Observando-se a Tabela 4.2, pode-se notar que os ângulos das barras 4 e 5 nos métodos MFDPFM, NDPFM e BX diferem dos de FCDR na terceira casa decimal.

Os fluxos de potência para os métodos chegam a apresentar diferenças de resultados na primeira e terceira casas decimal, como mostra a tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Resultados de fluxos de potência - S1

Barra emissora / Barra receptora	Fluxos de potência ativa e reativa					
	Mw			Mvar		
	FCDR	MFDPFM	NDPFM	FCDR	MFDPFM	NDPFM
3 - 6	0.85598	0.85650	0.85657	0.54529	0.54496	0.54547
5 - 6	-0.49967	-0.50001	-0.50021	-0.33333	-0.33331	-0.33339

Os demais fluxos apresentam diferenças de resultados na quarta casa decimal.

Os resultados dos fluxos obtidos com o método BX são iguais aos de MFDPFM E NDPFM.

Para o mesmo sistema com carregamento cinco vezes e meio o normal e tolerância de 10^{-6} pu., os métodos convergiram com o seguinte número de iterações:

Tabela 4.4 - Número de iterações para convergência

Método	Número de iterações para convergência
	P - Q
FCDR	diverge
MFDPFM	20 - 26
NDPFM	21 - 27
BX	28 - 27

Quando o carregamento foi aumentado para seis vezes e meia o normal, todos os métodos divergiram.

Enfoque do efeito da estrutura radial e parâmetros físicos R e X

Para visualizar os resultados foram calculados os determinantes normalizados das matrizes $[B']$ e $[B'']$ ou equivalentes, nos quatro métodos utilizados. Os sistemas 1 e 2 foram simulados com carga normal.

A tabela 4.5 apresenta os determinantes normalizados de $[B']$ e $[B'']$ ou $[B''']$ para o sistema 1.

Tabela 4.5-Resultados de determinantes normalizados - S1

Método	Det (norma) $[B']$	Det (norma) $[B'']$ ou $[B''']$
FCDR	0.00	$4,8.10^{-2}$
MFDPFM	$4,1.10^{-9}$	$3,7.10^{-2}$
NDPFM	$6,8.10^{-8}$	$3,7.10^{-9}$
BX	$4,8.10^{-2}$	$9,4.10^{-9}$

Obs: o número entre parênteses significa expoente.

Observa-se na tabela 4.5 que todos os determinantes normalizados das matrizes $[B']$ e $[B'']$ ou $[B''']$ são menores do que um. Isto significa sistemas mal-

condicionados. No entanto a convergência dos métodos foi obtida, independentemente desse fator.

A tabela 4.6 explicita os determinantes normalizados das matrizes já citadas para o sistema 5.

Tabela 4.6 - Resultados de determinantes normalizados - S5

Método	Det (norma) [B']	Det (norma) [B''] ou [B''']
FCDR	0.0	0.2903.10(-14)
MFDPFM	0.1071.10(-4)	0.0
NDPFM	0.1577.10(-7)	0.0
BX	0.2903.10(-14)	0.0

Nenhum dos quatro métodos convergiu quando simulados com os dados do sistema 5.

Constata-se, pela tabela 4.6, que todos os métodos apresentam problemas de mal-condicionamento na formação das equações para solução do sistema 5. E isto, não explica completamente a não convergência de todos eles, nesse caso.

Embora não fazendo parte deste trabalho, foi testado o método desacoplado rápido com rotação de eixos no sistema 5. O método citado não convergiu com nenhum ângulo de rotação testado, simulando o sistema especificado.

Outra experiência foi trocar todas as resistências pelas reatâncias no sistema 5. Isto evidencia o efeito da estrutura lateral complexa na não convergência dos métodos desacoplados, pois nenhum deles convergiu, mesmo com essa permuta de parâmetros.

Enfoque do efeito do aumento da maior relação R / X

O sistema 1 foi utilizado para a verificação do efeito do aumento da maior relação R / X no desempenho dos métodos. A tolerância para convergência foi especificado em 10^{-6} pu.

A maior relação R / X é a da linha 6 - 4, cujo valor é de 1,91. Esta relação foi multiplicada por 3, 20 e 30 vezes. A tabela 4.7 mostra o número de iterações para convergência.

Tabela 4.7 - Número de iterações para convergência

Método	FCDR	MFDPFM	NDPFM	BX
Número de iter. com	P - Q	P - Q	P - Q	P - Q
3 x maior R / X	diverge	10 9	6 6	16 16
20 x maior R / X	diverge	19 20	19 20	20 19
30 x maior R / X	diverge	diverge	diverge	diverge

Pode-se afirmar, da tabela 4.7, que o FCDR é o método mais sensível ao aumento da relação R / X, e o NDPFM é o método menos sensível.

4.6. Conclusão

Os métodos BX e FCDR apresentaram uma maior sensibilidade em relação ao carregamento do sistema. Isto é, uma maior dificuldade de convergência.

Embora, os métodos FCDR, MFDPFM, NDPFM e BX tenham conseguido convergência com o sistema 1, em carga normal, com tolerância de 10^{-6} pu, apresentaram diferenças de resultados nos ângulos de tensões e fluxos de potência.

Sistemas de distribuição mal-condicionados apresentaram convergência e divergência na simulação de métodos desacoplados.

Quanto à dificuldade de convergência em relação maior relação R / X do sistema, os métodos FCDR e BX apresentaram maior sensibilidade para convergência.

Concluí-se, de acordo com tudo o que foi exposto neste capítulo, que o uso de métodos desacoplados em sistemas de distribuição deve ser feito considerando a característica de cada sistema separadamente.

CAPÍTULO 5

FLUXO DE CARGA DESACOPLADO MODIFICADO COM ACUMULAÇÃO DE POTÊNCIAS EQUIVALENTES

Resumo

Este capítulo apresenta um fluxo de carga com um método de solução derivado de uma versão do fluxo de carga desacoplado rápido. O fluxo de carga proposto reúne as excelentes características dos métodos desacoplados com a propriedade da soma de potências equivalentes, que é própria dos sistemas de distribuição. Resultados numéricos são confrontados com resultados do método desacoplado rápido e três versões deste método. Os mesmos demonstram a eficiência do fluxo de carga proposto.

5.1. Introdução

Estudos de fluxo de carga em um computador digital essencialmente envolvem a solução de um conjunto de equações não-lineares. Provavelmente todos os métodos numéricos relevantes foram aplicados para resolver as equações não-lineares do fluxo de potência. Entre os vários, o fluxo de carga baseado no método de Newton-Raphson tem se mostrado bastante eficiente. Muitas versões desacopladas do método de Newton-Raphson na forma polar têm sido desenvolvidas, com o objetivo de reduzir tempo e memória computacional envolvidos na solução do fluxo de potência. Entre as versões desacopladas, o fluxo de carga desacoplado rápido

desenvolvido por Stott e Alsac é possivelmente o mais popular entre aqueles usados na indústria de energia elétrica. Isto é verdadeiro, principalmente pela simplicidade, baixo requisito de memória e velocidade do referido método.

Entretanto, o fluxo de carga desacoplado rápido (FCDR) apresenta dificuldades de convergência em sistemas que têm ramos com relações R / X altas e em sistemas de distribuição radiais. Sistemas de distribuição radiais são casos particulares de sistemas que possuem ramos com relações R / X altas.

Modificações no método FCDR para evitar tais dificuldades têm sido de interesse dos pesquisadores. Alguns métodos foram propostos, como aqueles estudados no capítulo 4, para melhorar as taxas de convergência em sistemas com relações R / X altas.

Apesar dos vários experimentos e proposições para melhorar a taxa de convergência de métodos desacoplados, os mesmos podem apresentar problemas de convergência em sistemas de distribuição.

Este capítulo apresenta um fluxo de carga desacoplado modificado. O fluxo de carga desacoplado modificado com acumulação de potências equivalentes (FCDMAPE) reúne as excelentes características dos métodos desacoplados com a propriedade da soma de potências equivalentes, que é própria dos sistemas de distribuição.

Inicialmente são feitos alguns comentários a cerca de erros de arredondamento, para providenciar justificção para o método proposto. A seguir, descreve-se o novo fluxo de carga. Resultados numéricos de dois sistemas de uma companhia de distribuição do Nordeste e dos quatro sistemas radiais padrão do IEEE, tomados na sua forma equilibrada, são comparados com resultados obtidos através de FCDR e das três versões estudadas no capítulo 4. Finalmente conclusões finais são formalizadas.

5.2. Erros de arredondamento

Três pontos importantes acerca de erros de arredondamento devem ser destacados:

- 1) O tamanho de um sistema de equações lineares aumenta a influência dos erros de arredondamento quando sua solução é executada, pois o número de operações aumenta;
- 2) Algumas matrizes são extremamente sensíveis a pequenas mudanças nos coeficientes e são ditas matrizes mal-condicionadas;
- 3) Um pivô muito pequeno, relativamente aos outros pivôs da matriz, pode mudar radicalmente a solução de um sistema de equações lineares.

Para determinar se uma matriz é mal-condicionada usa-se, neste capítulo, a condição da matriz e um parâmetro denominado de Rcond. A condição de uma matriz $[A]$ é calculada como o produto da norma de $[A]$ pelo inverso desta mesma norma.

$$\text{Cond}([A]) = \|A\| \cdot \|A\|^{-1}$$

Se $\text{cond}([A])$ é grande, a matriz é mal-condicionada. $\text{Rcond}([A])$ é um estimador inverso de $\text{Cond}([A])$. Se $[A]$ é bem-condicionada, $\text{Rcond}([A])$ é próximo de 1,0. Se $[A]$ é mal-condicionada, $\text{Rcond}([A])$ é próximo de 0,0.

Estes comentários serão usados mais adiante para justificar o novo fluxo de carga proposto.

5.3. Novo fluxo de potência

São conhecidas as características específicas de sistemas de distribuição e subtransmissão, as quais implicam na formação de matrizes mal-condicionadas, em métodos desacoplados, causando problemas de convergência. Estas características

específicas são: 1) uma rede com configuração predominantemente radial com ramificações lateral complexa; 2) relações R / X altas, além de aberturas angulares elevadas devido ao carregamento das linhas.

Todos os fluxos de potência desacoplados estudados neste trabalho usam o método da bifatoração [Zollenkopf, 1970], o qual deve ser usado para matrizes esparsas que não possuem elementos nulos na diagonal e são estritamente simétricas ou assimétricas nos valores dos elementos, mas com uma estrutura simétrica de esparsidade simétrica. Mas ainda, no artigo que descreve o método da bifatoração é assumido por razões de erros de arredondamento que a matriz é diagonalmente dominante (nós dizemos que uma matriz é diagonalmente dominante por linhas, se cada elementos da diagonal não é menor do que a soma dos módulos dos outros elementos da mesma linha; uma definição similar pode ser feitas por colunas).

O método da bifatoração usa um esquema quase-ótimo de ordenação. O mesmo consiste em selecionar em cada passo do processo de redução o pivô da coluna que contiver o menor número de elementos não nulos. Se em mais de uma coluna for encontrado este critério, qualquer pivô é selecionado. Uma tabela chamada NSEQ contém a sequência pivotal como resultado da estratégia de ordenação. Os elementos não nulos da matriz são armazenados em um vetor chamado CE.

Como já foi relatado, as matrizes desacopladas de sistemas de distribuição apresentam-se mal-condicionadas e portanto, podem ser muito afetadas por erros de arredondamento. Como consequência deste fato a simulação de sistemas de distribuição diverge. Uma evidência conclusiva para esse fato são os casos onde sistemas de distribuição que têm os ramos ordenados em uma determinada sequência de barras têm sua simulação convergida, enquanto os mesmos sistemas com ramos ordenados em outra sequência divergem. Nestes casos, a tabela NSEQ mostra que a sequência pivotal muda com a sequência de barras. Consequentemente, o vetor CE mostra que os elementos da matriz fatorada também mudam.

Assim, temos o seguinte problema: sistemas de distribuição com matrizes desacopladas mal-condicionadas, que usam as rotinas de bifatoração, podem ter sua convergência comprometida por erros de arredondamento, os quais sofrem influência do tamanho do sistema e da sequência de barras do sistema de distribuição.

A solução proposta consiste em : 1) dividir o sistema de distribuição em dois ou mais subsistemas, usando a propriedade da soma de potências equivalentes. Com isso reduz-se o tamanho do sistema; 2) formar a sequência de barras a partir da barra de referência e numerar as mesmas de maneira que barras conectadas através de ramos tenham números aproximadamente consecutivos. Com este procedimento é possível formar matrizes tridiagonais ou aproximadamente tridiagonais, as quais são menos vulneráveis a erros de arredondamento.

A propriedade da soma de potências equivalentes, que é própria de sistemas de distribuição, permite a redução da topologia complexa do sistema de distribuição. A mesma consiste em fazer um subsistema equivalente a uma carga com potência ativa e reativa constante como mostram as equações (5.1) e (5.2) abaixo.

$$P_{\text{equivalente}} = \sum P_C - \sum P_G \quad (Kw) \quad (5.1)$$

$$Q_{\text{equivalente}} = \sum Q_C - \sum Q_G - \sum Q_{\text{shunt}} \quad (Kvar) \quad (5.2)$$

onde

$\sum$ é o somatório de todas as cargas ativas / ou reativas / ou de capacitores ou é o somatório de todas as potências geradas ou consumidas à jusante da barra de referência do n - ésimo subsistema com esta barra incluída.

Assim, o sistema de distribuição pode ser dividido em 2, 3,, n subsistemas. Qualquer subsistema principal pode ser radial ou malhado.

O exemplo ilustrado na figura 5.1, abaixo mostra um diagrama unifilar de um sistema de distribuição radial. O subsistema 1 é o sistema principal e o subsistema 2 é o sistema secundário. A barra número 3 é uma barra do tipo PQ no sistema principal e é uma barra de referência no sistema secundário.

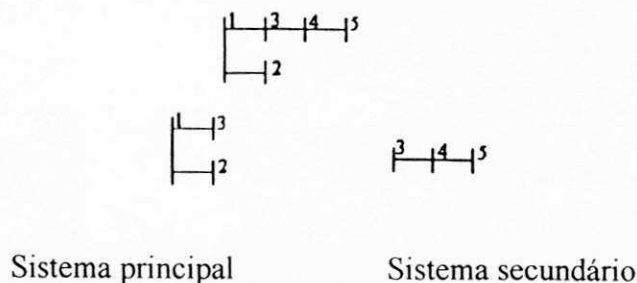


Figura 5.1 - Diagrama unifilar de um sistema com 5 barras.

Devido ao melhor desempenho das equações de fluxo de carga propostas por L. Wang e outros, observado no capítulo 4. Isto é, este método comparado aos outros convergiu quase sempre com um número de iterações menor; foi menos sensível a mudanças na relação R / X alta e ao carregamento elevado dos sistemas de distribuição, o mesmo foi preferido frente aos outros estudados no capítulo 4. Assim, o fluxo de carga proposto usa as equações do método de L. Wang e outros, repetidas abaixo, combinado com a propriedade da soma de potências equivalentes.

As equações do FCDMAPE são:

$$\theta_{k+1} = \theta_k - [V_k]^{-1} [E] [V_k]^{-1} [\Delta P(\theta_k, V_k)] \quad (5.3)$$

e

$$V_{k+1} = V_k - [B''']^{-1} [V_k]^{-1} [\Delta P(\theta_{k+1}, V_k) + \Delta Q(\theta_{k+1}, V_k)] \quad (5.4)$$

onde

As matrizes $[E]$ e $[B''']$ foram definidas no capítulo 4.

Como na implantação do método de L. Wang que foi feita no capítulo anterior, a convergência dos resíduos absolutos por barra é feita em termos de $|\Delta P| \leq \epsilon$ e $|\Delta Q| \leq \epsilon$, onde ϵ é a tolerância especificada. Esta é uma alteração importante em relação ao método original de Wang que testa a convergência em termos das iterações $P - \theta$ e $PQ - V$.

O algoritmo para o FCDMAPE com a divisão do sistema de distribuição em dois subsistemas: principal e secundário; é detalhado a seguir. E o fluxograma para o método é mostrado na figura 5.2.

ETAPA 1

Leitura dos dados de ramos e de barras para os sistemas secundários e principal

ETAPA 2

Montagem da matriz de admitâncias dos sistemas principal e secundário.

ETAPA 3

Montagem e fatoração das matrizes $[E]$ e $[B''']$ dos sistemas principal e secundário.

ETAPA 4

Acumulação das potências e perdas do sistema secundário no sistema principal. A acumulação de potências é feita usando-se a propriedade da soma de potências equivalentes. As perdas são calculadas somando-se os fluxos de potências nas linhas.

ETAPA 5

Realiza-se a convergência completa do sistema principal através das etapas descritas no fluxograma do método de L.Wang mostrado no capítulo 4.

ETAPA 6

Transferência da tensão de referência para o sistema secundário, calculada durante a convergência do sistema principal.

ETAPA 7

Realiza-se a convergência completa do sistema secundário da mesma forma que na etapa 5.

ETAPA 8

Verificação dos resíduos de perdas totais do sistema secundário de uma iteração para outra, em relação a uma tolerância especificada.

Caso as perdas estejam sejam menores ou iguais à tolerância especificada, imprimem-se os resultados. Caso sejam maiores volta-se para a etapa 4.

Para monitorar a divisão do sistema de distribuição (não para garantir a convergência dos subsistemas) foi usado o seguinte teorema.

Teorema - Considere um sistema de equações lineares $[A].[x] = [b]$. Se $[A] = [S] - [T]$, então a equação $[S].[x_{k+1}] = [T].[x] + [b]$ é válida. O método iterativo é convergente se e somente se cada autovalor λ da inversa $[S].[T]$ satisfizer $|\lambda| < 1$ [Strang, 1980].

