

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

1210001157



Nº 49

**FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICO PARA
REDES DE DISTRIBUIÇÃO**
ALUNA: IARA FERNANDA E. DOSSI DENIS
ORIENTADOR: ANTONIO PADILHA FELTRIN

Te.1157

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICO PARA REDES DE
DISTRIBUIÇÃO

IARA FERNANDA EHRENBURG DOSSI DENIS

Orientador:

Antonio Padilha Feltrin

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira / FEIS / UNESP como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA**.

Ilha Solteira, março de 2000.

BCpIS - FEIS - UNESP



"Fluxo de Potência Trifásico para Redes de Distribuição"

IARA FERNANDA EHRENBURG DOSSI DENIS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA (ME).

1210001157



Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi – Coordenador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Antonio Padilha Feltrin - orientador

Prof. Dr. Petr Ya. Ekel

Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani

Proc. 017/2000-NRD 102-CISA

UNESP - "CAETANUS"	ILHA SOLTEIRA
SERVIÇO TÉCNICO	DOCUMENTAÇÃO
DATA DE CRIAÇÃO	DATA DE TOMBO
13.09.00	29.09.00
REC.	TOMBO
Ailza	Te. 1157
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
10395f	

10395f

Ilha Solteira – SP, março de 2000

BCpIS - FEIS - UNESP

unesp

A meus filhos, Beatriz e Thiago, brilho
incandescente de um grande ideal.



AGRADECIMENTOS

- A Deus que iluminou meu caminho e orientou meus passos;
- À minha família pela solidariedade irrestrita;
- Ao Professor Antonio Padilha Feltrin pela paciência, confiança, abnegação, encorajamento em todos os momentos na elaboração de meu trabalho;
- Aos Professores Carlos Roberto Minussi e José Roberto Sanches Mantovani pelo estímulo e amparo durante todo o processo de pós graduação e mestrado;
- A todos os docentes que de forma direta ou indireta colaboraram para a realização do meu empreendimento;
- Aos funcionários Deoclécio Mitsuiti Kosaka, Carlos Alex Sander J. Gulo e Arlindo Avanço Urzulin;
- Aos funcionários do DEE (Departamento de Engenharia Elétrica) da FEIS (Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira) e da Seção de Pós Graduação;
- Aos colegas do curso de pós-graduação;
- À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro.



RESUMO

Neste trabalho são analisados métodos de fluxo de potência para sistemas de distribuição trifásico equilibrados e desequilibrados. Os melhores métodos para solução de fluxo de potência trifásico são testados e seus resultados comparados. Estes métodos são: Desacoplados Derivados do Newton (XB e BX); Newton Raphson Considerando Injeção de Corrente (NR_1); Método Baseado na Ybus (NR_2) e Backward/Forward Sweep (BF). Os métodos XB, BX, NR_1 , NR_2 são aplicados para sistemas radiais e malhados, mas o método BF é aplicado para sistemas radiais e fracamente malhados.

ABSTRACT

In this work, it is discussed power flow methods for the solution of unbalanced and balanced three-phase distribution systems. The best existing methods for solving three-phase power flow are tested and the results discussed. These methods are: Decoupled Newton Types (XB and BX); current injection Newton Raphson Power Flow (NR_1); Algorithm Based on the Ybus Formulation (NR_2) and the Backward/Forward Sweep (BF). The methods XB, BX, NR_1 , NR_2 can be used for radial and meshed networks, but the backward/forward sweep is appropriated for radial systems and for weakly meshed network.



SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - MODELOS PARA SISTEMAS TRIFÁSICOS.....	3
2.1-MODELO TRIFÁSICO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS.....	3
2.2-MODELO TRIFÁSICO DA LINHA DE TRANSMISSÃO.....	4
2.2.1- <i>Linhas de Transmissão Mutuamente Acopladas</i>	4
2.3- MODELO TRIFÁSICO DE TRANSFORMADORES	4
CAPÍTULO III - MÉTODOS DE FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICO	4
3.1- MÉTODO DE NEWTON	4
3.2- MÉTODO DESACOPLADO RÁPIDO XB	4
3.3- MÉTODO DESACOPLADO RÁPIDO BX	4
3.4 – MÉTODO DE NEWTON RAPHSON CONSIDERANDO INJEÇÃO DE CORRENTE.....	4
3.5- MÉTODO BASEADO NA YBUS.....	4
3.6 - MÉTODO BACKWARD / FORWARD SWEEP.....	4
3.6.1- <i>Solução de sistemas radiais</i>	4
3.6.2- <i>Solução de sistemas fracamente malhados</i>	4
3.7- IMPLEMENTAÇÃO.....	4
CAPÍTULO IV - TESTES E RESULTADOS	4
4.1- SISTEMA 1	4
4.2- SISTEMA 2.....	4
4.3- SISTEMA 3.....	4
CAPÍTULO V - CONCLUSÃO.....	4
APÊNDICE A- SISTEMA 1	4
A.1- <i>Dados das Barras</i>	4
A.2- <i>Dados das linhas</i>	4
APÊNDICE B- SISTEMA 2.....	4
B.1- <i>Dados das Barras</i>	4
B.2- <i>Dados das Linhas</i>	4
APÊNDICE C- SISTEMA 3	4
C.1- <i>Dados da Barras</i>	4
C.2- <i>Dados das Linhas</i>	4
APÊNDICE D - CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	4

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O cálculo de fluxo de potência em redes de energia elétrica tem como principal objetivo a determinação do estado da rede e da distribuição dos fluxos. Através disto, pode-se verificar problemas de tensão, sobrecargas, cálculo das perdas visando o planejamento da operação e expansão do sistema; análise de contingências para verificar o efeito de saídas de linhas, transformadores e geradores; estudo da tensão e dos reativos a fim de testar a eficiência dos equipamentos; verificação da capacidade de transmissão com o objetivo de conhecer os limites de transferência; controle "on-line" e avaliação de segurança para verificar as medidas em situações de emergência, entre algumas outras grandezas de interesse. O problema do fluxo de potência pode ser formulado por um sistema de equações e inequações algébricas não-lineares correspondentes às leis de Kirchhoff e um conjunto de restrições operacionais da rede e de seus componentes.

O modelo de fluxo de potência mais utilizado em sistemas de energia elétrica considera o sistema de transmissão e as cargas como equilibrados, possibilitando a representação dos componentes do sistema de forma monofásica. Em sistemas de distribuição esta hipótese nem é sempre válida, sendo assim, há a necessidade de uma representação adequada dos diferentes componentes da rede de distribuição que permita avaliar as condições em que opera cada uma das fases.

Nos trabalhos desenvolvidos para resolução do fluxo de potência em sistemas elétricos, em modelagem trifásica, foram empregados basicamente o método de Gauss com algumas variações, e versões do método de Newton-Raphson, completa e desacoplada.



Para o método de cálculo computacional do fluxo de potência, alguns requisitos precisam ser considerados:

- rapidez de cálculos para aplicações em tempo real e sistemas de grande porte;
- necessidade de pouco armazenamento de dados para sistemas de grande porte;
- confiabilidade para aplicação em tempo real e problemas mal condicionados;
- versatilidade para manipular aspectos convencionais e especiais;
- simplicidade para facilitar a modificação e aumento do algoritmo;
- racionalidade de apresentação de informação sobre configuração;
- possibilidade de refletir as mudanças permanentes de configuração;

Neste trabalho buscou-se apresentar uma discussão dos principais métodos de cálculo de fluxo de potência trifásico e realizar uma sistemática comparação utilizando sistemas testes disponíveis na literatura. Muitos dos resultados apresentados na literatura são obtidos para sistemas reais, cujos dados nem sempre estão disponíveis para outros autores, o que tem produzido uma deficiência em termos de comparação de métodos. Para isso, o trabalho foi organizado da seguinte forma:

- No capítulo II aborda-se a modelagem do sistema trifásico, mostrando os modelos representativos e equacionamentos para a montagem de matrizes admitâncias de geradores, transformadores e linhas de transmissão mutuamente acopladas ou não.

- No capítulo III são discutidos os métodos de fluxo de potência para a solução de sistemas de distribuição trifásico desequilibrados e equilibrados. Estes métodos são: métodos desacoplados XB e BX (algoritmos tipo Newton), Fluxo de Potência Considerando Injeção de Corrente (NR₁), o método Baseado na Ybus (NR₂) e o método Backward/Forward Sweep (BF). Os métodos desacoplados rápidos e Newton com injeção de corrente trabalham com sistemas radiais e redes malhadas, e a matriz Jacobiana permanece constante, mas o método Backward/Forward Sweep é apropriado para sistemas radiais e para redes fracamente malhados.

- O capítulo IV é inteiramente dedicado a testes e comparações entre os métodos apresentados, com três sistemas: de sete barras [1], de 34 barras [7] e de 123 barras [7].

- No capítulo V é apresentada a conclusão.



CAPÍTULO II

MODELOS PARA SISTEMAS TRIFÁSICOS

Neste capítulo serão abordadas as regras que regem a formação da matriz admitância do sistema de energia elétrica e dos componentes deste que são: suas máquinas síncronas, as linhas de transmissão e seus transformadores. A modelagem apresentada é extraída da referência [1].

2.1-Modelo Trifásico de Máquinas Síncronas

As máquinas síncronas apresentam simetria entre os enrolamentos das três fases, sendo assim, são modeladas por suas impedâncias de seqüência. Estas impedâncias contêm todas as informações necessárias para a análise do comportamento das máquinas síncronas em regime e desequilíbrio entre as fases.