5.4. Resultados numéricos

Resultados numéricos são apresentados nesta seção para demonstrar a eficiência do FCDMAPE. "Flat-start" é usado em todos os fluxos de potências calculados. Seis sistemas equilibrados, incluindo quatro sistemas radiais padrão do IEEE: 13 - barras; 34 - barras; 37 - barras e 123 - barras são usados nos testes. Comparações são feitas entre FCDR, MFDPFM, NDPFM, BX e FCDMAPE.

As tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os números de iterações de todos os sistemas simulados em simples e dupla precisão, respectivamente, em um computador do tipo PC.

Tabela 5.1 - Número de iterações do FCDR, MFDPFM, NDPFM, BX e FCDMAPE -

Precisão simples

Número de barras do sistema	FCDR P - Q	MFDPFM P - Q	NDPFM P - Q	BX P - Q	FCDMAPE
IEEEER - 13	3 2	4 3	4 3	3 2	2
IEEEER - 34	nc	nc	nc	nc	2
IEEEER - 37	5 5	6 6	6 5	6 6	2
IEEEER - 123	nc	nc	nc	nc	2
PAR - 51	nc	nc	nc	nc	5
MRC - 60	nc	nc	nc	nc	7

nc: A convergência do sistema não foi obtida.

Tabela 5.2 - Número de iterações do FCDR, MFDPFM, NDPFM, BX e FCDMAPE -

Precisão dupla

Número de barras do sistema	FCDR P - Q	MFDPFM P - Q	NDPFM P - Q	BX P - Q	FCDMAPE
IEEEER - 13	3 2	4 3	3 3	3 2	2
IEEEER - 34	nc	nc	78 78	97 97	2
IEEEER - 37	5 5	6 7	6 6	5 4	2
IEEEER - 123	nc	nc	nc	nc	2
PAR - 51	nc	nc	nc	nc	5
MRC - 60	nc	nc	nc	nc	6

nc: A convergência do sistema não foi obtida.

A tabela 5.3 apresenta o maior autovalor, Cond e Rcond para as matrizes [E] e [B'''] do sistema IEEEER com treze barras, simulados com os fluxos NDPFM e

FCDMAPE. Os outros sistemas simulados tendem a apresentar tendências idênticas de resultados.

Tabela 5.3 - Raio espectral (RE), Cond e Rcond - sistema IEEE802.11b

Método de fluxo de potência	Matriz [E]			Matriz [B ^{'''}]		
	Rcond ⁻⁶	Cond ⁴	RE	Rcond ⁻⁶	Cond ⁴	RE
NDPDM	4,10 ⁻³	2,10 ²	0,99	2,10 ⁻³	3,10 ²	0,99
FCDMAPE -sub1	5,10 ⁻³	1,10 ²	0,96	4,10 ⁻³	1,10 ²	0,97
FCDMAPE -sub2	1,10 ⁻³	6,10 ²	0,61	1,10 ⁻³	6,10 ²	0,61

Algumas conclusões gerais, podem ser tiradas dos resultados das tabelas 1, 2 e 3: 1) O Fluxo de carga desacoplado modificado com acumulação de potências equivalentes pode ser usado como um método alternativo para simular sistemas de distribuição, tendo como objetivo o planejamento desses sistemas; 2) As matrizes dos métodos desacoplados, estudados neste capítulo, são mal-condicionadas e portanto, sensíveis a erros de arredondamento.

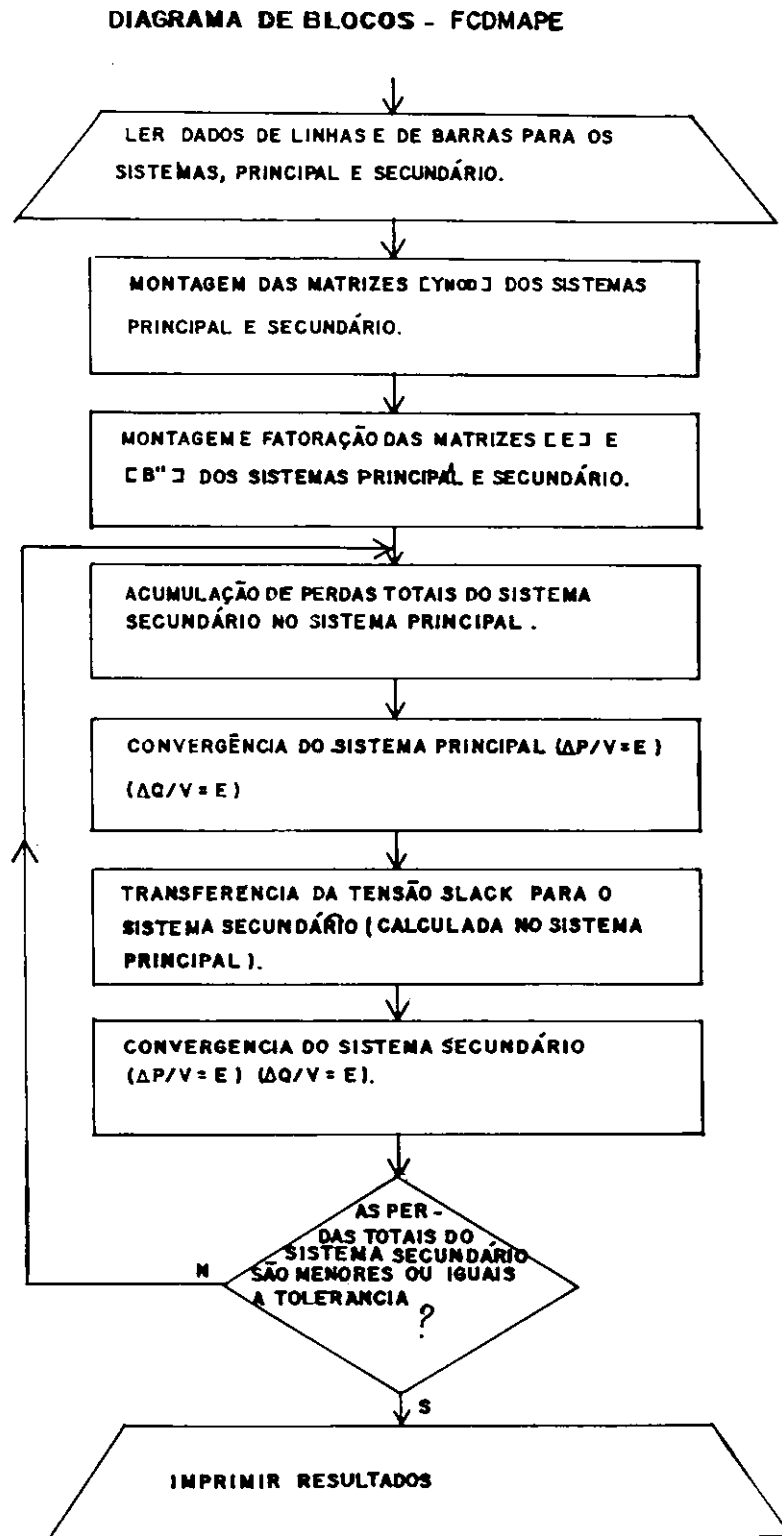


Figura 5.2 - Fluxograma do FCDMAPE

A tabela 5.4 mostra os resultados de módulos e ângulos de tensões para o sistema IEEEER com treze barras, obtidos com FCDMAPE.

Tabela 5.4 - Resultados de módulos e ângulos de tensões - sistema IEEE - 13

Número da barra	Módulo de tensão (pu)	Ângulo de tensão (graus)
50	1.000	0.000
32	1.007	-1.555
33	1.007	-1.557
34	1.007	-1.560
45	1.006	-1.560
46	1.006	-1.563
71	1.001	-2.115
92	1.001	-2.116
75	1.000	-2.164
84	1.000	-2.126
911	1.000	-2.137
52	1.000	-2.132
150	1.001	-2.115

5.5. Conclusão

Foi desenvolvido, neste capítulo, um fluxo de carga desacoplado.

A sequência de barras e o tamanho de sistemas de distribuição mal-condicionados, que usam rotinas de bifatoração, influenciam a convergência destes mesmos sistemas.

Os resultados obtidos com o FCDMAPE mostram que o mesmo é eficiente na simulação de sistemas de distribuição, constituindo-se assim, como uma alternativa para a simulação destes.

CAPÍTULO 6

FLUXO DE CARGA DESACOPLADO TRIFÁSICO UTILIZANDO CIRCUITOS POR FASE

Resumo

Neste capítulo, inicialmente, desenvolve-se modelos de circuitos por fase. Os componentes do sistema são modelados por seus circuitos equivalentes em termos de indutância, capacitância e resistência. As correntes de neutro e cabo pára-raios são consideradas de maneira rigorosa e as impedâncias mútuas são consideradas de forma aproximada. Em seguida, é explicado o método de solução do fluxo de carga trifásico. Resultados do sistema radial do IEEE com treze barras são apresentados. Estes resultados comprovam a utilização do fluxo de carga proposto em estudos de operação e planejamento de sistemas de distribuição utilizando computadores pessoais do tipo PC.

6.1. Introdução

É um fato bastante conhecido que os requisitos computacionais para a simulação de um fluxo de carga trifásico são maiores do que aqueles utilizados para a simulação de um fluxo de carga monofásico. Além desse fato, em sistemas de distribuição, aumentam os problemas de convergência, quando é executado a simulação do fluxo de carga trifásico. Pois, devido a configuração predominantemente radial do sistema de distribuição, a matriz de admitância nodal

ou as matrizes dos fluxos desacoplados são fracamente dominantes. Este fato é agravado, usando-se os tradicionais modelos trifásicos acoplados através das impedâncias mútuas.

Neste capítulo apresenta-se um fluxo de carga trifásico desacoplado por fase. As correntes de neutro e cabo pára-raios são consideradas de maneira rigorosa e as impedâncias mútuas são consideradas de forma aproximada. Dessa maneira pode-se obter um fluxo de carga fácil de programar, de grande velocidade e boa confiabilidade de convergência. Além disso, tem-se um fluxo de carga que pode ser implementado em computadores pessoais.

Os modelos descritos, neste capítulo, incluem: linhas de distribuição primárias e secundárias; transformadores estrela aterrada-estrela aterrada; cogeradores, cargas e capacitores em derivação. Com esses modelos é possível realizar estudos de fluxo de carga em sistemas de distribuição, que envolvem: a simulação de cargas dependentes da tensão; análise das perdas do sistema e das perdas nos ramos; análise de contingências; análise de sistemas com ramos monofásicos, bifásicos e trifásicos simultaneamente; análise de sistemas desequilibrados; análise do carregamento das linhas de distribuição; análise do efeito de capacitores em derivação; análise do fenômeno de aumento de tensão devido à influência das impedâncias mútuas; simulação de transformadores com ligação estrela aterrada-estrela aterrada e simulação de cogeradores nas linhas primárias e secundárias. Dessa forma o fluxo de carga proposto pode ser usado na análise do planejamento e da operação de sistemas de distribuição.

O método de solução é derivado do fluxo de carga desacoplado modificado com acumulação de potências equivalentes, descrito no capítulo anterior.

A seguir é descrito a modelagem dos componentes usados no fluxo de carga proposto. No item 6.3 descreve-se o processo de solução. No item 6.4 apresenta-se resultados numéricos e finalmente as conclusões são formalizadas.

6.2. Modelagem dos componentes

Em análise de sistemas de distribuição, os componentes individuais são representados matematicamente para simular de maneira aproximada seus comportamentos físicos. Neste capítulo, os componentes são modelados por seus circuitos equivalentes em termos de indutância, capacitância e resistência. Uma representação individual, por fase, é usada para todos os componentes.

Como já descrito no item anterior, os modelos incluem linhas de distribuição primárias e secundárias, transformadores ligados estrela aterrada-estrela aterrada, cogeneradores, cargas e capacitores em derivação. Todos esses componentes podem ser modelados, de maneira tradicional [Arrilaga & Arnold, 1983], [Arrilaga & Harker, 1978], [Chen & Dillon, 1974], [Chen et alii, 1991], [Fuchs, 1977], [Gorman & Grainger, 1992 - 1, 1992 - 2], [Saleh & Laughton & Stone, 1985], através de circuitos trifásicos equivalentes. Neste capítulo, um esforço de pesquisa permitiu tratar os componentes através de circuitos, por fase, abrindo a possibilidade para aplicações do método proposto em estudos de fluxo de carga trifásico, com processamento paralelo e distribuído [Baran & Kaszkurewicz & Falcão, 1995].

A. Linhas de distribuição primárias e secundárias

Os parâmetros das linhas de distribuição são calculados das características geométricas das linhas [Fuchs, 1977]. Os parâmetros calculados são expressos como impedâncias série e admitâncias em derivação por unidade de comprimento da linha. Os efeitos das correntes de neutro e do cabo pára-raios estão incluídos nos cálculos desses parâmetros.

(1) Impedância série

Uma linha de distribuição trifásica com neutro e um cabo pára-raios é mostrado na figura 6.1(a). As equações seguintes podem ser escritas para a fase "a".

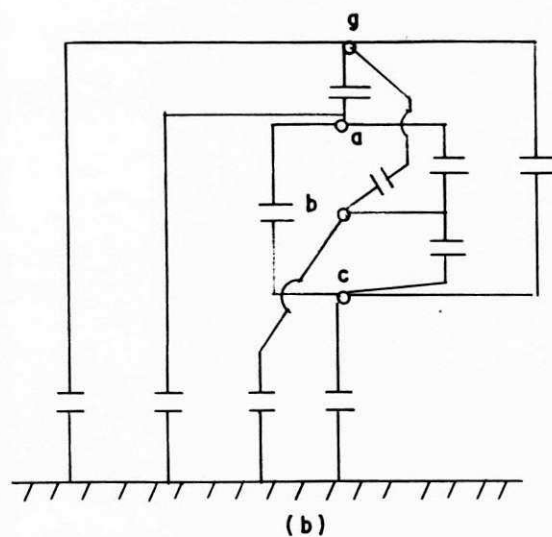
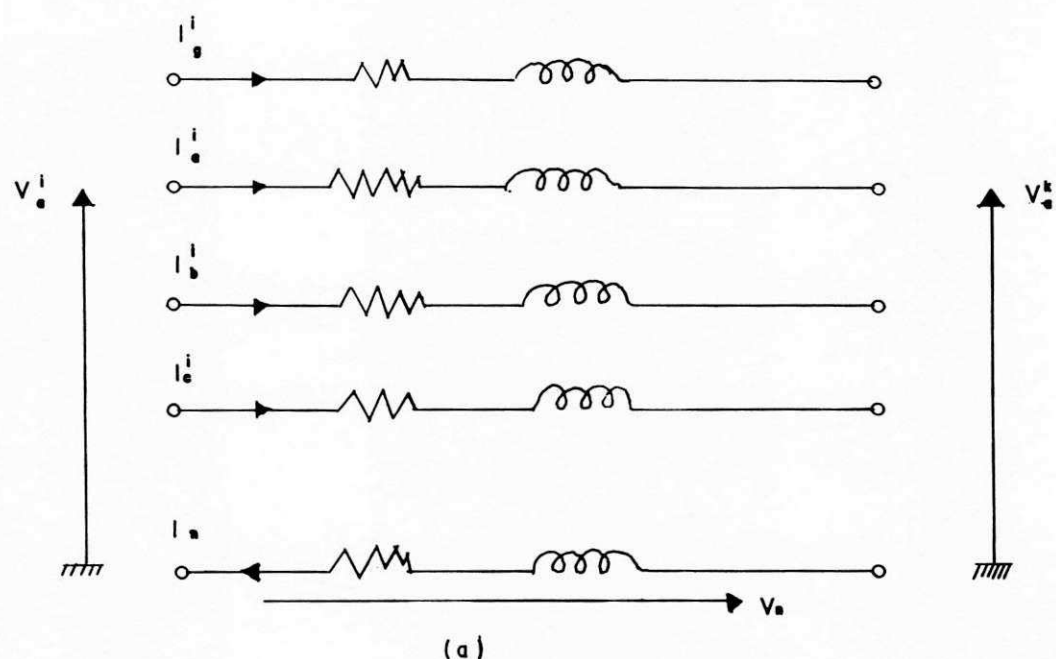


Figura 6.1(a) - Impedância série equivalente de uma linha de distribuição trifásica.