A representação dos geradores em componentes de fase pode ser obtida da seguinte maneira:

$$[Zg]_{abc} = [T] [Zg]_{012} [T]^{-1}, \quad (2.1)$$

em que: $[T]$ = matriz de transformação linear

$[Zg]_{012}$ é a matriz impedância de seqüência

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

em que: $a = \cos(120^\circ) + j \sin(120^\circ)$



Portanto a impedância de cada uma das fases “a, b e c” pode ser obtida como:

$$[Zg]_{abc} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_0 + Z_1 + Z_2 & Z_0 + aZ_1 + a^2Z_2 & Z_0 + a^2Z_1 + aZ_2 \\ Z_0 + a^2Z_1 + aZ_2 & Z_0 + Z_1 + Z_2 & Z_0 + aZ_1 + a^2Z_2 \\ Z_0 + aZ_1 + a^2Z_2 & Z_0 + a^2Z_1 + aZ_2 & Z_0 + Z_1 + Z_2 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

A matriz admitância nodal, relacionando as correntes injetadas nas barras do gerador com suas respectivas tensões, é obtida através da inversão da matriz $[Zg]_{abc}$. A excitação da máquina atua simetricamente nas três fases e as tensões nas barras internas formam um conjunto trifásico equilibrado: $E^a = E^b = E^c$, considerando seqüência direta. A figura 2.1 mostra o modelo de componentes de fase do gerador.

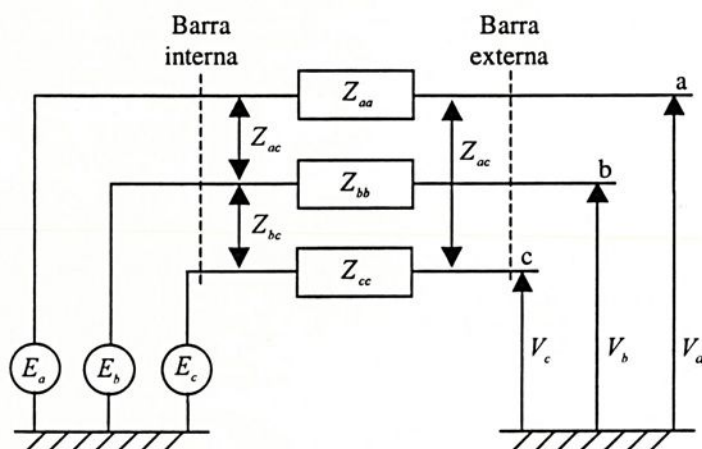


Figura 2.1 – representação de gerador, extraída de [1].

2.2-Modelo Trifásico da linha de Transmissão

As linhas de transmissão de sistemas elétricos podem ser representadas por um circuito equivalente em modelo π , sendo que no caso de análise trifásica as impedâncias série e admitâncias em derivação do modelo são grandezas matriciais, como mostra a figura 2.2.

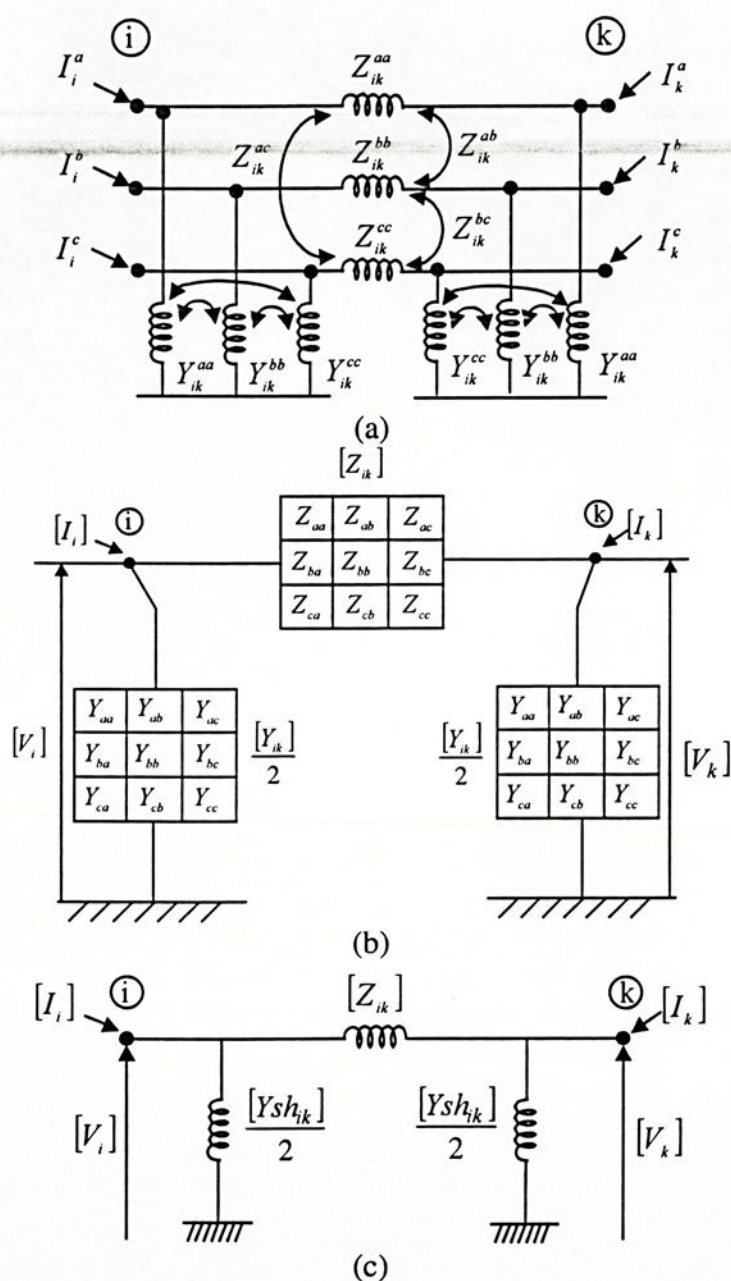


Figura 2.2 – modelo de linha de transmissão, extraída de [1].

- a) representação do circuito completo;
- b) matriz equivalente;
- c) usando associação de admitâncias trifásicas.

Segundo as regras desenvolvidas para a formação da matriz admitância usando o conceito de admitâncias compostas, as injeções de correntes nos nós podem ser relacionadas às respectivas tensões pela equação:

$$\begin{bmatrix} I_i^a \\ I_i^b \\ I_i^c \\ I_k^a \\ I_k^b \\ I_k^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ii}^{aa} + Ysh_{ii}^{aa} & Y_{ii}^{ab} + Ysh_{ii}^{ab} & Y_{ii}^{ac} + Ysh_{ii}^{ac} & -Y_{ik}^{aa} & -Y_{ik}^{ab} & -Y_{ik}^{ac} \\ Y_{ii}^{ba} + Ysh_{ii}^{ba} & Y_{ii}^{bb} + Ysh_{ii}^{bb} & Y_{ii}^{bc} + Ysh_{ii}^{bc} & -Y_{ik}^{ba} & -Y_{ik}^{bb} & -Y_{ik}^{bc} \\ Y_{ii}^{ca} + Ysh_{ii}^{ca} & Y_{ii}^{cb} + Ysh_{ii}^{cb} & Y_{ii}^{cc} + Ysh_{ii}^{cc} & -Y_{ik}^{ca} & -Y_{ik}^{cb} & -Y_{ik}^{cc} \\ -Y_{ik}^{aa} & -Y_{ik}^{ab} & -Y_{ik}^{ac} & Y_{kk}^{aa} + Ysh_{kk}^{aa} & Y_{kk}^{ab} + Ysh_{kk}^{ab} & Y_{kk}^{ac} + Ysh_{kk}^{ac} \\ -Y_{ik}^{ba} & -Y_{ik}^{bb} & -Y_{ik}^{bc} & Y_{kk}^{ba} + Ysh_{kk}^{ba} & Y_{kk}^{bb} + Ysh_{kk}^{bb} & Y_{kk}^{bc} + Ysh_{kk}^{bc} \\ -Y_{ik}^{ca} & -Y_{ik}^{cb} & -Y_{ik}^{cc} & Y_{kk}^{ca} + Ysh_{kk}^{ca} & Y_{kk}^{cb} + Ysh_{kk}^{cb} & Y_{kk}^{cc} + Ysh_{kk}^{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i^a \\ V_i^b \\ V_i^c \\ V_k^a \\ V_k^b \\ V_k^c \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

em que:

$[Y_{ik}] = [Z_{ik}]^{-1}$, as equações para obter Z, encontram-se no apêndice D.

2.2.1- Linhas de Transmissão Mutuamente Acopladas

Quando duas ou mais linhas de transmissão ocupam o mesmo “caminho” por um comprimento considerável, o acoplamento eletrostático e eletromagnético entre estas linhas devem ser levados em conta.

Seja o caso de duas linhas em paralelo como mostra a figura 2.3, cada linha é modelada por uma matriz admitância 3 x 3 e todas as tensões e correntes por vetores 3 x 1.

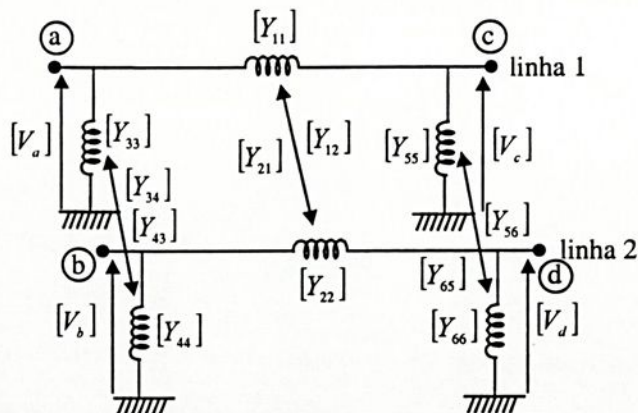


Figura 2.3 – representação de linhas paralelas, extraída de [1].

Os elementos série representam um acoplamento eletromagnético e os elementos em derivação representam acoplamento eletrostático. Mediante a aplicação das regras de transformação linear para o sistema da figura, a matriz admitância é definida como segue:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_D \end{bmatrix}_{12 \times 1} = \begin{bmatrix} Y_{11} + Y_{33} & Y_{12} + Y_{34} & -Y_{11} & -Y_{12} \\ Y_{12}^T + Y_{34}^T & Y_{22} + Y_{44} & -Y_{12}^T & -Y_{22} \\ -Y_{11} & -Y_{12} & Y_{11} + Y_{55} & Y_{12} + Y_{56} \\ -Y_{12}^T & -Y_{22} & Y_{12}^T + Y_{56}^T & Y_{22} + Y_{66} \end{bmatrix}_{12 \times 12} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_D \end{bmatrix}_{12 \times 1}, \quad (2.5)$$

sendo que o acoplamento é, por hipótese, bilateral $Y_{ij} = Y_{ji}^T$.

Assim as admitâncias antes representadas por matrizes 3 x 3, agora são representadas por matrizes 6 x 6, como podemos observar na figura 2.4.

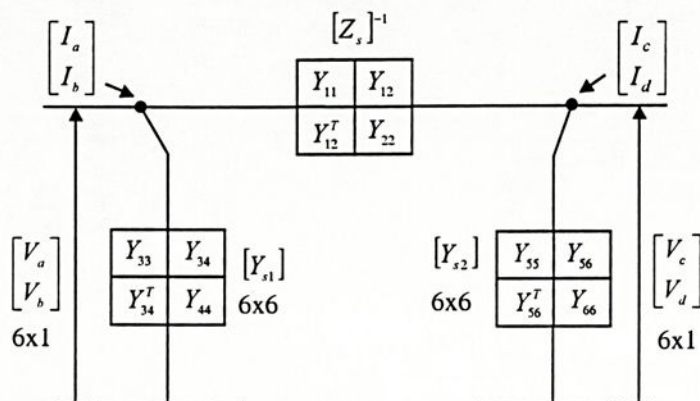


Figura 2.4 – modelagem das linhas, extraída de [1].

Considerando as linhas 1 e 2 da figura 2.3 conectadas a uma mesma barra, como mostra a figura 2.5, as correntes nodais podem ser representadas da seguinte maneira:

$$[I_1] = [I_A] + [I_B]$$

$$[I_2] = [I_C] + [I_D]$$

e as tensões como:

$$[V_1] = [V_A] = [V_B]$$

$$[V_2] = [V_C] = [V_D]$$

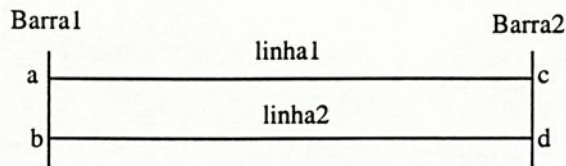


Figura 2.5- linhas de transmissão paralela mutuamente acopladas, extraído de [1].

sendo assim, tem-se:

$$\begin{aligned}
[I_1] &= \overbrace{([Y_{11}] + [Y_{33}] + [Y_{12}] + [Y_{34}] + [Y_{12}]^T + [Y_{34}]^T + [Y_{22}] + [Y_{44}])}^{[Y_{bus_{11}}]} [V_1] + \\
&\quad + \overbrace{(-[Y_{11}] - [Y_{12}] - [Y_{12}]^T - [Y_{22}])}^{Y_{bus_{12}}} [V_2] \\
[I_2] &= \overbrace{(-[Y_{11}] - [Y_{12}] - [Y_{12}]^T - [Y_{22}])}^{[Y_{bus_{21}}]} [V_1] + \\
&\quad + \overbrace{([Y_{11}] + [Y_{55}] + [Y_{12}] + [Y_{56}] + [Y_{12}]^T + [Y_{56}]^T + [Y_{22}] + [Y_{66}])}^{[Y_{bus_{22}}]} [V_2] \\
\begin{bmatrix} I_1^a \\ I_1^b \\ I_1^c \\ I_2^a \\ I_2^b \\ I_2^c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Y_{bus_{11}}^{aa} & Y_{bus_{11}}^{ab} & Y_{bus_{11}}^{ac} & -Y_{bus_{12}}^{aa} & -Y_{bus_{12}}^{ab} & -Y_{bus_{12}}^{ac} \\ Y_{bus_{11}}^{ba} & Y_{bus_{11}}^{bb} & Y_{bus_{11}}^{bc} & -Y_{bus_{12}}^{ba} & -Y_{bus_{12}}^{bb} & -Y_{bus_{12}}^{bc} \\ Y_{bus_{11}}^{ca} & Y_{bus_{11}}^{cb} & Y_{bus_{11}}^{cc} & -Y_{bus_{12}}^{ca} & -Y_{bus_{12}}^{cb} & -Y_{bus_{12}}^{cc} \\ -Y_{bus_{12}}^{aa} & -Y_{bus_{12}}^{ba} & -Y_{bus_{12}}^{ca} & Y_{bus_{22}}^{aa} & Y_{bus_{22}}^{ab} & Y_{bus_{22}}^{ac} \\ -Y_{bus_{12}}^{ab} & -Y_{bus_{12}}^{bb} & -Y_{bus_{12}}^{cb} & Y_{bus_{22}}^{ba} & Y_{bus_{22}}^{bb} & Y_{bus_{22}}^{bc} \\ -Y_{bus_{12}}^{ac} & -Y_{bus_{12}}^{bc} & -Y_{bus_{12}}^{cc} & Y_{bus_{22}}^{ca} & Y_{bus_{22}}^{cb} & Y_{bus_{22}}^{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^a \\ V_1^b \\ V_1^c \\ V_2^a \\ V_2^b \\ V_2^c \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

2.3- Modelo Trifásico de Transformadores

Tradicionalmente, os transformadores trifásicos são representados por seus circuitos equivalentes em componentes simétricos, já que a hipótese de que suas três fases são equivalentes. Mais recentemente, os métodos foram desenvolvidos para que as conexões mais usadas de transformadores trifásicos fossem modeladas em componentes de fase.

Em geral, o transformador trifásico de dois enrolamentos pode ser representado usando admitâncias compostas, conforme mostra a figura 2.6.

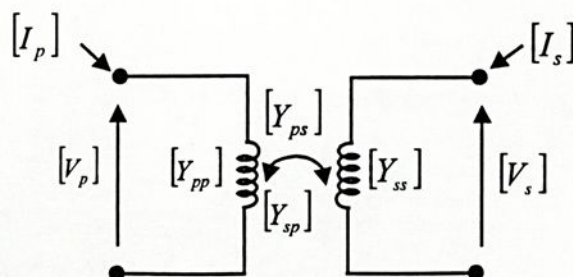


Figura 2.6 – representação de transformador, extraída de [1].

A equação matricial para esta representação é:

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{ps} \\ Y_{sp} & Y_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_s \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Deve-se notar que $[Y_{sp}] = [Y_{ps}]^T$, pois o acoplamento é bilateral.

Freqüentemente, por não haver necessidade de ter informações mais detalhadas, consideram-se os parâmetros das três fases como equilibradas. Neste caso as conexões comuns podem ser modeladas por três submatrizes básicas.

As submatrizes, $[Y_{pp}]$, $[Y_{ps}]$, entre outras, para as conexões mais comuns são mostradas na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – submatrizes características usadas na formação das matrizes admitâncias de transformadores extraída de [3].

Tipo de conexão		Admitâncias Próprias		Admitâncias Mútuas
Barra p	Barra s	Y_{pp}	Y_{ss}	Y_{ps}, Y_{sp}
Y - g	Y - g	Y_I	Y_I	$-Y_I$
Y - g	Y	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$
Y - g	Δ	Y_I	Y_{II}	Y_{III}
Y	Y	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$
Y	Δ	Y_{II}	Y_{II}	Y_{III}
Δ	Δ	Y_I	Y_{II}	$-Y_{II}$
Y - g – ligação estrela com neutro aterrado Y – ligação estrela; Δ - ligação delta				

Na Tabela 2.1 Y_I , Y_{II} e Y_{III} são:

$$Y_I = \begin{bmatrix} y_t & & \\ & y_t & \\ & & y_t \end{bmatrix}$$

$$Y_{II} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2y_t & -y_t & -y_t \\ -y_t & 2y_t & -y_t \\ -y_t & -y_t & 2y_t \end{bmatrix}$$

$$Y_{III} = \frac{\sqrt{3}}{3} \begin{bmatrix} -y_t & y_t & \\ & -y_t & y_t \\ y_t & & -y_t \end{bmatrix}$$



Finalmente, estas submatrizes podem ser modificadas para considerar relações de espiras iguais a α e β no primário e secundário, como segue:

- (i) dividindo as admitâncias própria do primário (Y_{pp}) por α^2 .
- (ii) dividindo as admitâncias própria do secundário (Y_{ss}) por β^2 .
- (iii) dividindo as admitâncias mútuas (Y_{ps} ou Y_{sp}) por $(\alpha\beta)$.



CAPÍTULO III

MÉTODOS DE FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICO

Quando se considera um sistema elétrico trifásico equilibrado, é possível realizar a sua representação através de uma rede de sequência positiva. Assumindo, também, que o sistema opera em regime permanente, pode-se calcular o fluxo na rede através de uma análise nodal. A partir deste ponto, as equações necessárias são obtidas pela aplicação da leis de Kirchhoff, e são descritas como segue [10]:

$$P_k = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}), \quad (3.1)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}), \quad (3.2)$$

em que:

P_k é a potência ativa da barra k ;

Q_k é a potência reativa da barra k ;

V_k é a magnitude da tensão nodal (barra k);

$\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$,

θ_k , θ_m são os ângulos das tensões das barras terminais das barras “ k ” e “ m ”;

Algumas restrições operacionais podem ser representadas através de condições atribuídas a cada barra, desta forma as barras são classificadas em [10]:

Barra PQ – são dados P_k e Q_k , e calculados V_k e θ_k ;

Barra PV – são dados P_k e V_k , e calculados Q_k e θ_k ;

Barra V θ (referência) – são dados V_k e θ_k , e calculados P_k e Q_k .



Este mesmo equacionamento, em coordenadas polares, pode ser realizado para uma representação que considere o desequilíbrio entre fases, e portanto, exija um equacionamento trifásico. Assim pode-se escrever [5]:

$$P_i^p = V_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m [G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm}], \quad (3.3)$$

$$Q_i^p = V_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m [G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm}], \quad (3.4)$$

em que:

$$\theta_{ik}^{pm} = \theta_i^p - \theta_k^m;$$

θ_i^p e θ_k^m são os ângulos das tensões das fases p e m nas barras i e k;

P_i^p e Q_i^p são, respectivamente, a potência ativa e reativa, os índices de i e k indicam as barras e os índices p e m representam as fases.