(b) - Impedância em derivação equivalente de uma linha de distribuição trifásica.

$$V_a^i - V_a^k = I_a^i(R_a + j\omega L_a) + I_b^i(j\omega L_{ab}) + I_c^i(j\omega L_{ac}) + I_g^i(j\omega L_{ag}) - I_n^i(j\omega L_{an}) + V_n^i \quad (6.1)$$

com

$$V_n = I_n^i(R_n + j\omega L_n) - I_a^i j\omega L_{na} - I_b^i j\omega L_{nb} - I_c^i j\omega L_{nc} - I_g^i j\omega L_{ng} \quad (6.2)$$

e

$$I_n^i = I_a^i + I_b^i + I_c^i + I_g^i \quad (6.3)$$

Substituindo-se (6.3) em (6.1) vem:

$$V_a^i - V_a^k = I_a^i(R_a + j\omega L_a) + (I_b^i j\omega L_{ab}) + (I_c^i j\omega L_{ac}) + (I_g^i j\omega L_{ag}) - j\omega L_{an}(I_a^i + I_b^i + I_c^i + I_g^i) + V_n^i \quad (6.4)$$

Reagrupando e substituindo-se (6.2) em (6.4), vem:

$$\begin{aligned} \Delta V_a &= V_a^i - V_a^k = \\ &= I_a^i(R_a + j\omega L_a - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n - j\omega L_{na}) + \\ &+ I_b^i(j\omega L_{ab} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n - j\omega L_{nb}) + \\ &+ I_c^i(j\omega L_{ac} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n - j\omega L_{nc}) + \\ &+ I_g^i(j\omega L_{ag} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n - j\omega L_{ng}) \\ \\ \Delta V_a &= I_a^i(R_a + j\omega L_a - 2j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n) + \\ &+ I_b^i(j\omega L_{ab} - j\omega L_{bn} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n) + \\ &+ I_c^i(j\omega L_{ac} - j\omega L_{cn} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n) + \\ &+ I_g^i(j\omega L_{ag} - j\omega L_{gn} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n) \end{aligned}$$

ou

$$\Delta V_a = Z_{aa} - nI_a^i + Z_{ab} - nI_b^i + Z_{ac} - nI_c^i + Z_{ag} - nI_g^i$$

e escrevendo equações semelhantes para as outras fases resulta a equação matricial

(6.6) seguinte:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \\ \Delta V_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa-n} & Z_{ab-n} & Z_{ac-n} & Z_{ag-n} \\ Z_{ba-n} & Z_{bb-n} & Z_{bc-n} & Z_{bg-n} \\ Z_{ca-n} & Z_{cb-n} & Z_{cc-n} & Z_{cg-n} \\ Z_{ga-n} & Z_{gb-n} & Z_{gc-n} & Z_{gg-n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^i \\ I_b^i \\ I_c^i \\ I_g^i \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Como o interesse é na análise dos condutores de fase é mais conveniente o uso de três condutores equivalentes para linhas de distribuição. Isto é feito escrevendo a equação matricial (6.6) em forma particionada como a seguir.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{abc} \\ \Delta V_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A & Z_B \\ Z_C & Z_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc}^i \\ I_g^i \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

De (6.7)

$$\Delta V_{abc} = Z_A I_{abc}^i + Z_B I_g^i \quad (6.8)$$

$$\Delta V_g = Z_C I_{abc}^i + Z_D I_g^i \quad (6.9)$$

Das equações (6.7) e (6.8) e supondo que o cabo de terra está no potencial zero, vem:

$$\Delta V_{abc} = Z_{abc} I_{abc}^i \quad (6.10)$$

onde:

$$Z_{abc} = Z_A - Z_B Z_D^{-1} Z_C = \begin{bmatrix} Z'_{aa-n} & Z'_{ab-n} & Z'_{ac-n} \\ Z'_{ba-n} & Z'_{bb-n} & Z'_{bc-n} \\ Z'_{ca-n} & Z'_{cb-n} & Z'_{cc-n} \end{bmatrix}$$

(2) Admitância em derivação.

De acordo com a figura 6.1(b) e conforme a referência [Arrilaga & Arnold, 1983] pode-se escrever a matriz de admitância seguinte, com os efeitos do cabo pára-raios já considerado.

$$Y_{abc} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

Para linhas de distribuição, devido ao nível de tensão, o efeito capacitivo das mútuas pode ser desprezado. Assim a equação (6.11) pode ser escrita como:

$$Y_{abc} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{cc} \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

As linhas de distribuição primárias e secundárias podem, então, ser representadas pelo modelo π mostrado na figura 6.2. Para as linhas secundárias as capacitâncias em derivação podem ser desprezadas devido à baixa tensão na linha secundária.

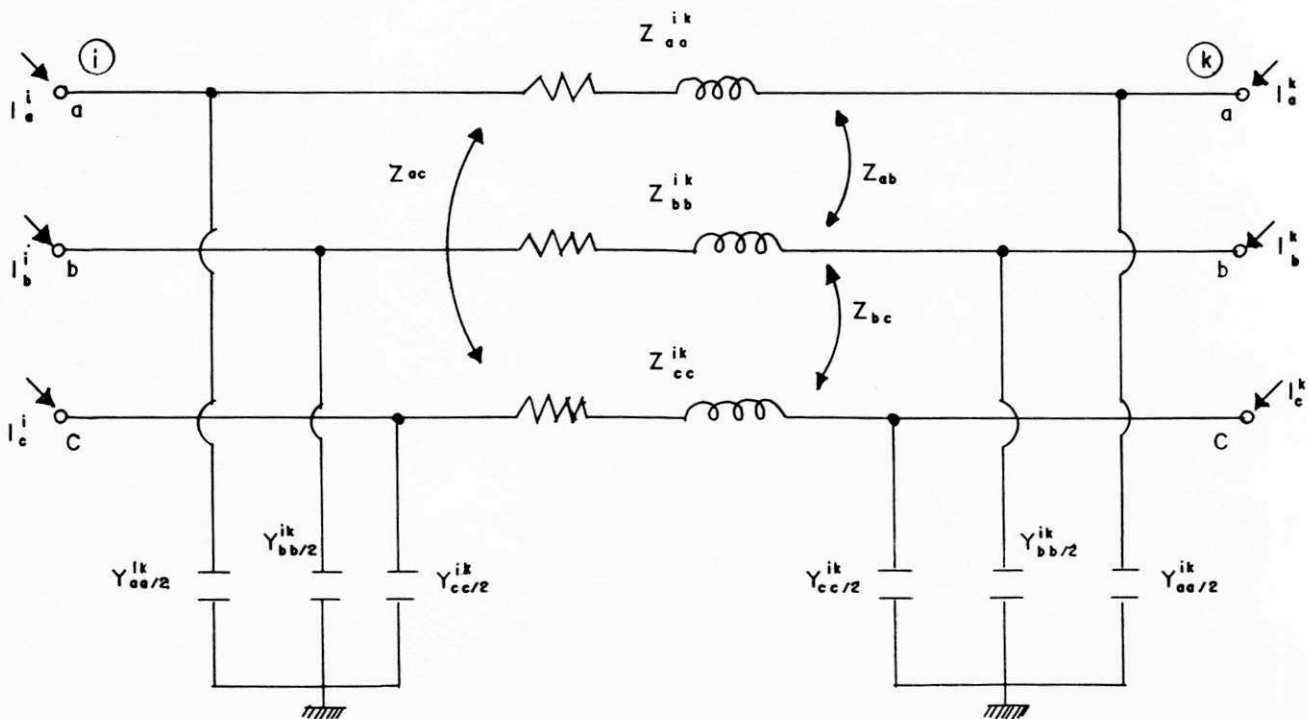


Figura 6.2 - Modelo π para representação de uma linha de distribuição trifásica.

Seguindo as regras de formação da matriz de admitância nodal, dadas na referência [Arrilaga & Arnold, 1983], a relação entre as correntes injetadas nos nós i e k e as correspondentes tensões nodais, podem ser escritas como na equação (6.13) abaixo.

$$\begin{bmatrix} I_a^i \\ I_b^i \\ I_c^i \\ I_a^i \\ I_b^i \\ I_c^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} & -Y_{aa} & -Y_{ab} & -Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} & -Y_{ba} & -Y_{bb} & -Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} & -Y_{ca} & -Y_{cb} & -Y_{cc} \\ -Y_{aa} & -Y_{ab} & -Y_{ac} & Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ -Y_{ba} & -Y_{bb} & -Y_{bc} & Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ -Y_{ca} & -Y_{cb} & -Y_{cc} & Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^i \\ V_b^i \\ V_c^i \\ V_a^i \\ V_b^i \\ V_c^i \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

Se as impedâncias mútuas forem desprezadas no modelo π da linha de distribuição, a equação seguinte pode ser escrita:

$$\begin{bmatrix} I_a^i \\ I_b^i \\ I_c^i \\ I_a^i \\ I_b^i \\ I_c^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & 0 & 0 & -Y_{aa} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{bb} & 0 & 0 & -Y_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{cc} & 0 & 0 & -Y_{cc} \\ -Y_{aa} & 0 & 0 & Y_{aa} & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{bb} & 0 & 0 & Y_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & -Y_{cc} & 0 & 0 & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^i \\ V_b^i \\ V_c^i \\ V_a^i \\ V_b^i \\ V_c^i \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

As impedâncias mútuas serão consideradas, no próximo item, quando é feito o desenvolvimento do algoritmo de solução do fluxo de carga trifásico.

De acordo com a equação (6.14) pode-se modelar a linha de distribuição trifásica através de três circuitos por fase, mostrados na figura 6.3.

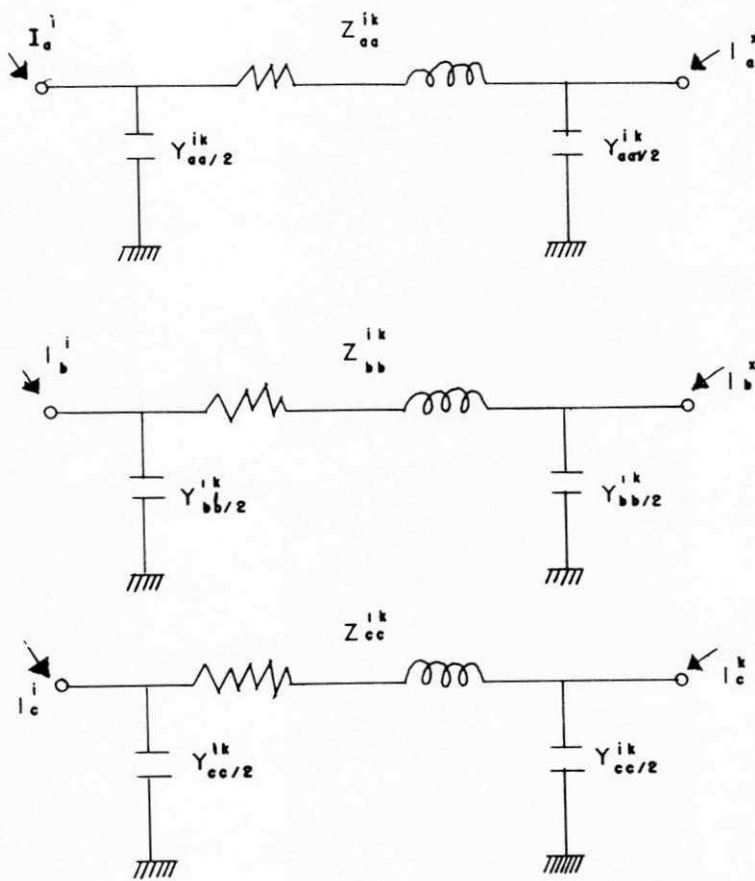


Figura 6.3 - Modelo de linha de distribuição trifásica através de circuitos por fase.

B. Transformadores ligados em estrela aterrada-estrela aterrada

A ligação de transformadores trifásicos mais simples, em termos de implementação computacional, é a conexão estrela aterrada-estrela aterrada. A figura 6.4 mostra o circuito para esta conexão.

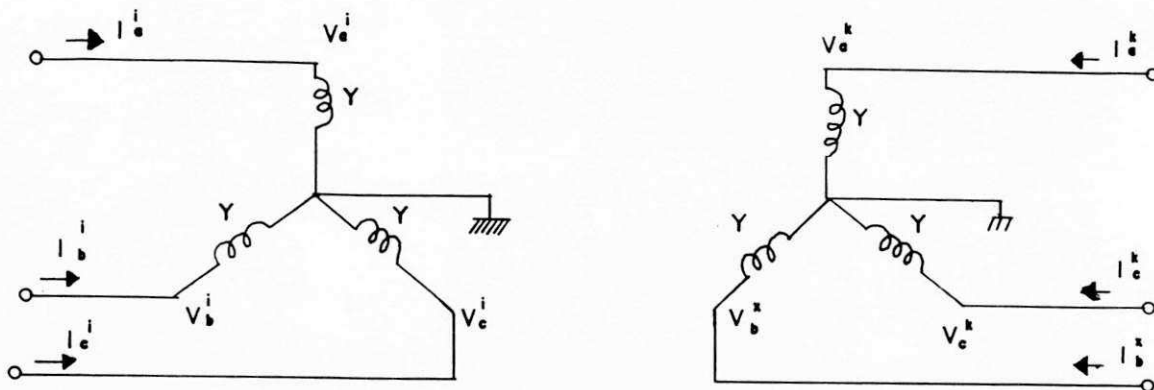


Figura 6.4 - Diagrama de conexões de um transformador ligado estrela aterrada-estrela aterrada.

De acordo com a referência [Arrilaga & Arnold, 1983], a relação entre as correntes injetadas e as tensões nodais, já considerando os taps fora do nominal nos lados primário e secundário é mostrada na equação (6.15) a seguir.

$$\begin{bmatrix} I_a^i \\ I_b^i \\ I_c^i \\ I_a^k \\ I_b^k \\ I_c^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y/\alpha^2 & 0 & 0 & -Y/\alpha\beta & 0 & 0 \\ 0 & Y/\alpha^2 & 0 & 0 & -Y/\alpha\beta & 0 \\ 0 & 0 & Y/\alpha^2 & 0 & 0 & -Y/\alpha\beta \\ -Y/\alpha\beta & 0 & 0 & Y/\beta^2 & 0 & 0 \\ 0 & -Y/\alpha\beta & 0 & 0 & Y/\beta^2 & 0 \\ 0 & 0 & -Y/\alpha\beta & 0 & 0 & -Y/\beta^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^i \\ V_b^i \\ V_c^i \\ V_a^k \\ V_b^k \\ V_c^k \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

A partir da equação (6.15) pode-se modelar o transformador com ligação estrela aterrada-estrela aterrada através de três circuitos por fase, mostrados na figura 6.5.

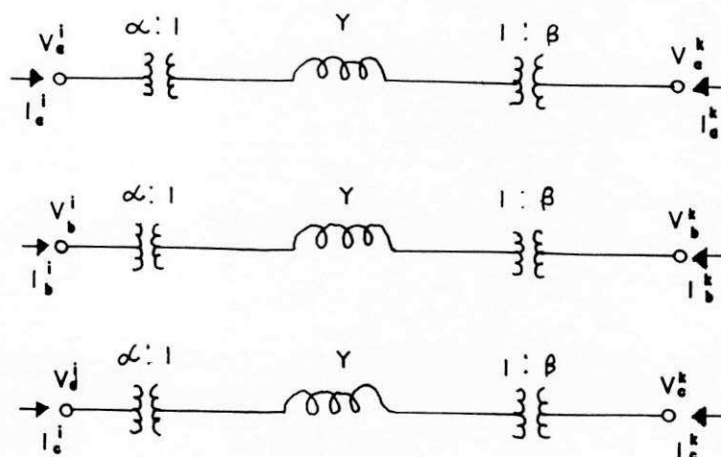


Figura 6.5 - Modelo de transformador trifásico estrela aterrada-estrela aterrada, por meio de circuitos por fase.

C. Capacitores em derivação

Capacitores em derivação são usados em sistemas de distribuição para controle de potência reativa. Os valores para esses componentes são usualmente dados em termos de potência aparente em Mva e tensão em Kv; a admitância equivalente, em cada fase, é calculada a partir desses dados. A figura 6.6 mostra o diagrama de conexões para um banco de capacitores.

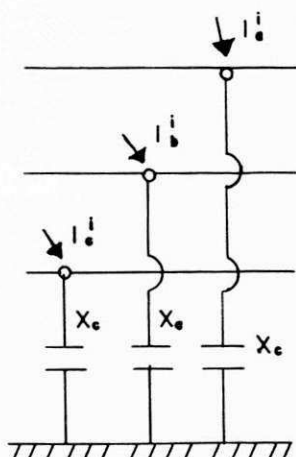


Figura 6.6 - Diagrama de conexões de um banco de capacitores trifásicos.

De acordo com a referência [Arrilaga & Arnold, 1983], a relação entre as correntes injetadas e as tensões nodais está mostrada na equação seguinte:

$$\begin{bmatrix} I_a^i \\ I_b^i \\ I_c^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/X_c & 0 & 0 \\ 0 & 1/X_c & 0 \\ 0 & 0 & 1/X_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^i \\ V_b^i \\ V_c^i \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

De acordo com a equação (6.16), pode-se modelar o banco de capacitores trifásicos através de três circuitos por fase, mostrados na figura 6.7.

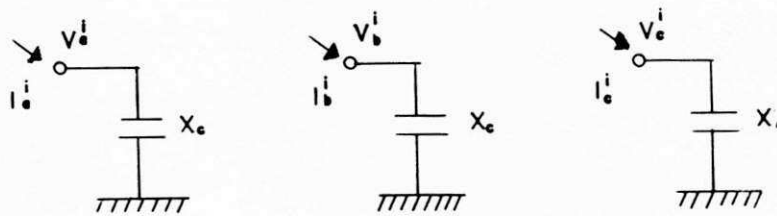


Figura 6.7 - Modelo de um banco de capacitores trifásicos, por meio de circuitos por fase.

D. Cogeneradores

Cogeneradores síncronos são controlados para manter a potência gerada e o fator de potência constante através dos reguladores de tensão [Chen et alii, 1991-1] e [Kosow, 1977]. Como resultado, os cogeneradores síncronos podem ser modelados aproximadamente como equipamentos que fornecem uma potência aparente constante. Assim, para os cogeneradores síncronos especifica-se as potências ativa e reativa.

Cogeneradores de indução têm sua potência reativa variando com a tensão terminal. Assim, a potência reativa nos cogeneradores de indução não é exatamente

constante. Para simplificar o modelo, os cogeradores de indução podem ser tratados por potências ativa e reativa constante, devido às tensões de barras serem próximas de 1.0 pu. Como consequência, ambos cogeradores síncronos e de indução podem ser modelados através de potências ativa e reativa constantes.