3.1- Método de Newton

A resolução das equações (3.3) e (3.4) exige um processo iterativo, uma vez que as incógnitas, V e θ , aparecem da forma implícita. A solução é obtida quando:

$$\Delta P_i^p = (P_i^p)^{esp} - P_i^p = 0 \quad (3.5)$$

$$\Delta Q_i^p = (Q_i^p)^{esp} - Q_i^p = 0 \quad (3.6)$$

em que:

$(P_i^p)^{esp}$ é a potência ativa especificada na fase "p" na barra "i";

$(Q_i^p)^{esp}$ é a potência reativa especificada na fase "p" na barra "i";

P_i^p é a potência ativa na fase "p" na barra "i";

Q_i^p é a potência reativa na fase "p" na barra "i";

A resolução através do método de Newton requer a formação de uma matriz jacobiana. Desta forma pode-se escrever [14]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$[H_{ik}^{pm}] = [\partial P_i^p / \partial \theta_k^m] \quad (3.8)$$

$$[N_{ik}^{pm}] = [\partial P_i^p / \partial V_k^m] \quad (3.9)$$

$$[M_{ik}^{pm}] = [\partial Q_i^p / \partial \theta_k^m] \quad (3.10)$$

$$[L_{ik}^{pm}] = [\partial Q_i^p / \partial V_k^m] \quad (3.11)$$

Os elementos H, N, M e L são dados por [16]:

$$H_{kk}^{mm} = -B_{kk}^{mm} (V_k^m)^2 - Q_k^m$$

$$H_{kk}^{pm} = V_k^p V_k^m [G_{kk}^{pm} \text{sen } \theta_{kk}^{pm} - B_{kk}^{pm} \text{cos } \theta_{kk}^{pm}]$$

$$H_{ik}^{mm} = V_i^m V_k^m [G_{ik}^{mm} \text{sen } \theta_{ik}^{mm} - B_{ik}^{mm} \text{cos } \theta_{ik}^{mm}]$$

$$H_{ik}^{pm} = V_i^p V_k^m [G_{ik}^{pm} \text{sen } \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \text{cos } \theta_{ik}^{pm}]$$

$$N_{kk}^{mm} = (G_{kk}^{mm} (V_k^m)^2 + P_k^m) / V_k^m$$

$$N_{kk}^{pm} = V_k^p [G_{kk}^{pm} \text{cos } \theta_{kk}^{pm} + B_{kk}^{pm} \text{sen } \theta_{kk}^{pm}]$$

$$N_{ik}^{mm} = V_i^m [G_{ik}^{mm} \text{cos } \theta_{ik}^{mm} + B_{ik}^{mm} \text{sen } \theta_{ik}^{mm}]$$

$$N_{ik}^{pm} = V_i^p [G_{ik}^{pm} \text{cos } \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \text{sen } \theta_{ik}^{pm}]$$

$$M_{kk}^{mm} = -G_{kk}^{mm} (V_k^m)^2 + P_k^m$$

$$M_{kk}^{pm} = -V_k^p V_k^m [G_{kk}^{pm} \text{cos } \theta_{kk}^{pm} + B_{kk}^{pm} \text{sen } \theta_{kk}^{pm}]$$

$$M_{ik}^{mm} = -V_i^m V_k^m [G_{ik}^{mm} \text{cos } \theta_{ik}^{mm} + B_{ik}^{mm} \text{sen } \theta_{ik}^{mm}]$$

$$M_{ik}^{pm} = -V_i^p V_k^m [G_{ik}^{pm} \text{cos } \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \text{sen } \theta_{ik}^{pm}]$$

$$L_{kk}^{mm} = (-B_{kk}^{mm} (V_k^m)^2 + Q_k^m) / V_k^m$$

$$L_{kk}^{pm} = V_k^p [G_{kk}^{pm} \text{sen } \theta_{kk}^{pm} + B_{kk}^{pm} \text{cos } \theta_{kk}^{pm}]$$

$$L_{ik}^{mm} = V_i^m [G_{ik}^{mm} \text{sen } \theta_{ik}^{mm} + B_{ik}^{mm} \text{cos } \theta_{ik}^{mm}]$$

$$L_{ik}^{pm} = V_i^p [G_{ik}^{pm} \text{sen } \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \text{cos } \theta_{ik}^{pm}]$$



3.2- Método Desacoplado Rápido XB

Uma das primeiras propostas de empregar métodos desacoplados no cálculo de fluxo de potência em redes de distribuição apareceu em [1]. Neste método, são feitas simplificações realizadas nas equações do método de Newton Raphson. As matrizes [M] e [N] são desprezadas, [H] e [L] calculadas no “flat-start”. As iterações P- θ e Q-V são desacopladas, as matrizes H e L podem permanecer constantes durante todo o processo iterativo. Portanto, as equações podem ser escritas como:

$$\frac{\Delta P}{V} = H \Delta \theta \quad (3.12)$$

$$\frac{\Delta Q}{V} = L \Delta V \quad (3.13)$$

$$H_{ik}^{pm} = G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} \quad (3.14)$$

$$L_{ik}^{pm} = G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} \quad (3.15)$$

As matrizes [H] e [L] permanecem constantes durante o processo iterativo, e são obtidas com:

$$\theta_i = \begin{bmatrix} 0^\circ \\ -120^\circ \\ 120^\circ \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

O algoritmo mostrado na figura 3.1, ilustra o método XB implementado por [10].



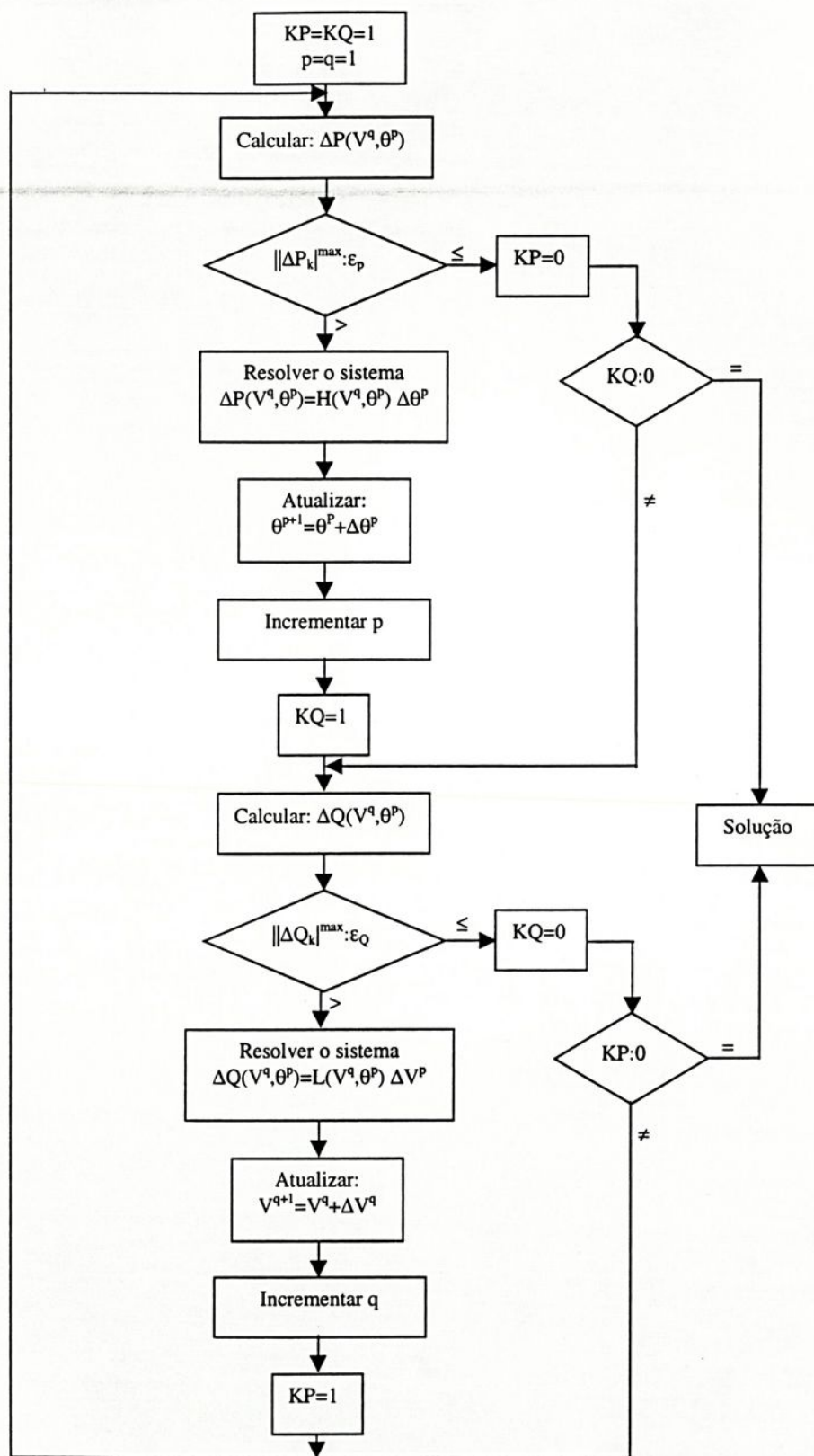


Figura 3.1 - Fluxograma simplificado do método desacoplado XB, similar ao método monofásico da referência [10].

3.3- Método Desacoplado Rápido BX

Este método, proposto em [15], testou a eficiência do desacoplamento para sistemas com altas relações R/X, e uma análise detalhada para sistemas com representação monofásica aparece em [11]. Uma das primeiras implementações trifásica deste método foi apresentada em [5], sendo que os resultados apresentados, mostram um desempenho superior em relação ao Método XB. Neste método as iterações P- θ e Q-V também são desacopladas e as matrizes constantes, exigindo menor esforço computacional.