E. Cargas

As cargas são representadas por suas potências ativa (P_o) e reativa (Q_o) para 1.0 pu. O efeito da variação de tensão é representado como a seguir:

$$\begin{aligned} P &= P_o \cdot V^k \\ Q &= Q_o \cdot V^k \end{aligned} \tag{6.17}$$

onde:

V é o módulo de tensão

$k = 0$, para cargas com potência constante.

$k = 1$, para cargas com corrente constante.

$k = 2$, para cargas com impedância constante.

A construção da matriz de impedância através dos circuitos por fase, pode ser feito como nos tradicionais estudos de fluxo de carga monofásicos. O processo é fácil e extremamente eficiente. A idéia de trabalhar com circuitos por fase, evita o uso de matrizes cheias e facilita o cálculo do fluxo de carga trifásico em computadores pessoais.

6.3. Método de solução

O método iterativo usado na solução do fluxo de carga trifásico é o método desacoplado modificado com acumulação de potências equivalentes, já descrito no capítulo 5. Este método é aplicado por fase e as equações usadas são reescritas a seguir:

$$\theta_{k+1} = \theta_k - [V_k]^{-1} [E] [V_k]^{-1} [\Delta P(\theta_k, V_k)]$$

$$V_{k+1} = V_k - [B''']^{-1} [V_k]^{-1} [\Delta P(\theta_{k+1}, V_k) + \Delta Q(\theta_{k+1}, V_k)]$$

Para o cálculo do efeito das impedâncias mútuas, de forma aproximada, procede-se da seguinte maneira:

Da equação (6.10) têm-se que a contribuição das mútuas para o cálculo de tensão é dado pelas equações (6.20), (6.21) e (6.22).

$$V_{ma} = Z'_{ab-n} I_b^i + Z'_{ac-n} I_c^i \quad (6.20)$$

$$V_{mb} = Z'_{ba-n} I_a^i + Z'_{bc-n} I_c^i \quad (6.21)$$

$$V_{mc} = Z'_{ca-n} I_a^i + Z'_{cb-n} I_b^i \quad (6.22)$$

Para o cálculo das correntes I_a^i, I_b^i, I_c^i utiliza-se a equação (6.11). Da mesma pode-se escrever:

$$I_a^i = Y_{aa} V_a^i + Y_{ab} V_b^i + Y_{ac} V_c^i - Y_{aa} V_a^i - Y_{ab} V_b^i - Y_{ac} V_c^i$$

$$= (G_{aa} + jB_{aa})(|V_a^i| \angle \theta_a^i - |V_a^k| \angle \theta_a^k) + (G_{ab} + jB_{ab})(|V_b^i| \angle \theta_b^i - |V_b^k| \angle \theta_b^k)$$

$$+(G_{ac} + jB_{ac})(|V_c^i| \angle \theta_c^i - |V_c^k| \angle \theta_c^k)$$

onde: θ_a , θ_b e θ_c são os ângulos de tensões nas barras i ou k; G_{aa} , G_{ab} , G_{ac} são as partes reais dos elementos de admitância; B_{aa} , B_{ab} e B_{ac} são as partes imaginárias dos elementos de admitância.

Separando-se as partes reais e imaginárias e escrevendo-se variáveis auxiliares, vem:

$$Aux = (|V_a^i| - |V_a^k|) \sqrt{G_{aa}^2 + B_{aa}^2}$$

$$Aux1 = (|V_b^i| - |V_b^k|) \sqrt{G_{ab}^2 + B_{ab}^2}$$

$$Aux2 = (|V_c^i| - |V_c^k|) \sqrt{G_{ac}^2 + B_{ac}^2}$$

$$Aux3 = \cos \alpha - \cos \alpha'''$$

$$Aux4 = \cos \gamma - \cos \gamma'''$$

$$Aux5 = \cos \phi - \cos \phi'''$$

$$Aux6 = \sin \alpha - \sin \alpha'''$$

$$Aux7 = \sin \gamma - \sin \gamma'''$$

$$Aux8 = \sin \phi - \sin \phi'''$$

$$|I_a^i| = Aux + Aux1 + Aux2 \quad (6.23)$$

$$\beta_a = \arctg \left[\frac{(Aux6.Aux + Aux7.Aux2 + Aux8.Aux2)}{(Aux3.Aux + Aux4.Aux1 + Aux5.Aux2)} \right] \quad (6.24)$$

onde:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{B_{aa}}{G_{aa}} \right) + \theta_a^i$$

$$\alpha''' = \arctg \left(\frac{B_{aa}}{G_{aa}} \right) + \theta_a^k$$

$$\gamma = \arctg \left(\frac{B_{ab}}{G_{ab}} \right) + \theta_b^i$$

$$\gamma''' = \arctg (B_{ab}/G_{ab}) + \theta_b^k$$

$$\varphi = \arctg (B_{ac}/G_{ac}) + \theta_c^i$$

$$\varphi''' = \arctg (B_{ac}/G_{ac}) + \theta_c^k$$

Analogamente, escreve-se as equações para as fases " b " e " c ".

Para a fase " b " as variáveis auxiliares são as seguintes:

$$\text{Aux9} = (|V_b^i| - |V_b^k|) \sqrt{G_{bb}^2 + B_{bb}^2}$$

$$\text{Aux10} = (|V_a^i| - |V_a^k|) \sqrt{G_{ab}^2 + B_{ab}^2}$$

$$\text{Aux11} = (|V_c^i| - |V_c^k|) \sqrt{G_{bc}^2 + B_{bc}^2}$$

$$\text{Aux12} = \cos \alpha_1 - \cos \alpha_1'''$$

$$\text{Aux13} = \cos \gamma_1 - \cos \gamma_1'''$$

$$\text{Aux14} = \cos \varphi_1 - \cos \varphi_1'''$$

$$\text{Aux15} = \sin \alpha_1 - \sin \alpha_1'''$$

$$\text{Aux16} = \sin \gamma_1 - \sin \gamma_1'''$$

$$\text{Aux17} = \sin \varphi_1 - \sin \varphi_1'''$$

Logo,

$$|I_b^i| = \text{Aux9} + \text{Aux10} + \text{Aux11} \quad (6.25)$$

$$\beta_b = \arctg [(\text{Aux15}.\text{Aux9} + \text{Aux16}.\text{Aux10} + \text{Aux17}.\text{Aux11}) / (\text{Aux12}.\text{Aux9} + \text{Aux13}.\text{Aux10} + \text{Aux14}.\text{Aux11})] \quad (6.26)$$

onde:

$$\alpha_1 = \arctg (B_{bb}/G_{bb}) + \theta_b^i$$

$$\alpha_1''' = \arctg (B_{bb}/G_{bb}) + \theta_b^k$$

$$\gamma_1 = \arctg (B_{ab}/G_{ab}) + \theta_a^i$$

$$\gamma 1''' = \arctg (B_{ab}/G_{ab}) + \theta_a^k$$

$$\phi 1 = \arctg (B_{bc}/G_{bc}) + \theta_c^i$$

$$\phi 1''' = \arctg (B_{bc}/G_{bc}) + \theta_c^k$$

As variáveis auxiliares, para as equações da fase " c ", são escritas a seguir:

$$\text{Aux18} = (|V_c^i| - |V_c^k|) \sqrt{G_{cc}^2 + B_{cc}^2}$$

$$\text{Aux19} = (|V_a^i| - |V_a^k|) \sqrt{G_{ac}^2 + B_{ac}^2}$$

$$\text{Aux20} = (|V_b^i| - |V_b^k|) \sqrt{G_{bc}^2 + B_{bc}^2}$$

$$\text{Aux21} = \cos \alpha 2 - \cos \alpha 2'''$$

$$\text{Aux22} = \cos \gamma 2 - \cos \gamma 2'''$$

$$\text{Aux23} = \cos \phi 2 - \cos \phi 2'''$$

$$\text{Aux24} = \sin \alpha 2 - \sin \alpha 2'''$$

$$\text{Aux25} = \sin \gamma 2 - \sin \gamma 2'''$$

$$\text{Aux26} = \sin \phi 2 - \sin \phi 2'''$$

Logo,

$$|I_c^i| = \text{Aux18} + \text{Aux19} + \text{Aux20} \quad (6.27)$$

$$\beta_c = \arctg [(\text{Aux24}.\text{Aux18} + \text{Aux25}.\text{Aux19} + \text{Aux26}.\text{Aux20}) / (\text{Aux21}.\text{Aux18} + \text{Aux22}.\text{Aux19} + \text{Aux23}.\text{Aux20})] \quad (6.28)$$

onde:

$$\alpha 2 = \arctg (B_{cc}/G_{cc}) + \theta_c^i$$

$$\alpha 2''' = \arctg (B_{cc}/G_{cc}) + \theta_c^k$$

$$\gamma 2 = \arctg (B_{ac}/G_{ac}) + \theta_a^i$$

$$\gamma 2''' = \arctg (B_{ac}/G_{ac}) + \theta_a^k$$

$$\phi 2 = \arctg (B_{bc}/G_{bc}) + \theta_b^i$$

$$\phi 2''' = \arctg (B_{bc}/G_{bc}) + \theta_b^k$$

Substituindo-se as equações (6.23), (6.24), (6.25), (6.26), (6.27) e (6.28) nas equações (6.20), (6.21) e (6.22) e separando-se as partes reais e imaginárias obtém-se as equações, em módulo e ângulo, das tensões devido as impedâncias mútuas. Para escrever as equações das tensões devido às mútuas, usa-se novamente, variáveis auxiliares. Logo,

$$\text{Aux28} = \sqrt{R_{ab}^2 + X_{ab}^2}$$

$$\text{Aux29} = \sqrt{R_{ac}^2 + X_{ac}^2}$$

$$\text{Aux30} = \sqrt{R_{bc}^2 + X_{bc}^2}$$

$$\text{Aux31} = \cos (\beta_a + \arctg(X_{ab}/R_{ab}))$$

$$\text{Aux32} = \cos (\beta_b + \arctg(X_{ab}/R_{ab}))$$

$$\text{Aux33} = \cos (\beta_c + \arctg(X_{bc}/R_{bc}))$$

$$\text{Aux34} = \cos (\beta_a + \arctg(X_{ac}/R_{ac}))$$

$$\text{Aux35} = \cos (\beta_b + \arctg(X_{bc}/R_{bc}))$$

$$\text{Aux36} = \cos (\beta_c + \arctg(X_{ac}/R_{ac}))$$

$$\text{Aux37} = \sin (\beta_a + \arctg(X_{ab}/R_{ab}))$$

$$\text{Aux38} = \sin (\beta_b + \arctg(X_{ab}/R_{ab}))$$

$$\text{Aux39} = \sin (\beta_c + \arctg(X_{bc}/R_{bc}))$$

$$\text{Aux40} = \sin (\beta_a + \arctg(X_{ac}/R_{ac}))$$

$$\text{Aux41} = \sin (\beta_b + \arctg(X_{bc}/R_{bc}))$$

$$\text{Aux42} = \sin (\beta_c + \arctg(X_{ac}/R_{ac}))$$

As equações das tensões mútuas são:

$$|V_{ma}| = \sqrt{(Aux28.Aux32.|I_b| + Aux29.Aux36.|I_c|)^2 + (Aux28.Aux38.|I_b| + Aux29.Aux42.|I_c|)^2} \quad (6.29)$$

$$\theta_{ma} = \arctg \left[\frac{(Aux28.Aux38.|I_b| + Aux29.Aux42.|I_c|)}{(Aux28.Aux32.|I_b| + Aux29.Aux36.|I_c|)} \right] \quad (6.30)$$

$$|V_{mb}| = \sqrt{(Aux28.Aux31.|I_a| + Aux30.Aux33.|I_c|)^2 + (Aux28.Aux37.|I_a| + Aux30.Aux39.|I_c|)^2} \quad (6.31)$$

$$\theta_{mb} = \arctg \left[\frac{(Aux28.Aux37.|I_a| + Aux30.Aux39.|I_c|)}{(Aux28.Aux31.|I_a| + Aux30.Aux33.|I_c|)} \right] \quad (6.32)$$

$$|V_{mc}| = \sqrt{(Aux29.Aux34.|I_a| + Aux30.Aux35.|I_b|)^2 + (Aux29.Aux40.|I_a| + Aux30.Aux41.|I_b|)^2} \quad (6.33)$$

$$\theta_{mc} = \arctg \left[\frac{(Aux29.Aux40.|I_a| + Aux30.Aux41.|I_b|)}{(Aux29.Aux34.|I_a| + Aux30.Aux35.|I_b|)} \right] \quad (6.34)$$

onde:

Rab é a parte real da impedância mútua de uma linha de distribuição, entre as fases "a" e "b"; Xab é a parte imaginária da impedância mútua de uma linha de distribuição, entre as fases "a" e "b"; Rac é a parte real da impedância mútua de uma linha de distribuição, entre as fases "a" e "c"; Xac é a parte imaginária da impedância mútua de uma linha de distribuição, entre as fases "a" e "c"; Rbc é a parte real da impedância mútua de uma linha de distribuição, entre as fases "b" e "c"; Xbc é a parte imaginária da impedância mútua de uma linha de distribuição, entre as fases "b" e "c".

Utilizando-se as equações (6.29), (6.30), (6.31), (6.32), (6.33) e (6.34) pode-se obter as tensões em módulo e ângulo com efeito das mútuas, através da soma fasorial seguinte:

$$V_a^i \text{ nova} = V_a^i \text{ antes} + V_{ma}$$

$$|V_a|_{\text{nova}} \angle \theta_{a \text{ nova}} = |V_a|_{\text{antes}} \angle \theta_{a \text{ antes}} + |V_{ma}| \angle \theta_{ma}$$

Separando-se as partes reais e imaginárias vem:

$$|V_a|_{\text{nova}} = \sqrt{[|V_a|_{\text{antes}} \cos \theta_{a \text{ antes}} + |V_{ma}| \cos \theta_{ma}]^2 + [|V_a|_{\text{antes}} \sin \theta_{a \text{ antes}} + |V_{ma}| \sin \theta_{ma}]^2} \quad (6.35)$$

$$\theta_{a \text{ nova}} = \arctg \left[\frac{(|V_a|_{\text{antes}} \sin \theta_{a \text{ antes}} + |V_{ma}| \sin \theta_{ma})}{(|V_a|_{\text{antes}} \cos \theta_{a \text{ antes}} + |V_{ma}| \cos \theta_{ma})} \right] \quad (6.36)$$

onde:

$|V_a|_{\text{antes}}$ é o módulo de tensão de barra sem o efeito das impedâncias mútuas;

$\theta_{a \text{ antes}}$ é o ângulo de tensão de barra sem o efeito das impedâncias mútuas;

$|V_a|_{\text{nova}}$ é o módulo de tensão de barra com o efeito das impedâncias mútuas;

$\theta_{a \text{ nova}}$ é o ângulo de tensão de barra com o efeito das impedâncias mútuas;

$|V_{ma}|$ é o módulo de tensão referente às impedâncias mútuas;

θ_{ma} é o ângulo de tensão referente às impedâncias mútuas.

O fluxograma simplificado do método é mostrado na figura 6.8.

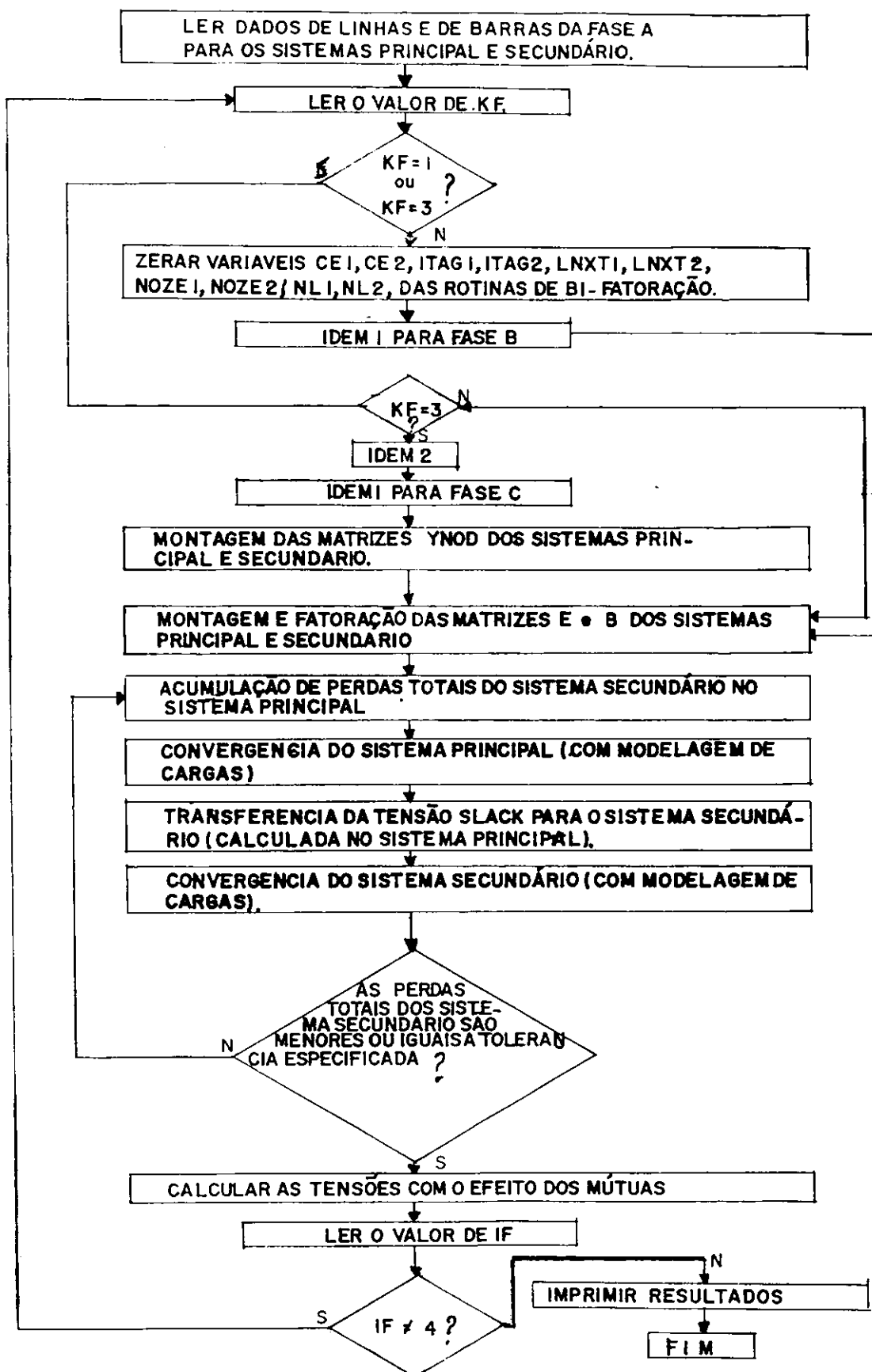


Figura 6.8 - Fluxograma simplificado do fluxo de carga trifásico com circuitos por fase.

6.4. Resultados numéricos

Para demonstrar a eficiência do método proposto, apresenta-se a seguir resultados numéricos do sistema IEEE radial com treze barras, cujo diagrama de conexões está desenhado na figura 6.9.

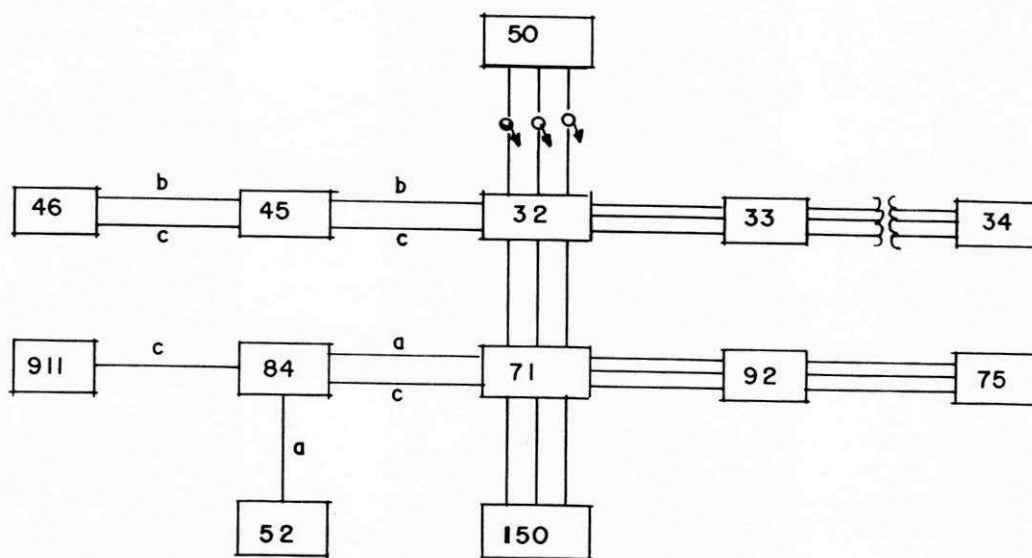


Figura 6.9 - Diagrama trifásico do sistema IEEE-13 barras.

O transformador trifásico entre as barras 33 e 34 é suposto ligado em estrela aterrada-estrela aterrada devido à modelagem desacoplada apresentada no início do capítulo.

Os subsistemas foram compostos de acordo com as seguintes combinações de barras:

Fase " a ": subsistema 1 - barras com números 50, 32, 33, 34, 71 e 150;
subsistema 2 - barras com números 71, 92, 75, 84 e 52.

Fase " b ": subsistema 1 - barras com números 50, 32, 33, 45, 46, 71 e 150;
subsistema 2 - barras com números 71, 92 e 75.

Fase " c ": subsistema 1 - barras com números 50, 32, 33, 34, 45, 46, 71 e 150;
subsistema 2 - barras com números 71, 92, 75, 84 e 911.

O computador usado foi um tipo PC.

Deve-se ressaltar que o fluxo de carga desacoplado rápido trifásico não apresenta convergência, quando simulado com os dados do sistema radial do IEEE com treze barras em um computador do tipo PC.

A tolerância para convergência foi especificada em 10 (-6) p.u. O número de iterações para convergência, em simples e dupla precisão, estão especificadas nas tabelas 6.1 e 6.2 respectivamente.

Tabela 6.1 - Número de iterações para convergência - precisão simples

		Fase a	Fase b	Fase c
		P - Q	P - Q	P - Q
Sistema IEEEER-13	sub1	3 - 3	2 - 2	3 - 4
	sub2	5 - 3	3 - 2	6 - 4

Tabela 6.2 - Número de iterações para convergência - precisão dupla

		Fase a	Fase b	Fase c
		P - Q	P - Q	P - Q
Sistema IEEEER - 13	sub1	3 - 3	2 - 2	2 - 3
	sub2	4 - 3	3 - 2	4 - 3

Os resultados dos módulos de tensões e o grau de desequilíbrio de tensões (tensão de sequencia negativa / tensão de sequencia positiva %), sem a influência das tensões mútuas, estão listados na tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Módulo de tensões (p.u) - grau de desequilíbrio de tensões (%)

Número da barra	fase a	fase b	fase c	Grau de desequilíbrio (%)
50	1.0000	1.0000	1.0000	0.0
32	0.9969	0.9964	0.9940	0.0840
33	0.9916	0.9933	0.9899	0.1109
34	0.9909	0.9918	0.9894	0.1164
45	-	0.9919	0.9940	-
46	-	0.9857	0.9940	-
71	0.9905	0.9959	0.9842	0.5112
92	0.9905	0.9959	0.9842	0.5114
75	0.9864	0.9961	0.9817	0.6107
84	0.9863	-	0.9836	-
52	0.9877	-	-	-
911	-	-	0.9830	-
150	0.9905	0.9959	0.9842	0.5112

Os ângulos de tensões do mesmo sistema, sem a influência das mútuas, estão listados na tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Ângulos de tensões (graus)

Número da barra	fase a	fase b	fase c
50	0.0000	-120.0000	120.0000
32	-1.0481	-120.9002	118.8557
33	-1.2405	-121.0228	118.7272
34	-1.2616	-121.0417	118.7134
45	-	-120.9592	118.8557
46	-	-121.4698	118.8557
71	-1.9561	-121.2441	117.7980
92	-1.9566	-121.2444	117.7977
75	-2.0919	-121.3286	117.7270
84	-1.9788	-	117.7531
52	-1.9648	-	-
911	-	-	117.6962
150	-1.9561	-121.2441	117.7980

Observa-se nas tabelas 6.3 e 6.4 que todas as tensões de barras estão dentro da faixa de operação tolerável (0.95 p.u. - 1.05 p.u.) e que o grau de desequilíbrio das tensões de barra é menor do que 2 %.

A tabela 6.5 mostra os módulos de tensões de barras com influência das mútuas e o grau de desequilíbrio de tensões.

Tabela 6.5 - Módulos de tensões de barra com efeito das impedâncias mútuas e grau de desequilíbrio de tensões.

Número de barra	Módulo de tensões de barra (p.u.)			gr.deseq (%)
	fase a	fase b	fase c	
50	1.0000	1.0000	1.0000	0.0
32	1.0184	0.9827	0.9976	0.3619
33	0.9919	0.9754	1.0008	0.3173
34	0.9909	0.9918	0.9894	0.1164
45	-	0.9919	0.9902	-
46	-	0.9857	0.9886	-
71	1.0010	1.0109	0.9652	1.2135
92	0.9905	0.9959	0.9842	0.5114
75	0.9886	0.9898	0.9869	0.6143
84	0.9898	-	0.9842	-
52	0.9877	-	-	-
911	-	-	0.9830	-
150	0.9905	0.9959	0.9842	0.5112

A tabela 6.6, a seguir, lista os ângulos de tensões com efeito das mútuas.

Tabela 6.6 - Ângulos de tensões com efeito das impedâncias mútuas (graus)

Número da barra	Ângulo de tensão em graus		
	fase a	fase b	fase c
50	0.000	-120.0000	120.0000
32	-0.8567	-120.6840	118.0762
33	-0.2327	-121.1809	117.9629
34	-1.2616	-121.0417	118.7134
45	-	-120.7043	118.7273
46	-	-121.1039	118.6737
71	-1.4022	-120.4796	118.1372
92	-1.9566	-121.2444	117.7977
75	-2.6911	-121.4633	117.4862
84	-2.0360	-	117.7226
52	-1.9648	-	-
911	-	-	117.6962
150	-1.9561	-121.2441	117.7980

Observa-se nas tabelas anteriores, que apesar da influência das impedâncias mútuas, as tensões nas barras se mantém na faixa de 0.95 p.u. a 1.05 p.u. Portanto, o sistema opera do ponto de vista normal.

O fenômeno de aumento de tensão em uma barra pode ser observado, mais detalhadamente, destacando-se os resultados das tensões de barras 32 e 71. Assim, das tabelas 6.5 e 6.6 pode-se formar a tabela 6.7.

Tabela 6.7 - Tensões de barras desequilibradas

Núm. da barra	fase a	fase b	fase c
32	1.0184∠-0.8567	0.9827∠-120.6840	0.9976∠118.0762
71	1.0010∠-1.4022	1.0109∠-120.4796	0.9652∠118.1372
	queda 1.7 %	aumento 2.9 %	queda 3.2 %

A influência de carga da barra 71 na fase " c " é de 1054.34 Kva e na fase " a " é de 841.93 Kva. Já na fase " b " é de 315.17 Kva.

Observando-se a tabela 6.7, ocorre uma queda de tensão maior na fase " c " do que na fase " a ", como já era esperado. O que não era esperado é o fenômeno do aumento de tensão na fase " b ", quando esperava-se uma queda de tensão. Este fenômeno é interessante e é correto. A razão para o aumento de tensão é devido ao acoplamento mútuo entre as fases.

A tabela 6.8, a seguir, contendo as tensões mútuas, permite traçar o diagrama fasorial da figura 6.10, que esclarece visualmente o fenômeno que acontece na barra 71.

Tabela 6.8 - Módulo e ângulo de tensões mútuas, respectivamente em p.u. e em graus.

Número da barra	Módulo e ângulo de tensões mútuas Fase a	fase b	fase c
32	0.0217∠7.95	0.0141∠43.90	0.01402∠43.35
33	0.0174∠88.02	0.0171∠67.69	0.01718∠67.73
34	-	-	-
45	-	0.0044∠-30.93	0.0044∠-30.93
46	-	0.0063∠-31.21	0.0063∠-31.21
71	0.0142∠40.83	0.0201∠-79.04	0.0199∠-78.92
92	-	-	-
75	0.0105∠-80.41	0.0067∠79.14	0.0067∠79.14
84	0.0010∠-80.69	-	0.0008∠76.63
52	-	-	-
911	-	-	-
150	0.1 10(-7)∠79.53	8.2(-8)∠77.87	8.2(-8)∠77.87

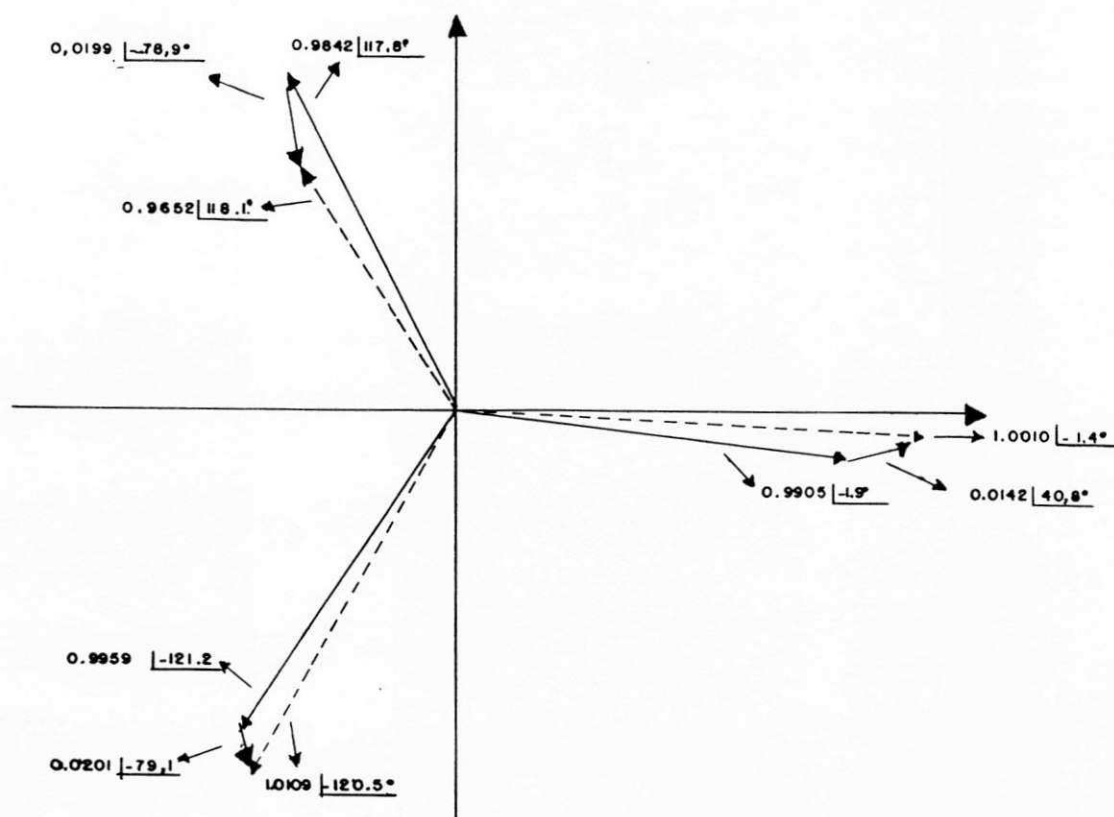


Figura 6.10 - Diagrama fasorial para ilustrar o fenômeno de aumento de tensão devido ao efeito de impedâncias mútuas.

6.5. Conclusão

Neste capítulo foi desenvolvido um fluxo de carga trifásico desacoplado. O mesmo apresenta uma modelagem desacoplada por fase, permitindo a simplificação do fluxo de carga trifásico. A inclusão das impedâncias mútuas de forma aproximada, permite visualizar o estado de operação do sistema e permite o estudo de fenômenos interessantes no sistema de distribuição.

CONCLUSÃO

Nesta Tese mostrou-se que simulações de fluxo de carga, aplicadas ao planejamento e a operação de sistemas de distribuição, podem ser realizadas através do método dos momentos modificado e do método desacoplado modificado com acumulação de potências equivalentes. As simulações dos métodos citados foram realizadas com suas versões monofásicas e trifásicas.

Na introdução, a partir de uma revisão bibliográfica, foram comentados diversos trabalhos desenvolvidos na área de fluxo de carga, desde a década de 50 até a década de 90.

Os métodos de fluxo de carga de Gauss-Seidel, Newton-Raphson e desacoplado rápido foram detalhados no capítulo 1.

A apresentação das equações básicas do método dos momentos, no capítulo 2, determinou a base para o desenvolvimento de um fluxo de carga com características próprias das redes de distribuição radiais.

Os resultados obtidos com o fluxo de carga baseado no método dos momentos mostraram que este é um método confiável para a simulação de sistemas de distribuição tendo como objetivo o planejamento desses mesmos sistemas. A sua versão trifásica também apresentou bons resultados. Logo também pode ser aplicada para o planejamento de sistemas de distribuição radiais.

A seguir foram simulados sistemas de distribuição através de três versões do método desacoplado rápido. Os resultados mostraram, com riqueza de detalhes, que na simulação de sistemas de distribuição é necessário considerar a característica de cada sistema separadamente.

O fluxo de carga desacoplado modificado com acumulação de potências equivalentes apresentou resultados muito confiáveis, na simulação de sistemas de distribuição, e o mesmo apresenta uma estrutura simples e fácil de programar.

A versão trifásica do fluxo de carga desacoplado modificado com acumulação de potências equivalentes apresenta-se como uma ferramenta poderosa para o estudo da operação e planejamento de sistemas de distribuição.

Como continuação deste trabalho ou para desenvolvimento de projetos futuros sugere-se os seguintes assuntos: 1) Estender o método dos momentos modificado para redes malhadas ou fracamente malhadas; 2) Desenvolver modelagem de harmônicos para os métodos desenvolvidos nesta Tese; 3) Melhorar a modelagem de cargas na simulação de sistemas de distribuição; 4) Desenvolver técnicas interativas e gráficas para os métodos de fluxo de carga desenvolvidos, tendo em vista a visualização de diagramas fasoriais e de diagramas unifilares com apresentação de tensões e fluxos nas linhas; 5) Desenvolver a modelagem dos transformadores ligados em delta - estrela aterrada; 6) Utilizar o teorema da superposição para incluir o efeito das impedâncias mútuas através de injeções de corrente; 7) Fazer um estudo da convergência dos métodos desenvolvidos; 8) Utilizar o fluxo de carga trifásico combinado com um sistema especialista para fazer conservação de energia elétrica na rede de distribuição. O sistema especialista terá como função identificar áreas (comercial, industrial, residencial , comercial - industrial, etc) e equipamentos onde e com os quais seriam reduzidos 5 % da tensão de distribuição. E o fluxo de carga trifásico mostrará o perfil de tensão da rede; e 9) Desenvolver a simulação do algoritmo de fluxo de carga trifásico desacoplado modificado com soma de potências equivalentes, através do processamento paralelo, aproveitando a modelagem desacoplada por fase, já desenvolvida.