Equacionamento:

$$\frac{\Delta P}{V} = H' \Delta \theta, \quad (3.17)$$

$$\frac{\Delta Q}{V} = L' \Delta V, \quad (3.18)$$

em que:

H' é uma matriz de dimensão $n \times n$, em que n é o número de barras PQ mais PV. A matriz H' é formada como segue:

$$H'_{ik}{}^{pm} = G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} \quad (3.19)$$

L' é uma, matriz de dimensão $n \times n$, em que n é o número de barras PQ. A matriz L' é formada a partir das submatrizes 3×3 , como segue:

$$L'_{ik}{}^{pm} = (T_{ik}^{pm})^{-1} \quad (3.20)$$

$$L'_{ii}{}^{pp} = (T_{ii}^{pp})^{-1} - 2Ysh_{ii}^{pp} \quad (3.21)$$

$$T_{ik}^{pm} = -R_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} + X_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} \quad (3.22)$$

$$T_{ii}^{pm} = T_{ik}^{pm} \quad (3.23)$$

$$T_{ik}^{pp} = T_{ik}^{pm} \quad (3.24)$$

$$T_{ii}^{pp} = -R_{ii}^{pp} \sin \theta_{ii}^{pp} + X_{ii}^{pp} \cos \theta_{ii}^{pp} \quad (3.25)$$

em que:

R_{ik}^{pm} é a resistência do elemento série de ligação

X_{ik}^{pm} é a reatância do elemento série de ligação

Ysh_{ii}^{pp} é uma matriz de dimensão (3×3) , contendo elementos somente na diagonal, correspondendo os valores das admitâncias shunt;

A figura 3.2 mostra o algoritmo BX, similar ao método monofásico da referência [10].

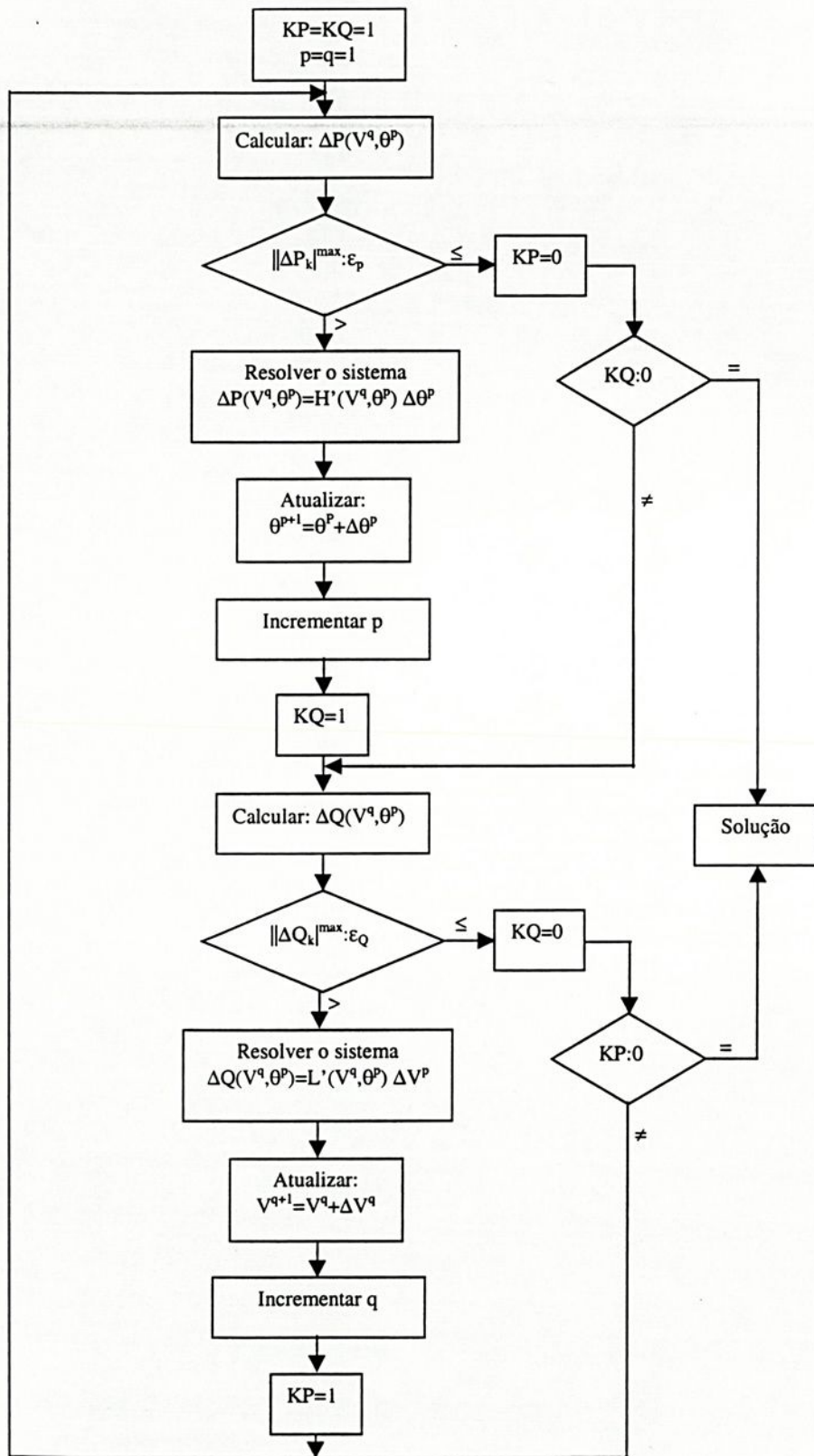


Figura 3.2 - Fluxograma do método desacoplado BX, similar ao método monofásico da referência [10].



3.4 – Método de Newton Raphson Considerando Injeção de Corrente

Este método, apresentado em [6], é aplicado para soluções de sistemas trifásicos, com cargas desequilibradas, em que as equações das correntes injetadas são escritas em coordenadas retangulares, como mostram as equações (3.26-3.28), e a matriz jacobiana é formada por blocos (6 x 6) e será aproximadamente igual à matriz admitância nodal (equação (3.29)), sendo esta variação determinada pelo modelo de carga adotado. A referência [6] mostra que a matriz jacobiana pode ou não ser atualizada durante o processo iterativo, visto que o número de iterações, sendo ela constante, é pouco maior.

$$\Delta I_k^{abc} = \Delta I_{rk}^{abc} + j\Delta I_{mk}^{abc}, \quad (3.26)$$

em que:

ΔI_k^{abc} indica os resíduos de correntes nas fases a, b, c para uma barra k.

ΔI_{rk}^{abc} é a parte real de ΔI_k^{abc}

ΔI_{mk}^{abc} é a parte imaginária de ΔI_k^{abc}

$$\Delta I_{rk}^{abc} = (I_{rk}^{sp})^{abc} - (I_{rk}^{calc})^{abc} \quad (3.27)$$

$$\Delta I_{mk}^{abc} = (I_{mk}^{sp})^{abc} - (I_{mk}^{calc})^{abc} \quad (3.28)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{m1}^{abc} \\ \Delta I_{r1}^{abc} \\ \Delta I_{m2}^{abc} \\ \Delta I_{r2}^{abc} \\ \vdots \\ \Delta I_{mn}^{abc} \\ \Delta I_{rn}^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\dot{Y}_{11} \right)^{abc} & Y_{12}^{abc} & \dots & Y_{1n}^{abc} \\ Y_{21}^{abc} & \left(\dot{Y}_{22} \right)^{abc} & \dots & Y_{2n}^{abc} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1}^{abc} & Y_{n2}^{abc} & \dots & \left(\dot{Y}_{nn} \right)^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{r1}^{abc} \\ \Delta V_{m1}^{abc} \\ \Delta V_{r2}^{abc} \\ \Delta V_{m2}^{abc} \\ \vdots \\ \Delta V_{rn}^{abc} \\ \Delta V_{mn}^{abc} \end{bmatrix}, \quad (3.29)$$

em que:

$$Y_{km}^{abc} = \begin{bmatrix} B_{km}^{abc} & G_{km}^{abc} \\ G_{km}^{abc} & B_{km}^{abc} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

ou de forma simplificada tem-se:

$$I_{mr}^{abc} = Y_{rm}^{abc} V_{rm}^{abc}$$

A matriz Y_{km}^{abc} representa um elemento genérico da matriz admitância nodal, sendo as variáveis tensões nodais e correntes injetadas expressas em coordenadas retangulares, como é mostrado na equação (3.31).

$$\begin{bmatrix} I_m^{abc} \\ I_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B^{abc} & G^{abc} \\ G^{abc} & -B^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r^{abc} \\ V_m^{abc} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Os elementos diagonais da matriz jacobiana $((Y_{kk}^*)^{abc})$, para carga tipo impedância constante, são dados por:

$$(Y_{kk}^*)^{abc} = \begin{bmatrix} (B_{kk}^{'})^{abc} & (G_{kk}^{'})^{abc} \\ (G_{kk}^{''})^{abc} & (B_{kk}^{''})^{abc} \end{bmatrix}, \quad (3.32)$$

em que:

$$(B_{kk}^{'})^{abc} = B_{kk}^{abc} - \begin{bmatrix} Q_k^a & & \\ & Q_k^b & \\ & & Q_k^c \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$(G_{kk}^{'})^{abc} = G_{kk}^{abc} + \begin{bmatrix} P_k^a & & \\ & P_k^b & \\ & & P_k^c \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$(G_{kk}^{''})^{abc} = G_{kk}^{abc} + \begin{bmatrix} P_k^a & & \\ & P_k^b & \\ & & P_k^c \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$(B_{kk}^{''})^{abc} = -B_{kk}^{aa} + \begin{bmatrix} Q_k^a & & \\ & Q_k^b & \\ & & Q_k^c \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Os resíduos de potência ativa (ΔP_k^{abc}) e reativa (ΔQ_k^{abc}) são definidos como:

$$(\Delta P_k^{abc}) = (P_k^{esp})^{abc} - (P_k^{calc})^{abc}, \quad (3.37)$$

$$(\Delta Q_k^{abc}) = (Q_k^{esp})^{abc} - (Q_k^{calc})^{abc}, \quad (3.38)$$

sendo:

$$P_k^{calc} = V_{rk}^{abc} (I_{rk}^{calc})^{abc} + V_{mk}^{abc} (I_{mk}^{calc})^{abc} \quad (3.39)$$

$$Q_k^{calc} = V_{mk}^{abc} (I_{rk}^{calc})^{abc} - V_{rk}^{abc} (I_{mk}^{calc})^{abc} \quad (3.40)$$



O Algoritmo proposto pelo método de NR₁ é mostrado na figura 3.3:

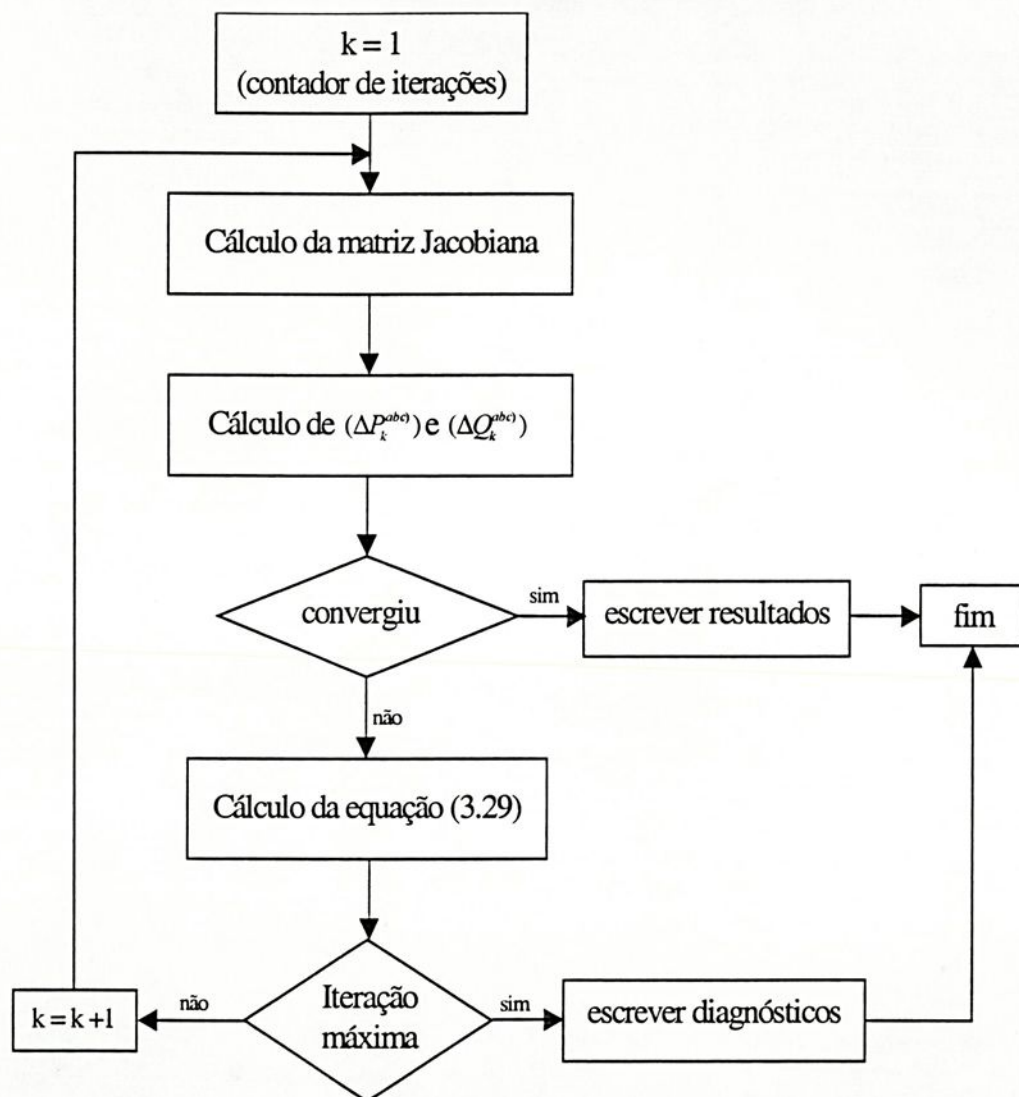


Figura 3.3 - Newton Raphson Considerando Injeção de Corrente, implementado por [6].

3.5- Método Baseado na Ybus

Este método, apresentado em [9], é aplicado para solução de sistemas de distribuição radiais e malhados. A matriz Jacobiana (matriz A), em sistemas trifásicos, é formada por blocos (6x6) e dividida em duas matrizes, como é mostrado em (3.41). A matriz a esquerda é formada pelas partes real e imaginária da matriz admitância do sistema e se mantém constante durante as iterações. Já a outra matriz, será atualizada durante o processo iterativo. O vetor ΔI (variação da corrente) também será atualizado durante o processo iterativo. As tensões das barras do sistema, equação (3.42), são atualizadas até atingirem a convergência (ΔP e ΔQ forem menores ou iguais à tolerância estipulada).

$$A = \begin{bmatrix} G_{11} & -B_{11} & G_{12} & -B_{12} & \dots & G_{1,3n} & -B_{1,3n} \\ B_{11} & G_{11} & B_{12} & G_{12} & \dots & B_{1,3n} & G_{1,3n} \\ G_{21} & -B_{21} & G_{22} & -B_{22} & \dots & G_{2,3n} & -B_{2,3n} \\ B_{21} & G_{21} & B_{22} & G_{22} & \dots & B_{2,3n} & G_{2,3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ G_{3n1} & -B_{3n1} & G_{3n1} & -B_{3n1} & \dots & G_{3n3n} & -B_{3n3n} \\ B_{3n1} & G_{3n1} & B_{3n1} & G_{3n1} & \dots & B_{3n3n} & G_{3n3n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{R1} & D_{I1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ D_{I1} & -D_{R1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{R2} & D_{I2} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{I2} & -D_{R2} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & D_{R3n} & D_{I3n} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & D_{I3n} & -D_{R3n} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

em que cada elemento das duas matrizes representam submatrizes 3x3, por exemplo:

$$G_{11} = \begin{bmatrix} G_{11}^{aa} & G_{11}^{ab} & G_{11}^{ac} \\ G_{11}^{ba} & G_{11}^{bb} & G_{11}^{bc} \\ G_{11}^{ca} & G_{11}^{cb} & G_{11}^{cc} \end{bmatrix}$$

$$D_{R1} = \begin{bmatrix} D_{R1}^{aa} & 0 & 0 \\ 0 & D_{R1}^{bb} & 0 \\ 0 & 0 & D_{R1}^{cc} \end{bmatrix}$$

sendo que os números indicam as barras e as letras indicam as fases.

temos que:

$$D_p = \frac{P_p^{esp} + jQ_p^{esp}}{(V_p^*)^2}$$

p = número da barra

D_R = parte real de D

D_I = parte imaginária de D

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{R1} \\ \Delta I_{I1} \\ \Delta I_{R2} \\ \Delta I_{I2} \\ \vdots \\ \Delta I_{R3n} \\ \Delta I_{I3n} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \Delta V_{R1} \\ \Delta V_{I1} \\ \Delta V_{R2} \\ \Delta V_{I2} \\ \vdots \\ \Delta V_{R3n} \\ \Delta V_{I3n} \end{bmatrix}, \quad (3.42)$$

sendo que cada elemento representa um vetor com três elementos, como:

$$\Delta I_{R1} = \begin{bmatrix} \Delta I_{R1}^a \\ \Delta I_{R1}^b \\ \Delta I_{R1}^c \end{bmatrix}$$

$$P_p = \sum_{q=1}^n \{Vr_p (Vr_q G_{pq} + Vm_q B_{pq}) + Vm_p (Vm_q G_{pq} - Vr_q B_{pq})\} \quad (3.43)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^n \{Vm_p (Vr_q G_{pq} + Vm_q B_{pq}) + Vr_p (Vm_q G_{pq} - Vr_q B_{pq})\} \quad (3.44)$$

O algoritmo proposto pelo método de formulação baseada na Ybus é mostrado na figura 3.4.

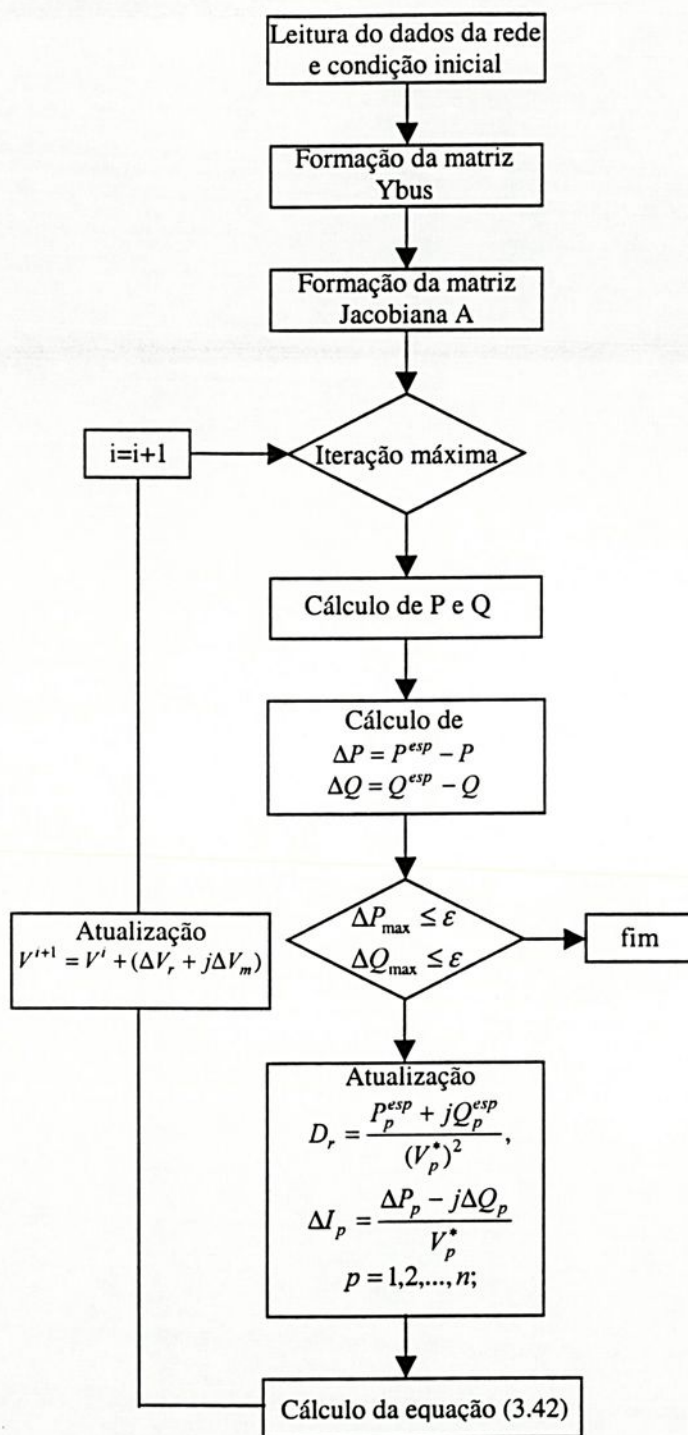


Figura: 3.4- Algoritmo extraído de [9].

Este método é idêntico ao método “Fluxo de Potência para Sistemas de Distribuição Baseado em Injeção de Corrente” quando o tipo de carga considerado for do tipo potência constante.

3.6 - Método Backward / Forward Sweep

Este método, apresentado em [12], é aplicado na solução do problema de fluxo de potência de sistemas radiais ou fracamente malhados, que possam ser convertido para a forma radial.

3.6.1- Solução de sistemas radiais

Seguindo uma seqüência de camadas, numera-se os ramos, conforme a figura 3.5, ou seja, o sistema é dividido em camadas sendo necessário numerar todos os ramos de uma camada para depois iniciar a numeração dos ramos da camada seguinte. Após esta numeração dos ramos e dada a tensão da origem do nó, a solução iterativa do algoritmo é realizada em três etapas:

- cálculo da corrente do nó, equação (3.45)
- cálculo da correntes no ramo (backward sweep) , equação (3.46)
- cálculo da tensão no nó (forward sweep), equação (3.47)

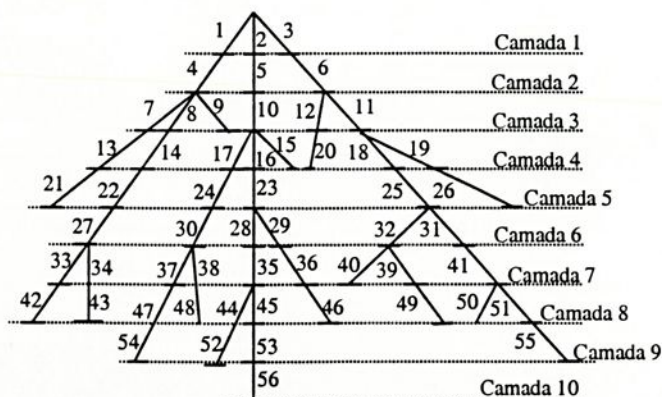


Figura 3.5 - numeração dos ramos da rede de distribuição radial, extraído de [12].

3.6.2- Solução de sistemas fracamente malhados

Primeiramente é necessário transformar este sistema em estritamente radial. Para isso, a rede será seccionada por “breakpoint”, as correntes dos ramos interrompidos serão substituídas por injeções de correntes nestes dois nós finais, com polaridade oposta, sem afetar a condição de operação do sistema, sendo possível, agora, aplicar a técnica de solução radial.

A figura 3.6 mostra uma típica rede de distribuição fracamente malhada composta por laços simples, com nós, $(b=n-1)$ ramos e uma única fonte de tensão para origem nodal. As aplicações mostradas em [12] mostram que somente poucas iterações foram necessárias para solucionar o fluxo de potência proposto por esta técnica.

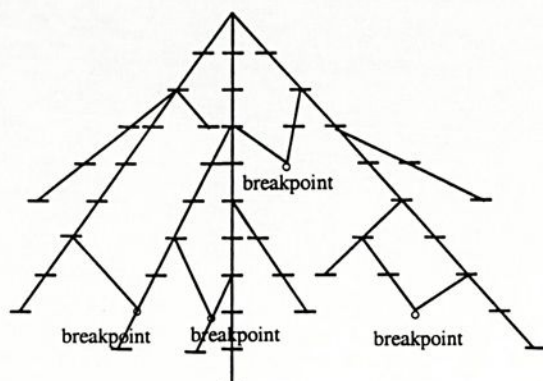


Figura 3.6 - Rede de distribuição fracamente malhada, extraída de [12].

Um dos problemas da aplicação deste método ocorre com o aumento do número de “breakpoints” necessários para converter a rede malhada numa configuração radial, pois este aumento causa uma diminuição na eficiência numérica do método de fluxo de potência, o que restringe a aplicação do método para redes malhadas, com a impossibilidade de considerar a rede de subtransmissão juntamente com a de distribuição.

O fluxograma da figura 3.7, que ilustra a solução de redes de distribuição radiais foi proposto em [9], sendo que para redes de distribuição fracamente malhada é necessário incluir os cálculos da corrente do “breakpoint”, usando o método de compensação de multi-port, ou seja, transformando o sistema fracamente malhado em um sistema radial. As equações mencionadas no fluxograma são mostradas abaixo, sendo :

Cálculo da corrente nodal:

$$I_i^{(k)} = (S_i^{esp} / V_i^{(k+1)})^* - Ysh_i V_i^{(k-1)}, \quad (3.45)$$

em que:

$i=1,2,...,n$

$I_i^{(k)}$ é a corrente no nó i para a iteração k

$V_i^{(k-1)}$ é a tensão para o nó i , calculada durante a iteração $(k-1)^{th}$

S_i é a injeção de potência especificada no nó i

Ysh_i é a soma de todos os elementos shunts para o nó i

Cálculo da corrente no ramo (*backward sweep*):

Na iteração k , começando no ramo da última camada e deslocando em direção aos ramos relacionados na origem do nó, pode-se calcular a corrente no ramo L da seguinte forma:

$$J_L^{(k)} = I_{n2}^{(k)} + \sum (\text{das correntes que "chegam em } n2, \text{ devido a ramos de camadas inferiores}), \quad (3.46)$$

em que:

$$L = b, b-1, \dots, 1 (b \text{ é o número dos ramos de cada camada}) ;$$

$$I_{n2}^{(k)} \text{ é a corrente injetada no nó } n2.$$

Cálculo da tensão nodal (*forward sweep*):

A tensão no nó é calculada começando dos nós dos ramos da primeira camada para a última camada ("forward sweep"). Para cada ramo L , a tensão do nó $n2$ é obtida de acordo com a equação (3.47).

$$V_{n2}^{(k)} = V_{n1}^{(k)} - Z_L J_L^{(k)}, \quad (3.47)$$

em que:

$$L = 1, 2, \dots, b ;$$

$$Z_L \text{ é a impedância em série do ramo } L.$$

$$S_i^{(k)} = V_i^{(k)} (I_i^{(k)})^* - Ysh_i |V_i^{(k)}|^2 \quad (3.48)$$

em que:

$$S_i^{(k)} \text{ é a potência injetada no nó } i \text{ para a iteração } k.$$

$$\Delta P_i^{(k)} = \text{real}[S_i^{(k)} - S_i^{esp}] \quad (3.49)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = \text{imag}[S_i^{(k)} - S_i^{esp}] \quad (3.50)$$



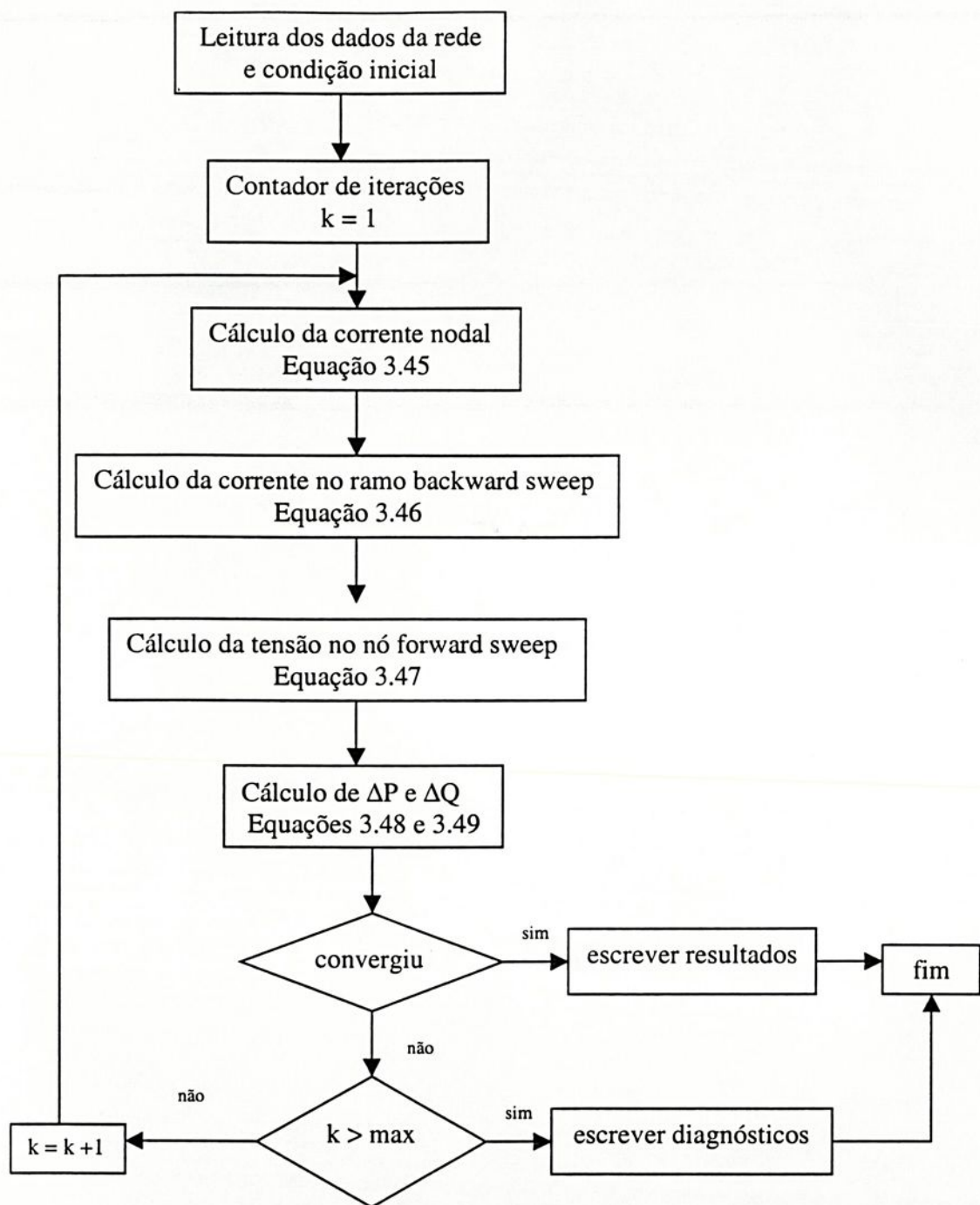


Figura 3.7 - Algoritmo para Solução de Fluxo de Potência para redes radiais, extraído de [12].