Finalmente, concluí-se, que o desenvolvimento desta Tese trouxe contribuições de novos algoritmos de fluxo de carga para serem utilizados no planejamento e na operação de sistemas de distribuição.

BIBLIOGRAFIA

[Abe & Isono & Okuda, 1978] ABE, S. HAMADA, H., ISONO, A. and OKUDA, K. Load Flow Convergence in the Vicinity of a Voltage Stability Limit. IEEE Trans. PAS, vol. 97, No. 6, pp. 1983-1993, Nov / Dec 1978.

[Abnt, 1989] ABNT. Referências Bibliográficas - procedimento, NBR 6023, Rio de Janeiro, agosto 1989. 19 p.

[Allan & Arruda, 1982] ALLAN, R. N. and ARRUDA, C. LTC Transformers and MVAR Violations in the Fast Decoupled Load Flow. IEEE Trans. PAS, vol. 101, No. 9, pp. 3328 - 3332, September 1982.

[Amerongen, 1989] AMERONGEN, R. A. M. V. General - Purpose Version of the Fast Decoupled Load Flow. IEEE Trans PWRS, vol. 4, No. 2, pp. 760 - 769, May 1989.

[Andertich et alii, 1968] ANDERTICH, R. G., BROWN, H. E., HAPP, H. H. AND PERSON, C. E. The Piecewise Solution of the Impedance Matrix Load Flow. IEEE Trans. PAS, vol. 87, pp. 1877 - 1882, October 1968.

[Andertich et alii, 1970] ANDERTICH, R. G., HANSEN, D. H., BROWN, H. E. and HAPP, H. H. Piecewise Load Flow Solutions of Very Large Size Networks. IEEE Summer Power Meeting and EHV Conference, Los Angeles, Calif., July 1970.

[Arrilaga & Arnold, 1983] ARRILAGA, J. and ARNOLD, C. P. Computer Modelling of Electrical Power Systems, John Wiley, NY, 1983. 422 p.

[Arrilaga & Harker, 1978] ARRILAGA, J. and HARKER, B. J. Fast Decoupled Three Phase Load Flow. IEE Proc., vol. 125, No. 8, pp. 734 - 740, August 1978.

[Babic, 1983] BABIC, B. S. Decoupled Load Flow with Variables in Rectangular Form. IEE Proc., vol. 130, Pt. C, No. 3, pp. 98 - 102, May 1983.

[Baran & Kaszkurewicz & Falcão, 1995] BARAN, B., KASZKUREWICZ, E. and FALCÃO, D. M. Team Algorithms in Distributed Load Flow Computations. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., vol. 142, No. 6, pp. 583 - 588, November 1995.

[Barroso et alii, 1987] BARROSO, LEÔNIDAS C., BARROSO, M. M. DE ARAÚJO, CAMPOS, F. F., CARVALHO, M. L. B. E MAIA, M. L. Cálculo Numérico (com aplicações). 2 edição, São Paulo, Editora Harbra Ltda, 1987. 369p.

[Barbosa et alii, 1992] BARBOSA, A. S., COLMAN, E., MACEDO, W. E. E SOUSA, M. R. F. Aspectos Práticos Sobre a Utilização de Programas de Fluxo de

Carga em Sistemas de Distribuição com Configuração Radial XI SENDI, Blumenau - SC, setembro de 1992. 25 p.

[Birt et alii, 1976] BIRT, KENNETH A., GRAFFY, JAMES J., MC DONALD, JOHN and EL ABIAD, A. H. Three Phase Load Flow Program, IEEE Trans. PAS, vol. 95, No. 1, pp. 59 - 65, January / February 1976.

[Berg & Hawkins & Pleines, 1967] BERG, R. JR, HAWKINS, E. S. and PLEINES, W. W. Mechanized Calculation of Unbalanced Load Flow on Radial Distribution Circuits. IEEE Trans. PAS, vol. 86, No. 4, pp. 415 - 421, April 1967.

[Braess & Grebe, 1981] BRAESS, D. and GREBE, E. A Numerical Analysis of Load Flow Calculation Methods. IEEE Trans. PAS, vol. 100, No. 7, pp. 3642 - 3647, July 1981.

[Brice, 1982] BRICE, C. W. Comparison of Aproximate and Exact Voltage Drop Calculation for Distribution Lines. IEEE Trans. PAS, vol. 101, No. 11, pp. 4428 - 4431, November 1982.

[Broadwater et alii, 1988] BROADWATER, R. P., CHANDRASEKARAM, A., HUDDLES, C. T. and KHAN, A. H. Power Flow Analysis of Unbalanced Multiphase Radial Distribution Systems. Electric Power Systems Research Journal, vol. 4, 1988.

[Brodsky & Wrobel & Willis, 1987] BRODSKY, S. F. J., WROBEL, P. S. AND WILLIS, H. L., Comparison of Distribution Circuit Voltage Modelling and Calculation Methods. IEEE Trans. PWRD, vol. 2, No. 2, pp. 572 - 576, April 1987.

[Brown, 1977] BROWN, H. E. Grandes Sistemas Elétricos - Métodos Matriciais. Rio de Janeiro, LTC S. A., 1977. 259 p.

[Brown et alii, 1963] BROWN, H., CARTER, G., HAPP, H. and PERSON, C. Power Flow Solution by Impedance Matrix Iterative Method. IEEE Trans. PAS, vol. 82,pt. III, 1963.

[Carpentier, 1963] CARPENTIER, J Applications of Newton's Methods to Load Flow Problems. Proc. Power Systems Computer Conf., London, 1963.

[Carré, 1968] CARRÉ, BERNAED A. Solution of Load Flow Problems by Partioning Systems Into Trees. IEEE Winter Power Meeting, NY, January / February 1968.

[Cespedes, 1990] CESPEDES, RENATO, New Method for the Analysis of Distribution Networks. IEEE Trans. PWRD, vol. 5, No. 1, pp. 391 - 396, January 1990.

[Chang & Brandwajn, 1988] CHANG, S. K. and BRANDWAJN, V. Adjusted Solutions in Fast Decoupled Load Flow, IEEE Trans. PWRS, vol. 3, No. 2, pp. 726 - 733, May 1988.

[Chen et alii, 1990] CHEN, B. K., CHEN, M. S., SHOULTS, R. R. and LIANG, C. C. Hybrid Three Phase Load Flow. IEE Proc., vol. 137, pt. C, No. 3, pp. 177 - 185, May 1990.

[Chen & Dillon, 1974] CHEN, MO - SHING and DILLON, W. E. Power System Modelling. Proc. IEEE, vol. 62, No. 7, pp. 901 - 915, July 1974.

[Chen et alii, 1991 - 1] CHEN, T. H., CHEN, M. S., INOVE, T. KOTAS, P. and CHEBLI, E. A. Three- phase Cogenerator and Transformer Models for Distribution Systems Analysis. IEEE Trans PWRD, vol. 6, No. 4, pp. 1671 - 1681, October 1991.

[Chen et alii, 1991 - 2] CHEN, T. H., CHEN, M. S., HWANG, K., KOTAS, P. and CHEBLI, E. A. Distribution Systems Power Flow Analysis - A rigid Approach. IEEE Trans. PWRD, vol. 6, No. 3, pp. 1146 - 1152, July 1991.

[Chiang, 1991] CHIANG, H. D. A Decoupled Load Flow Method for Distribution Power Networks: Algoritms, Analysis and Convergence Study. Electrical Power & Energy Systems, vol. 13, No. 3, pp. 130 - 138, June 1991.

[Chiang et alii, 1995] CHIANG, H. D., WANG, J. C., TONG, J. and DARLING, G. Optimal Capacitor Placement Replacement and Control in Large Scale Unbalanced Distribution Systems: System Solution, Algoritms and Numerical Studies. IEEE Trans. PWRS, vol. 10, No. 1, pp. 363 - 369, February 1995.

[Cipoli, 1993] CIPOLI, JOSÉ ADOLFO. Engenharia de Distribuição, RJ, Qualitymark, 1993. 326 p.

[Cláudio & Marins, 1994] CLÁUDIO, DALCÍDIO MORAES e MARINS, JUSSARA. Cálculo Numérico Teoria e Prática, 2 edição, SP, Atlas, 1994. 556 p.

[Crouch et alii, 1992] CROUCH, P. E., TYLAVSKY, D. J., CHEN, H., JARRIEL, L. and ADAPTA, R. Critically Coupled Algorithms for Solving the Power Flow Equation. IEEE Trans. PWRS, vol. 7, No. 1, pp. 451 - 457, February 1992.

[Das & Nagi & Kothari, 1994] DAS, D., NAGI, H. S. and KOTHARI, D. P. Novel Method for Solving Radial Distribution Networks. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., vol. 141, No. 4, pp. 291 - 298, July 1994.

[Dehnel & Dommel, 1989] DEHNEL, M. and DOMMEL, H. W. A Method for Identifying Weak Nodes in Nonconvergent Load Flows. IEEE Trans. PWRS, vol. 4, No. 2, pp. 801 - 807, May 1989.

[Demidovich & Maron, 1987] DEMIDOVICH, B. P. and MARON, I. A. Computational Mathematics. 4 edição, Moscow, Mir Publishers, 1987. 690 p.

[Despotovic, 1973] DESPOTOVIC, SLOBODAN T. A New Decoupled Load Flow Method. IEEE PES Summer Meeting & EHV / UHV Conference. Vancouver, B. C., Canadá, July 1973.

[Despotovic & Babic & Mastilovic, 1971] DESPOTOVIC, SLOBODAN T., BABIC, B. S. and MASTILOVIC, VUKOTA P. A Rapid and Reliable Method for Solving Load Flow Problems. IEEE Trans. PAS, vol. 90, No. 1, pp. 123 - 130, January / February 1971.

[Dusonchet et alii, 1970] DUSONCHET, Y. P., TALUKDAR, S. N., SINNOT, H. E. and EL-ABIAD, A. H. Load Flow Using a Combination of Point Jacobi and Newton's Methods, IEEE Summer Power Meeting and EHV Conference, Los Angeles, Calif., July 1970.

[Edelman, 1964] EDELMAN, H. Numerical and Algebraic Generation of Mesh - Impedance Matrices by Set - Theoretical Intersection on a Digital Computer. Trans. AIEE, vol. 83, pt. III, pp. 397 - 402, 1964.

[Eletrobrás, 1982] ELETROBRÁS. Planejamento de Sistemas de Distribuição, vol. 1, RJ, Ed. Campus, 1982. 243 p.

[Eletrobrás, 1988] ELETROBRÁS - GCPS, Apostila de Critérios e Procedimentos para Planejamento de Sistemas de Subtransmissão, outubro 1988.

[Elgerd, 1982] ELGERD, O. Electric Energy Systems Theory: An Introduction, McGraw - Hill, NY, 1982. 606p.

[Fuchs, 1977] FUCHS, RUBENS DARIO. Transmissão de Energia Elétrica - Linhas Aéreas, vol. 2, LTC S.A., 1977. 590 p.

[Garcia & Zago, 1992] GARCIA, A. V. e ZAGO, M. G. Fluxo de Carga Desacoplado Trifásico. Anais do IX Congresso Brasileiro de Automática, Vitória, ES, pp. 615 - 620, 1992.

[Garcia et alii, 1984] GARCIA, A. V., MONTICELLI, A. J., FRANÇA, ANDRÉ L. M., TANAKA, M. R. and MURARI, C. A. F. Simulação de Redes de Distribuição de Energia Elétrica Através de Fluxo de Carga Desacoplado Rápido, IX SENDI, salvador - BA, novembro de 1984.

[Glimn & Stagg, 1957] GLIMN, A. F. and STAGG, G. W. Automatic Calculation of Load Flows. Trans. AIEE, vol. 76, pt. III, pp. 817 - 828, 1957.

[Gorman & Grainger, 1992 -1] GORMAN, M., J. and GRAINGER, J. J. Transformer Modelling for Distribution Systems Studies Part I: Linear Modelling Basics. IEEE Trans. PWRD, Vol. 7, No. 2, pp. 567 - 574, April 1992.

- [Gorman & Grainger, 1992 - 2] _____Transformer Modelling for Distribution Systems Studies Part II : Addition of Models to Ybus and Zbus. IEEE Trans. PWRD, vol. 7 ,No. 2, pp. 575 - 580, April 1992.
- [Goswami & Basu, 1991] GOSWAMI, S. K. and BASU, S. K. Direct Solution of Distribution Systems. Proc. IEE, vol. 138, No. 1, pp. 78 - 88, January 1991.
- [Guilani, 1988] GUILANI, K. BEHNAM. Fast Decoupled Load Flow: The Hybrid Model. IEEE Trans. PWRD, vol. 3, No. 2, pp. 734 - 742, May 1988.
- [Haley & Ayres, 1985] HALEY, P. H. and AYRES, M. Super Decoupled Load Flow with Distributed Slack Bus. IEEE Trans. PAS, vol. 104, No. 1, pp. 104 - 113, January 1985.
- [Hatcher & Busby, 1961] HATCHER, T. L. and BUSBY, G. L. Pratical Aplications of Digital Computers to Distributions Systems. AIEE Trans. PAS. PAS, pp. 1290 - 1300, February 1961.
- [Henderson, 1955] HENDERSON, J. M. Automatic Digital Computer Solution of Load Flow Studies. AIEE Trans. PAS, vol. 73, pt. III - B, pp. 1696 - 1702, February 1955.
- [Heydt, 1986] HEYDT, G. T. Computer Analys Methods for Power Systems, vol. 1 NY, Macmillan Publishing Company, 1986. 176 p.
- [Huang & Abur & Tsai, 1988] HUANG, G., ABUR, A. and TSAI, W. K. A Multi - Level Graded Precision Model of Large Scale Power Systems for Fast Parallel Computation. Mathl. Comput. Modelling, vol. 11, pp. 325 - 330, 1988.
- [Hubbi, 1991] HUBBI, W. Effects of Neglecting Resistances in XB and BX Load Flow Methods. IEE Proc. - C, vol. 138, No. 5, pp. 452 - 456, September 1991.
- [Hubert & Hayes, 1970] HUBERT, F. J. and HAYES, D. R. A Rapid Digital Computer Solution for Power System Network Load Flow. IEEE Summer Power Meeting and EHV Conference, Los Angeles, Calif., July 1970.
- [IEEE, 1991] IEEE DISTRIBUTION PLANNING WORKING GROUP REPORT. Radial Distribution Test Feeders. IEEE Trans. PWRD, vol. 6, No. 3, pp. 975 - 985, August 1991.
- [IEEE, 1995] IEEE TASK FORCE ON LOAD REPRESENTATION FOR DYNAMIC PERFORMANCE. Bibliography on Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation. IEEE Trans. PWRD, vol. 10, No. 1, pp. 523 - 538, February 1995.
- [Irving & Sterling, 1987] IRVING, M. R. and STERLING, M. J. H. Efficient Newton - Raphson Algorithm for Load - Flow Calculation in Transmission and

Distribution Networks. IEE Proceedings, vol. 134, Pt. C, No. 5, pp. 325 - 328, September 1987.

[Iwamoto & Tamura, 1981] IWAMOTO, S. and TAMURA, Y. A Load Flow Calculation Method for Ill - Conditioned Power Systems. IEEE Trans. PAS, vol. 100, No. 4, pp. 1736 - 1743, April 1981.

[Johnson, 1977] JOHNSON, B. K. Extraneous and False Load Flow Solutions. IEEE Trans. PAS, vol. 96, No. 2, pp. 524 - 534, March / April 1977.

[Kersting, 1984] KERSTING, W. H. A Method to Teach the Design and Operation of a Distribution System. IEEE Trans. PAS, vol. 103, No. 7, pp. 1945 - 1952, July 1984.

[Kersting & Mendive, 1976] KERSTING, W. H. and MENDIVE, D. L. An Application of Ladder Network Theory to the Solution of Three Phase Radial Load Flow Problems. IEEE Winter Power Meeting, NY, January 1976.

[Kersting & Seeker, 1975] KERSTING, W. H. and SEEKER, S. A. A Program to Study the Effects of Mutual Coupling and Unbalanced Loading on a Distribution System. IEEE Winter Power Meeting, NY, January 1975.

[Kesavan & Pai & Bhat, 1971] KESAVAN, H. K., PAI, M. A. and BHAT, M. V. Piecewise Solution of the Load Flow Problem. IEEE Summer Meeting and International Symposium on High Power Testing, Portland, Oregon, July 1971.

[Korsak, 1971] KORSACK, ANDREW J. On the Question of Uniqueness of Stable Load Flow Solutions. IEEE Summer Meeting and International Symposium on High Power Testing, Portland, Oregon, July 1971.

[Kosow, 1977] KOSOW, IRVING I. Máquinas Elétricas e Transformadores, RS, Ed. Globo, 1977. 634 p.

[Laha & Bollinger & Billington, 1974] LAHA, A. K., BOLLINGER, K. E., BILLINGTON, R. and DHAR, S. B. Modified Form of Newton's Method for Faster Load Flow Solutions, Proc. IEE, vol. 121, No. 8, pp. 849 - 853, August 1974.

[Laughton, 1968] LAUGHTON, M. A. Analysis of Unbalanced Polyphase Networks by the Method of Phase Co - ordinates, Proc. IEE, vol. 115, No. 8, pp. 1163 - 1172, August 1968.

[Lima & Medeiros, 1980] LIMA, DRUMOND X. CAVALCANTI e MEDEIROS, M. F. JR. Apostila de Fluxo de Cargas, Campina Grande - PB, novembro 1980. 199 p.

[Lima & Andrade, 1987] LIMA, DRUMOND X. CAVALCANTI e ANDRADE, ZORAIDA A. Cálculo de Tensão e Perdas nos Sistemas Radiais de Distribuição pelo Método do Transporte Iterativo. Publicação Interna do DEE - UFPB, Campina Grande - PB, 1987. 25 p.

[Luo & Semlyen, 1990] LUO, G. X. and SEMLYEN, A. Efficient Load Flow for Large Weakly Meshed Networks. IEEE Trans. PWRS, vol. 5, No. 4, pp. 1309 - 1316, November 1990.

[Masielo & Wollenberg, 1975] MASIELO, R. D. and WOLLENBERG, B. F. Comments on Review of Load Flow Calculation Methods. Proc. IEEE, pp. 713 - 715, April 1975.

[Mohamed, 1991] MOHAMED, A. Performance Comparisons of AC Load Flow Techniques for Real Time Applications. Proc. - C IEE, vol. 138, No. 5, pp. 457 - 461, September 1991.

[Monticelli, 1977] MONTICELLI, A. J. Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica, SP, Ed. Edgard Blucher, 1983. 166 p.

[Monticelli & Garcia & Saavedra, 1990] MONTICELLI, A., GARCIA, A. and SAAVEDRA, O. R. Fast Decoupled Load Flow, Hypothesis, Derivations and Testing. IEEE Trans. PWRS, vol. 5, No. 4, pp. 1425 - 1431, November 1990.

[Moura & Carvalho & Mota, 1994 - 1] MOURA, A. P., CARVALHO, M. A. Jr e MOTA, W. S. Fluxo de Carga Trifásico para Distribuição Radial Baseado no Método dos Momentos. Anais do X Congresso Brasileiro de Automática e VI Congresso Latino Americano de Controle Automático, RJ, pp. 22 - 24, setembro 1994.

[Moura & Carvalho & Mota, 1994 - 2] _____. Fluxo de Carga para Distribuição Baseado no Método Clássico dos Momentos, Anais do X Congresso Brasileiro de Automática e VI Congresso Latino Americano de Controle Automático, RJ, pp. 19 - 21, setembro 1994.

[Moura, 1986] MOURA, A. P. Fluxo de Carga com Elo de Corrente Contínua em Micromputador, Dissertação de Mestrado, DEE - UFPB, novembro 1986, 86 p.

[Moura, 1990] _____. Fluxo de Carga com Tangentes Constantes, Anais do XIII Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, Águas de Lindóia, SP, outubro 1990.

[Moura & Carvalho & Mota, 1995] MOURA, A. P., CARVALHO, M. A. JR. e MOTA, W. S. Modified Decoupled Load Flow with Equivalent Power Accumulation for Distribution Systems, Proceedings of the 38 TH Midwest Symposium on Circuits and Systems, RJ, pp. 445 - 448, agosto 1995.

[Nanda & Kothari & Srivastava, 1987] NANDA, J., KOTHARI, D. P. and SRIVASTAVA, S. C. Some Important Observations on Fast Decoupled Load Flow Algorithm. Proc. IEEE, vol. 75, No. 5, pp. 732 - 733, May 1987.

[Nanda et alii, 1992] NANDA, J., BIJWE, P. R., HENRY, J. and RAJU, V. B. General Purpose Fast Decoupled Power Flow. Proc. - C IEE, vol. 139, No. 2, pp. 87 - 92, March 1992.

[Ness, 1959] NESS, J. E. VAN. Iteration Methods for Digital Load Flow Studies. Trans. AIEE PAS, vol. 78A, pp. 583 - 588, August 1959.

[Ness & Griffin, 1961] NESS, J. E. VAN and GRIFFIN, J. H. Elimination Methods for Load Flow Studies. Trans. AIEE PAS, vol. 80, pt. III, pp. 299 - 304, June 1961.

[Overbye, 1994] OVERBYE, THOMAS J. A Power Flow Measure for Unsolvable Cases. IEEE Trans. PWRS, vol. 9, No. 3, pp. 1359 - 1365, August 1994.

[Papadopoulos & Hatzargyriov & Papadakis, 1987] PAPADOPOULOS, M., HATZIARGYRIOV, N. D. and PAPADAKIS, M. E. Graphics Aided Interactive Analysis of Radial Distribution Networks. IEEE Trans. PWRD, vol. 2, No. 4, pp. 1297 - 1302, October 1987.

[Peschon et alii, 1968] PESCHON, JOHN, PIERCY, D. S., TINNEY, W. F. and TVEIT, O. J. Sensitivity in Power Systems, IEEE Trans. PAS, vol. 87, No. 8, pp. 1687 - 1696, August 1968.

[Pinto, 1986] PINTO, CARLOS ROBERTO ALVES. Convergência do Processo Iterativo de Solução das Equações do Fluxo de Carga, Dissertação de Mestrado, DEE -UFPB, Campina Grande - PB, fevereiro 1986. 88 p.

[Ralston, 1965] RALSTON, ANTHONY. A First Course in Numerical Analysis, NY, Mc Graw - Hill Kogakusha, LTD, 1965. 578 p.

[Ramos & Dias, 1982] RAMOS, DOREL SOARES e DIAS, EDUARDO MÁRIO, Sistemas Elétricos de Potência - Regime Permanente, vol. 1 e 2, RJ, Ed. Guanabara Koogan S. A., 1982. 249 p e 226 p.

[Rajicic & Bose, 1988] RAJICIC, D. and BOSE, A. A Modification to the Fast Decoupled Power Flow for Networks with High R/X Ratios. IEEE Trans. PWRS, vol. 3, No. 2, pp. 743 - 746, May 1988.

[Rajicic & Ackovski & Taleski, 1994] RACIC, D., ACKOVSKI, R. and TALESKI, R. Voltage Correction Power Flow. IEEE Trans. PWRD, vol. 9, No. 2, pp. 1056 - 1062, April 1994.

[Rao & Rao & Nanda, 1981] RAO, P. S. NAGENDRA, RAO, K. S. PRAKASA and NANDA, J. A Novel Hybrid Load Flow Method. IEEE Trans. PAS, vol. 100, No. 1, pp. 303 - 308, January 1981.

[Rao & Rao & Nanda, 1982] _____. An Exact Fast Load Flow Method Incluid Second Order Terms in Rectangular Coodinates. IEEE Trans. PAS, vol. 101, No. 9, pp. 3261 - 3268, September 1982.

- [Rao & Rao & Nanda, 1984] _____ . An Empirical Criterion for the Convergence of the Fast Decoupled Load Flow Method. IEEE Trans. PAS, vol. 103, No. 5, pp. 974 - 987, May 1984.
- [Roy, 1971] ROY, L. Piecewise Solution of Large Electrical Systems by Nodal Admittance Matrix. IEEE Summer Meeting and International Symposium on High Power Testing, Portland, Oregon, July 1971.
- [Sachdev & Medicheria, 1977] SACHDEV, M. S. and MEDICHERIA, T. K. P. A Second Order Load Flow Technique. IEEE Trans. PAS, vol. 96, No. 1, pp. 189 - 197, January / February 1977.
- [Saleh & Laughton & Stone, 1985] SALEH, A. D. M., LAUGHTON, M. A. and STONE, G. T. M - to N - Phase Transformer models in phase co-ordinates, IEE Proceedings, vol. 132, Pt. C, No. 1, pp. 41 - 48, January 1985.
- [Sasson & Trevino & Aboytes, 1971] SASSON, ALBERT M., TREVINO, CARLOS and ABOYTES, FLORENCIO. Improved Newton's Load Flow Through a Minimization Technique. IEEE Trans. PAS, vol. 89, No. 1, pp. 1974 - 1981, January 1971.
- [Sasson & Snyder & Falm, 1974] SASSON, A. M., SNYDER, W. and FALM, M. Comments on Review of Load Flow Calculation Methods. Proc. IEEE, pp. 712 - 713, April 1974.
- [Sato & Tinney, 1963] SATO, N. and TINNEY, W. F. Techniques for Exploiting the Sparsity of the Network Admittance Matrix. IEEE Trans. PAS, vol. 82, pp. 944 - 950, December 1963.
- [Shirmohammadi et alii, 1988] SHIRMOHAMMADI, D., HONG, H. W., SEMLYEN, A. and LUO, G. X., A Compensation - Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks. IEEE Trans. PWRS, vol. 3, No. 2, pp. 753 - 762, May 1988.
- [Soares, 1992] SOARES, A. Um Modelo para Cálculo de Fluxo de Potência em Redes Radiais, Dissertação de Mestrado, DEE - PUC - RJ, RJ, março 1992. 85 p.
- [Stagg & Abiad, 1968] STAGG, G. and EL-ABIAD, A. Computer Methods in Power Systems Analysis, McGraw-Hill, NY, 1968. 556 p.
- [Stevenson, 1982] STEVENSON, W. D. Elements of Power Systems Analysis, 4 th ed., NY, McGraw-Hill, 1982. 460 p.
- [Stott, 1971] STOTT, B. Effective Starting Process for Newton-Raphson Load Flows. Proc. IEE, vol. 118, pp. 983 - 987, August 1971.

[Stott, 1972] _____. Decoupled Newton Load Flow. IEEE Trans. PAS, vol. 91, pp. 1955 - 1959, Set/Oct 1972.

[Stott & Alçac, 1973] STOTT, B. and ALSAÇ, O. Fast Decoupled Load Flow. IEEE PES Summer Meeting & EHV / UHV Conference, Vancouver, B. C. Canada, July 1973.

[Stott, 1974] STOTT, B. Review of Load Flow Calculation Methods. Proc. IEEE, vol. 62, pp. 916 - 929, July 1974.

[Strang, 1980] STRANG, GILBERT. Linear Algebra and Its Applications, - second ed., NY, Academic Press, 1980. 416 p.

[Takahashi & Sekine & Umezu, 1968] TAKAHASHI, K., SEKINE, Y. and UMEZU, T. Network Flow Method Applied to Load Flow Calculation. IEEE Trans. PAS, vol. 87, No. 11, November 1968.

[Tinney & McIntyre, 1960] TINNEY, W. F. and MCINTYRE, C. M. A Digital Method of Obtaining a Loop Connection Matrix. Trans. AIEE, vol. 79, pt. III, pp. 740 - 746, 1960.

[Tinney & Walker, 1967] TINNEY, W. F. and WALKER, J. W. Direct Solution of Sparse Network Equations by Optimal Ordered Triangular Factorization. Proc. IEEE, vol. 55, pp. 1801 - 1809, November 1967.

[Tinney & Hart, 1967] TINNEY, W. F. and HART, C. E. Power Flow Solution by Newton's Method. IEEE Trans. PAS, vol. 86, pp. 1449 - 1460, November 1967.

[Tripathy et alii, 1982] TRIPATHY, S. C., PRASAD, G. D., MALIK, O. P. and HOPE, G. S. Load Flow Solutions for Ill - Conditioned Power Systems by a Newton - Like Methods. IEEE Trans. PAS, vol. 101, No. 10, pp. 3648 - 3657, October 1982.

[Tylavsky, 1994] TYLAVSKY, D. J., CROUCH, P. E., JARRIEL, L. F., SING, J. and ADAPA, R. The Effects of Precision and Small Impedance Branches on Power Flow Robustness. IEEE Trans. PWRS, vol. 9, No. 1, pp. 6 - 14, February 1994.

[Uemura, 1972] UEMURA, K. Approximated Jacobians in Newton's Power Flow Method. Relatory of Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation, Japan 1972.

[Venikov et alii, 1975] VENIKOV, V. A., STROEV, V. A., IDELCHICK, V. I. and TARASOV, V. I. Estimation of Electrical Power System Steady-State Stability in Load Flow Calculations. IEEE Trans. PAS, vol. 94, No. 3, pp. 1034 - 1041, May/June 1975.

[Wang et alii, 1990] WANG, L., XIANG, N., WANG, S., ZHANG, B. and HUANG, M. Novel Decoupled Power Flow. Proc. IEE, vol. 137, pt. C, No. 1, pp. 1 - 7, January 1990.

[Wallach, 1968] WALLACH, YAHUDA. Gradient Methods for Load Flow Problems. IEEE Trans. PAS, vol. 87, No. 5, pp. 1314 - 1318, May 1968.

[Ward & Hale, 1956] WARD, J. and HALE, H. Digital Computer Solution of Power Flow Problems. AIEE Trans. PAS, vol. 75, pt. III, pp. 398 - 404, June 1956.

[Wasley & Shlash, 1974] WASLEY, R. G. and SHLASH, M. A. Newton-Raphson Aloritm for #-Phase Load Flow. Proc. IEE, vol. 121, No. 7, pp. 630 - 638, July 1974.

[Westinghouse, 1955] WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. Transmission and Distribution - Reference Book, NY, 1955. 826 p.

[Westinghouse, 1965] _____. Distribution Systems. NY, 1965. 569 p.

[Wood & Wollenberg, 1984] WOOD, ALLEN J. and WOLLENBERG, BRUCE L. Power Generation Operation & Control, NY, John Wiley, 1984. 445 p.

[Wu, 1977] WU, FELIX F. Theoretical Study of the Convergence of the Fast Decoupled Load Flow. IEEE Trans. PAS, vol. 96, No. 1, pp. 268 - 275, January/February 1977.

[Zanaga, 1992] ZANAGA, MARIÂNGELA PISONI. Referenciação Bibliográfica: aplicação da NBR 6023 / 89, São Paulo 1992, 25 p.

[Zhang & Chen, 1994] ZHANG, X. P. and CHEN, H. Asymmetrical Three Phase Load Flow Study Based on Symmetrical Component Theory. Proc. IEE Gener. Transm. Distrib., vol. 141, No. 3, pp. 248 - 252, May 1994.

[Zimmerman & Chiang, 1995] ZIMMERMAN, R. D. and CHIANG, H. D. Fast Decoupled Power Flow for Unbalanced Radial Distribution Systems, IEEE Trans. PWRS, vol. 10, No. 4, pp. 2045 - 2052, November 1995.

[Zollenkopf, 1970] ZOLLENKOPF, K. BiFactorisation - Basic Computational Algorithm and Programming Techniques, Conference on Large Sets of Sparse Linear Equations, Oxford, 1970, pp. 75 - 96.

APÊNDICE A

DADOS DOS PRINCIPAIS SISTEMAS SIMULADOS

Neste apêndice apresentam-se dados dos principais sistemas simulados, que não são encontrados em outras publicações, pois os dados dos sistemas radiais do IEEE encontram-se na referência [IEEE, 1991].

Capítulo 2.

Sistema 1

Dados de Linhas

Barra Emissora (BE) - Barra Receptora (BR)

BE / BR	R (pu)	X (pu)
1 - 3	1,456467	1,6089260
3 - 6	1,543802	0,8082644
3 - 2	1,447314	0,7577479
6 - 5	1,736777	0,9092975
6 - 4	2,701653	1,4144630

Dados de Barras

Número da Barra	PG (Mw)	QG(Mvar)	PC(Mw)	QC(Mvar)
1	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.400	0.200
3	0.483	0.193	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.333	0.200
5	0.000	0.000	0.500	0.333
6	0.000	0.000	0.000	0.000

Dados Gerais

Barra de referência - 1
Módulo de Tensão - 1.1 pu
Potência Base - 100 Mva
Tensão Base - 13.8 Kv

Sistema 2

Dados Gerais

Barra de referência - 1
Módulo de Tensão 1.0 pu
Potência Base - 100 Mva
Tensão Base - 13.8 Kv

Dados de Autoboostrers

BE / BR	X(pu)	Tape (%)
54 - 5	0.1250	100
9 - 13	0.2500	87
55 - 17	0.2500	100

Dados de Linhas

BE / BR	R (pu)	X (pu)
1 - 2	0.3655	0.2600
2 - 3	0.5227	0.3718
3 - 4	0.2485	0.1768
4 - 54	0.3655	0.2600
5 - 6	0.6360	0.4524
6 - 7	1.7194	0.5337
6 - 8	0.5117	0.3640
8 - 9	0.8955	0.6370
9 - 10	0.8845	0.6292
10 - 11	0.8407	0.5980
11 - 12	0.6287	0.4472
13 - 14	0.4752	0.3380
14 - 15	2.6420	0.8201
14 - 16	0.4203	0.2990
16 - 55	0.4752	0.3380
17 - 18	1.7194	0.5337
17 - 19	0.1096	0.0780
19 - 20	1.0065	0.3124
20 - 21	2.1387	0.6639
19 - 22	0.6945	0.4940
22 - 23	1.4986	1.0660
23 - 24	0.3290	0.2340
24 - 25	0.1389	0.0988
25 - 26	0.7968	0.2504
25 - 27	0.4569	0.3250
27 - 28	0.5452	0.1692
28 - 29	0.4781	0.1484
29 - 30	0.9226	0.2864
30 - 31	0.5452	0.1692

Continuação

31 - 32	0.7129	0.2213
32 - 33	1.1574	0.3593
32 - 34	1.3000	0.4035
27 - 35	0.8370	0.5954
35 - 36	1.9207	0.5962
35 - 37	0.9226	0.2864
37 - 38	0.5871	0.1822
38 - 39	1.1239	0.3489
39 - 40	0.6290	0.1953
40 - 41	1.0065	0.3124
41 - 42	0.8387	0.2604
42 - 43	1.1323	0.3515
43 - 44	2.3484	0.7290
35 - 45	0.4569	0.3250
45 - 46	0.6961	0.2161
46 - 47	0.9897	0.3072
46 - 48	0.8808	0.2577
45 - 49	0.1279	0.0910
49 - 50	0.2924	0.2080
50 - 51	0.8772	0.6240
51 - 52	0.8174	0.3973
52 - 53	0.6044	0.2937

Dados de Barras

Número da Barra	PC (Mw)	QC (Mvar)	Q _{shunt} (Mvar)
1	0.000	0.000	
2	0.051	0.025	
3	0.041	0.019	
4	0.020	0.010	
5	0.139	0.068	
6	0.049	0.024	
7	0.080	0.039	
8	0.090	0.043	
9	0.058	0.028	
10	0.045	0.022	
11	0.030	0.014	
12	0.049	0.024	
13	0.000	0.000	
14	0.036	0.018	
15	0.088	0.042	
16	0.026	0.012	
17	0.000	0.000	
18	0.060	0.029	

Continuação			
19	0.015	0.007	
20	0.011	0.005	
21	0.064	0.031	
22	0.019	0.010	
23	0.030	0.014	
24	0.129	0.063	
25	0.069	0.034	0.6
26	0.036	0.018	
27	0.024	0.012	
28	0.024	0.012	
29	0.042	0.020	
30	0.039	0.019	
31	0.017	0.008	
32	0.034	0.016	
33	0.013	0.006	
34	0.034	0.017	
35	0.071	0.034	
36	0.009	0.004	
37	0.045	0.022	
38	0.019	0.010	
39	0.064	0.031	
40	0.013	0.006	
41	0.051	0.025	
42	0.056	0.027	
43	0.011	0.005	
44	0.148	0.071	
45	0.026	0.012	
46	0.045	0.022	
47	0.026	0.012	
48	0.013	0.006	
49	0.011	0.005	
50	0.024	0.011	
51	0.084	0.041	
52	0.189	0.092	
53	0.123	0.059	
54	0.000	0.000	
55	0.000	0.000	

Capítulo 3.

Sistema 3

Dados Gerais

Barra de referência - 1
Módulo de Tensão - 1,05 pu
Potência Base - 100 Mva
Tensão Base - 13.8 Kv

Dados de linhas (por fase)

BE / BR	R (pu)	X(pu)
1 - 2	0.073	0.110
2 - 3	0.159	0.234
3 - 4	0.149	0.221
4 - 5	0.211	0.312
5 - 6	0.149	0.221
6 - 7	0.149	0.221
7 - 8	0.149	0.221
8 - 9	0.149	0.221
9 - 10	0.149	0.221
10 - 11	0.149	0.221
5 - 12	0.743	0.253
5 - 13	0.743	0.253
5 - 14	1.050	0.358
8 - 15	1.050	0.358
10 - 16	0.743	0.253
10 - 17	0.743	0.253
10 - 18	1.050	0.358

Dados de Barras (por fase)

Número da Barra	PC(Mw)	QC(Mvar)
1	0.000	0.000
2	0.000	0.000
3	0.128	0.062
4	0.181	0.088
5	0.168	0.084
6	0.174	0.083
7	0.196	0.093
8	0.174	0.078
9	0.091	0.044
10	0.185	0.065
11	0.191	0.092
12	0.047	0.022
13	0.047	0.022

14	0.143	0.069
15	0.143	0.069
16	0.072	0.034
17	0.143	0.069
18	0.139	0.068

Sistema 4

Dados Gerais

Barra de referência 1
Módulo de tensão 1.0 pu
Potência base 100 Mva
Tensão base 13.8 Kv.

Dados de linhas (por fase)

BE / BR	R (pu)	X (pu)
1 - 2	0.074	0.166
2 - 3	0.094	0.210
3 - 4	0.133	0.297
4 - 5	0.094	0.210
5 - 6	0.300	0.234
6 - 7	0.424	0.331
7 - 8	1.050	0.358
8 - 9	0.743	0.253
9 - 10	0.743	0.253
10 - 11	0.472	0.242
11 - 12	0.472	0.242
12 - 29	0.667	0.342
3 - 13	0.149	0.221
13 - 14	0.211	0.312
14 - 15	0.149	0.149
15 - 16	0.149	0.211
13 - 17	0.743	0.253
14 - 18	0.743	0.253
3 - 19	0.472	0.242
5 - 20	0.743	0.253
20 - 21	0.743	0.253
21 - 22	1.050	0.358
22 - 23	0.743	0.253
7 - 24	0.743	0.253
9 - 25	0.743	0.253
25 - 28	1.050	0.358
25 - 30	0.474	0.242
9 - 26	1.050	0.358
10 - 27	0.743	0.253

Dados de Barras

Número da barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	Mw	Mvar	Mw	Mvar	Mw	Mvar
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.136	0.065	0.136	0.065	0.136	0.065

Número da Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	Mw	Mvar	Mw	Mvar	Mw	Mvar
3	0.134	0.067	0.134	0.067	0.134	0.067
4	0.141	0.068	0.141	0.068	0.141	0.068
5	0.160	0.800	0.160	0.800	0.160	0.800
6	0.10355	0.0494	0.10682	0.05096	0.109	0.052
7	0.162	0.081	0.162	0.081	0.162	0.081
8	0.188	0.094	0.188	0.094	0.188	0.094
9	0.118	0.059	0.118	0.059	0.118	0.059
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.109	0.052	0.109	0.052	0.109	0.052
12	0.054	0.026	0.054	0.026	0.054	0.026
13	0.300	0.145	0.300	0.145	0.300	0.145
14	0.181	0.090	0.181	0.090	0.181	0.090
15	0.109	0.052	0.109	0.052	0.109	0.052
16	0.118	0.059	0.118	0.059	0.118	0.059
17	0.138	0.069	0.138	0.069	0.138	0.069
18	0.082	0.039	0.082	0.039	0.082	0.039
19	0.119	0.057	0.119	0.057	0.119	0.057
20	0.136	0.068	0.136	0.068	0.136	0.068
21	0.128	0.064	0.128	0.064	0.128	0.064
22	0.168	0.084	0.168	0.084	0.168	0.084
23	0.146	0.073	0.146	0.073	0.146	0.073
24	0.163	0.078	0.163	0.078	0.163	0.078
25	0.182	0.089	0.182	0.089	0.182	0.089
26	0.109	0.052	0.109	0.052	0.109	0.052
27	0.124	0.064	0.124	0.064	0.124	0.064
28	0.119	0.057	0.119	0.057	0.119	0.057
29	0.021	0.010	0.021	0.010	0.021	0.010
30	0.054	0.026	0.054	0.026	0.054	0.026

Sistema 5

Dados Gerais

Barra de referência - 1
Módulo de tensão - 1.0 pu
Potência base - 100 Mva
Tensão base - 13.8 Kv

Dados de Linhas

BE / BR	R (pu)	X (pu)	Tape (%)
1 - 2	0.4386	0.3120	110
1 - 3	1.5534	1.1050	
3 - 4	0.3472	0.2470	
4 - 5	0.0000	0.1250	
5 - 6	0.1096	0.7800	
6 - 7	0.1828	0.1300	
7 - 8	1.2581	0.3905	
7 - 9	0.7859	0.5590	
9 -10	0.2193	0.1560	
9 -11	0.3289	0.2340	
11 -12	0.4386	0.3120	
12 -13	0.1462	0.1040	
13 -14	2.3484	0.7270	
14 -15	2.9355	0.9112	
15 -16	1.6685	0.6350	
15 -17	3.1872	0.9894	110
17 -18	0.2516	0.0781	
18 -19	2.6420	0.8201	
13 -20	0.4203	0.2970	
20 -21	0.6214	0.4420	
21 -22	0.7676	0.5460	
22 -23	0.3655	0.2600	
23 -24	1.1696	0.8320	
23 -25	0.4386	0.3120	
25 -26	0.1462	0.1040	
26 -27	0.0731	0.0520	110
27 -28	0.0000	0.2500	
28 -29	0.4752	0.3380	

29 -30	2.3484	0.7290	110
29 -31	1.9070	1.3520	
31 -32	0.3655	0.2600	
32 -33	1.0965	0.7800	
33 -34	4.2775	1.3278	
33 -35	0.1828	0.1300	
35 -36	0.0000	0.2500	
36 -37	0.5157	0.3640	
37 -38	0.7800	0.2530	
38 -39	0.7800	0.2530	
39 -40	0.7800	0.2530	
40 -41	0.4680	0.1518	
41 -42	0.9750	0.3163	
41 -43	0.2340	0.0759	

BE / BR	R (pu)	X (pu)	Tape (%)
43 -44	0.5538	0.1797	
44 -45	1.0920	0.3542	
45 -46	1.5210	0.4934	
39 -47	0.6240	0.2024	
47 -48	0.3900	0.1265	
48 -49	3.2759	1.0627	
49 -50	4.8748	1.5854	
50 -51	2.3399	0.7591	

Dados de Barras

Número da Barra	Mw	Mvar	Shunt (Mvar)
1	0.000	0.000	
2	0.000	0.000	
3	0.087	0.042	
4	0.000	0.000	
5	0.000	0.000	
6	0.739	0.399	
7	0.000	0.000	
8	0.087	0.042	
9	0.081	0.039	0.300
10	0.056	0.027	
11	0.814	0.415	
12	0.078	0.037	
13	0.063	0.030	
14	0.122	0.059	
15	0.025	0.012	
16	0.083	0.041	
17	0.028	0.013	

18	0.063	0.030	
19	0.037	0.018	
20	0.031	0.015	
21	0.031	0.015	
22	0.000	0.000	
23	0.000	0.000	
24	0.054	0.026	
25	0.025	0.012	
26	0.081	0.039	
27	0.000	0.000	
28	0.000	0.000	
29	0.000	0.000	
30	0.081	0.039	
31	0.035	0.017	

Número da Barra	R (pu)	X (pu	Shunt (Mvar)
32	0.012	0.006	
33	0.002	0.001	
34	0.078	0.038	
35	0.000	0.000	
36	0.000	0.000	
37	0.056	0.027	
38	0.000	0.000	
39	0.012	0.006	
40	0.050	0.024	
41	0.050	0.024	
42	0.115	0.055	
43	0.106	0.051	
44	0.156	0.076	
45	0.031	0.015	
46	0.121	0.069	
47	0.047	0.023	
48	0.044	0.021	
49	0.067	0.033	
50	0.025	0.012	
51	0.108	0.058	

0.300

0.300

APÊNDICE B

RESÍDUOS DE POTÊNCIA ATIVA E REATIVA

Neste apêndice apresenta-se os resíduos de potência ativa e reativa de alguns sistemas simulados.

O número entre parêntese significa expoente.

Capítulo 2.

Sistema 1

Número da Barra	Resíduos de Potência Ativa (Mw)		
	MM	GS	FCDR
1	0.	0.	0.
2	-1.10(-3)	-1.10(-4)	-5.10(-5)
3	-9.10(-3)	-7.10(-5)	-2.10(-4)
4	-2.10(-3)	-1.10(-4)	-1.10(-4)
5	-3.10(-3)	-1.10(-4)	-3.10(-4)
6	2.10(-4)	2.10(-4)	2.10(-4)

Resíduos de Potência Reativa (Mvar)			
Número da barra	MM	GS	FCDR
1	0.	0.	0.
2	7.10(-4)	4.10(-5)	1.10(-6)
3	9.10(-4)	3.10(-5)	2.10(-6)
4	-1.10(-3)	2.10(-5)	0.
5	-2.10(-3)	3.10(-5)	0.
6	1.10(-4)	-3.10(-6)	4.10(-6)

Sistema 2

Número da Barra	Resíduos de Potência Ativa (Mw) e Potência reativa (Mvar)			
	MM		GS	
	Mw	Mvar	Mw	Mvar
1	0.	0.	0.	0.
2	2.10(-2)	1.10(-2)	1.10(-4)	5.10(-5)
3	-9.10(-3)	-6.10(-3)	2.10(-4)	1.10(-4)
4	1.10(-2)	1.10(-2)	1.10(-4)	7.10(-5)
5	4.10(-2)	2.10(-2)	4.10(-4)	1.10(-5)
6	2.10(-3)	1.10(-3)	3.10(-4)	8.10(-5)
7	-1.10(-4)	-3.10(-5)	-4.10(-5)	-9.10(-7)
8	3.10(-2)	2.10(-2)	1.10(-4)	5.10(-5)
9	-3.10(-2)	-1.10(-2)	5.10(-4)	1.10(-3)

	Mw	Mvar	Mw	Mvar
10	-6.10(-5)	-4.10(-5)	1.10(-4)	3.10(-4)
11	-3.10(-5)	-2.10(-5)	2.10(-4)	7.10(-5)
12	-1.10(-5)	-1.10(-5)	-1.10(-4)	-5.10(-5)
13	1.10(-2)	6.10(-3)	4.10(-4)	5.10(-4)
14	2.10(-3)	-1.10(-3)	6.10(-4)	1.10(-4)
15	-1.10(-4)	-5.10(-5)	-7.10(-5)	-9.10(-7)
16	6.10(-3)	4.10(-3)	3.10(-4)	6.10(-5)
17	3.10(-3)	-3.10(-3)	3.10(-3)	2.10(-30)
18	-5.10(-5)	-1.10(-5)	-1.10(-4)	6.10(-6)
19	1.10(-2)	1.10(-2)	-5.10(-4)	-2.10(-4)
20	6.10(-5)	1.10(-5)	1.10(-5)	1.10(-5)
21	-7.10(-5)	-2.10(-5)	-9.10(-5)	4.10(-5)
22	3.10(-2)	2.10(-2)	5.10(-5)	2.10(-5)
23	-1.10(-2)	-1.10(-3)	1.10(-3)	3.10(-4)
24	-2.10(-3)	-2.10(-3)	2.10(-3)	6.10(-4)
25	8.10(-3)	6.10(-3)	6.10(-5)	-2.10(-5)
26	-1.10(-5)	-4.10(-6)	-3.10(-5)	2.10(-5)
27	6.10(-3)	4.10(-3)	1.10(-3)	4.10(-5)
28	5.10(-6)	-1.10(-6)	6.10(-4)	-3.10(-5)
29	9.10(-5)	2.10(-5)	3.10(-5)	3.10(-7)
30	-9.10(-5)	-2.10(-5)	7.10(-4)	4.10(-5)
31	1.10(-5)	5.10(-6)	2.10(-4)	-2.10(-5)
32	-9.10(-5)	1.10(-6)	5.10(-4)	3.10(-5)
33	-1.10(-6)	-4.10(-7)	2.10(-4)	1.10(-5)
34	-1.10(-5)	-4.10(-5)	2.10(-4)	1.10(-5)
35	-4.10(-3)	-4.10(-3)	1.10(-3)	1.10(-4)
36	-1.10(-5)	-4.10(-7)	-1.10(-4)	1.10(-5)
37	-3.10(-4)	-1.10(-4)	6.10(-4)	4.10(-5)
38	1.10(-3)	3.10(-4)	1.10(-5)	4.10(-6)
39	-6.10(-4)	-1.10(-4)	6.10(-4)	3.10(-5)
40	6.10(-4)	1.10(-4)	1.10(-4)	1.10(-6)
41	-1.10(-4)	3.10(-5)	3.10(-4)	2.10(-5)
42	4.10(-5)	1.10(-5)	1.10(-4)	5.10(-4)
43	5.10(-4)	1.10(-4)	-8.10(-7)	4.10(-6)
44	-5.10(-4)	-1.10(-4)	-1.10(-4)	7.10(-6)
45	-9.10(-4)	-6.10(-4)	3.10(-3)	7.10(-4)
46	-3.10(-5)	-1.10(-5)	8.10(-4)	-7.10(-5)
47	-5.10(-6)	-1.10(-6)	-2.10(-4)	2.10(-5)
48	4.10(-7)	9.10(-7)	-3.10(-4)	2.10(-5)
49	5.10(-4)	3.10(-4)	2.10(-4)	4.10(-5)
50	1.10(-3)	1.10(-3)	2.10(-4)	8.10(-5)
51	-1.10(-4)	-4.10(-4)	-3.10(-4)	-4.10(-6)
52	6.10(-4)	-3.10(-4)	5.10(-4)	5.10(-5)
53	-9.10(-5)	-4.10(-5)	-4.10(-4)	-3.10(-5)
54	-2.10(-2)	-4.10(-3)	-2.10(-4)	-6.10(-4)
55	-1.10(-2)	7.10(-4)	6.10(-4)	-9.10(-4)

Capítulo 3

Sistema 3

Resíduos de Potência Ativa (Mw) e Reativa (Mvar)

Número da Barra	Mw	Mvar
2	-5.10(-2)	-3.10(-2)
3	-9.10(-3)	-2.10(-2)
4	1.10(-2)	1.10(-2)
5	3.10(-2)	4.10(-2)
6	-7.10(-2)	-1.10(-2)
7	3.10(-2)	-5.10(-3)
8	-7.10(-3)	-4.10(-3)
9	3.10(-3)	-1.10(-2)
10	1.10(-2)	-5.10(-3)
11	-3.10(-4)	1.10(-4)
12	-3.10(-3)	1.10(-3)
13	-1.10(-3)	-3.10(-3)
14	3.10(-3)	-3.10(-3)
15	-2.10(-5)	-2.10(-4)
16	-8.10(-3)	-9.10(-4)
17	-2.10(-3)	1.10(-3)
18	-2.10(-3)	1.10(-3)
19	-3.10(-3)	2.10(-3)
20	-8.10(-3)	1.10(-3)
21	-1.10(-3)	1.10(-3)
22	-8.10(-4)	-2.10(-3)
23	-5.10(-3)	4.10(-3)
24	-7.10(-3)	5.10(-3)
25	7.10(-3)	-5.10(-3)
26	-5.10(-3)	3.10(-3)
27	-7.10(-3)	4.10(-3)
28	-5.10(-3)	3.10(-3)
29	-8.10(-3)	4.10(-3)
30	-1.10(-2)	5.10(-3)