3.7- Implementação

Alguns métodos, embora não implementados nesta publicação, merecem destaque entre os números existentes. São eles: os simplificados para estimação de perdas [2] e [4]; e Efficient Load Flow for Large Weakly Meshed Networks [8] que é, em essência, idêntico ao Backward/Forward Sweep, mudando apenas o processo de cortes para sistemas fracamente malhado.

Os métodos que serão analisados no capítulo IV são: métodos desacoplados BX e XB, Fluxo de Potência Considerando Injeção de Corrente (NR_1), o método Baseado na Ybus (NR_2) e o método Backward/Forward Sweep (BF).



CAPÍTULO IV

TESTES E RESULTADOS

Foi implementado um programa computacional em FORTRAN, para simular fluxo de potência trifásico usando os algoritmos Desacoplado XB, Desacoplado BX, Newton Raphson Considerando Injeção de Corrente, Método de Formulação Baseada na Ybus e Backward/Forward Sweep.

Os testes foram realizados usando um sistema de 7 barras, proposto em [1], um sistema de 34 barras, proposto em [7] e um sistema de 119 barras, proposto em [7].

4.1- Sistema 1

Nesta etapa, serão apresentados os resultados de testes feitos para um sistema de sete barras e dois geradores, sendo que os dados deste sistema se encontram no apêndice A.

Os resultados obtidos, em termos de número de iterações, para os quatro métodos (XB, BX, NR (impedância constante) e NR (potência constante)) são mostrados na tabela 4.1. O método BF não foi aplicado para este sistema.

As tabelas 4.2 à 4.4, contêm os resultados da variações de $P_{consumido}$, $Q_{consumido}$ e da razão r/x (resistência por reatância), respectivamente, para os métodos XB, BX, NR (impedância constante) e NR (potência constante), considerando uma tolerância de 0,001 p.u.

Tabela 4.1 - Número de Iterações com os Métodos XB, BX, NR₁ e NR₂.

Tolerância em p.u.	XB	BX	NR ₁	NR ₂
0,01	7/6	4/3	6	2
0,001	10/9	5/5	8	3
0,0005	11/11	6/5	9	3



Tabela 4.2 - Variação de Carga (potência ativa consumida)

carga	XB	BX	NR ₁	NR ₂
1,2*Pcons	11/10	5/4	8	3
1,4*Pcons	11/11	5/5	9	4
1,6*Pcons	12/12	7/6	20	5

Tabela 4.3 - Variação de Carga (potência reativa consumida)

carga	XB	BX	NR ₁	NR ₂
1,2*Qcons	11/10	5/5	9	3
1,4*Qcons	11/10	5/5	12	3
1,6*Qcons	11/10	6/5	18	3

Tabela.4.4 - Variação da Razão r/x (resistência pela reatância)

carga	XB	BX	NR ₁	NR ₂
1,5*R/X	11/10	5/4	9	3
2,0*R/X	12/11	5/4	10	3
2,5*R/X	13/13	6/5	11	3
3,0 *R/X	15/14	6/5	13	3

4.2- Sistema 2

Sistema de distribuição de 34 barras, composto por linhas de transmissão aéreas trifásicas (equilibradas e desequilibradas), cargas monofásicas e bancos de capacitores “shunt”. Os dados referentes a este sistemas são apresentados no apêndice B.

Os resultados obtidos, em termos de número de iterações, para os cinco métodos (XB, BX, NR (tipo impedância constante), NR (tipo potência constante) e BF) são mostrados na tabela 4.5.

As tabelas números 4.6 à 4.9, contêm os resultados da variações Pconsumido, Qconsumido, Pconsumido e Qconsumido simultaneamente e da razão r/x (resistência por reatância), respectivamente, para os métodos desacoplados XB, BX, Newton Raphson Considerando Injeção de Corrente (tipo impedância constante), Newton Raphson Considerando Injeção de Corrente (tipo potência constante) e Backward/Forward Sweep.

Tabela 4.5 - Número de Iterações com a variação da tolerância.

Tolerância em p.u.	XB	BX	NR ₁	NR ₂	BF
0,01	diverge	6/5	2	1	2
0,001	diverge	7/7	4	2	3
0,0005	Diverge	8/8	5	2	3



Tabela 4.6 - Número de Iterações com a variação de Carga (potência ativa consumida)

Carga	XB	BX	NR ₁	NR ₂	BF
1,2*Pcons	diverge	8/7	5	2	3
1,4*Pcons	diverge	8/8	7	16	4
1,6*Pcons	Diverge	10/9	9	26	5
1,8*Pcons	Diverge	11/11	17	diverge	7
2,0*Pcons	Diverge	17/17	diverge	diverge	11

Tabela 4.7 - Número de Iterações com a variação de Carga (potência reativa consumida)

carga	XB	BX	NR ₁	NR ₂	BF
1,2*Qcons	diverge	8/7	4	2	3
1,4*Qcons	diverge	8/7	4	2	3
1,6*Qcons	diverge	8/7	3	4	3
1,8*Qcons	diverge	8/7	4	6	3
2,0*Qcons	diverge	8/7	5	21	4

Tabela 4.8 - Variação das cargas ativa e reativa

Pcons e Qcon	XB	BX	NR ₁	NR ₂	BF
1,2*	diverge	7/7	5	3	4
1,4*	diverge	9/8	7	18	4
1,6*	diverge	10/9	13	diverge	6
1,8*	diverge	12/12	diverge	diverge	9
2,0*	diverge	diverge	diverge	diverge	diverge

Tabela 4.9 - Número de Iterações com a variação da razão entre r e x (resistência e a reatância)

R/X	XB	BX	NR ₁	NR ₂	BF
1.2* R/X	diverge	8/7	5	2	3
1.4* R/X	diverge	10/9	6	2	4
1.6* R/X	diverge	11/10	7	diverge	4
1.8* R/X	diverge	diverge	12	diverge	5
2.0* R/X	diverge	diverge	64	diverge	6

4.3- Sistema 3

Sistema de distribuição de 119, composto por linhas de transmissão aéreas trifásicas, bifásicas e monofásicas, cargas trifásicas (equilibradas e desequilibradas), cargas monofásicas, bancos de capacitores trifásicos e monofásicos e um motor de 150HP com fator de potência igual a 0,8 conectado à barra 119. Os dados deste sistema estão no apêndice C.



Os resultados obtidos, em termos de número de iterações, para os cinco métodos (XB, BX, Newton Raphson Considerando Injeção de Corrente (NR₁), Método de formulação Baseada na Ybus(NR₂) e Backward/Forward Sweep (BF)), são mostrados na tabela 4.10.

As tabelas números 4.11 à 4.12 contêm os resultados das variações de Pconsumido, Qconsumido e da razão r/x (resistência por impedância), respectivamente, para os métodos desacoplados XB, BX, NR, BF.

Tabela 4.10 - Número de Iterações com a variação da tolerância.

Tolerância em p.u.	XB	BX	NR ₁	NR ₂	BF
0,01	4/4	3/3	2	1	1
0,001	6/6	4/3	3	2	2
0,0001	6/6	4/3	3	4	3

Tabela 4.11 - Número de Iterações com a variação de Carga (potência ativa consumida)

Carga	XB	BX	NR ₁	NR ₂	BF
2,0*Pcons	6/5	4/4	4	2	3
3,0*Pcons	6/5	5/4	6	diverge	6
4,0*Pcons	11/10	11/10	7	diverge	diverge
5,0*Pcons	diverge	diverge	9	diverge	diverge

Tabela 4.12 - Número de Iterações com a variação de Carga (potência reativa consumida)

Carga	XB	BX	NR ₁	NR ₂	BF
2,0*Qcons	6/6	4/4	4	2	2
3,0*Qcons	6/6	5/4	5	2	2
4,0*Qcons	6/6	5/5	8	diverge	2
5,0*Qcons	7/6	7/6	24	diverge	2

Tabela 4.13 - Variação das cargas ativa e reativa

Pcons e Qcon	XB	BX	NR ₁	NR ₂	BF
2,0	6/5	5/4	5	4	3
3,0	9/8	10/9	7	diverge	6
4,0	diverge	diverge	diverge	diverge	diverge

Tabela 4.14 - Número de Iterações com a variação da razão entre r e x (resistência e a reatância)

R/X	XB	BX	NR ₁	NR ₂	BF
1,2	7/7	4/3	3	2	2
1,4	16/16	4/3	3	2	2
1,6	diverge	4/4	3	2	2
1,8	diverge	4/4	3	2	2
2,0	diverge	5/4	4	3	3



CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

Os cinco métodos de cálculo de fluxo de potência para redes de distribuição de energia elétrica, com uma modelagem trifásica, foram analisados em diferentes condições. Os sistemas podem apresentar cargas equilibradas ou não, bem como cargas monofásicas, bifásicas ou trifásicas. Os algoritmos e o equacionamento fundamental foi apresentado e analisado.

Resultados com sistemas testes conhecidos foram apresentados. O método XB foi o que apresentou o pior desempenho em todos os testes realizados, sendo que muitas vezes não houve convergência, assim este método tem pouca utilidade prática. As principais razões para o fraco desempenho é que as aproximações utilizadas na formulação do desacoplamento consideraram redes de alta tensão de transmissão, características que não são encontradas nas redes de distribuição. O método BX apresenta um bom desempenho em termos de convergência, porém com números elevados em comparação com NR_1 , NR_2 e BF. Dentre estes últimos o BF apresenta melhor convergência e menos demanda computacional, porém tem a utilização limitada a rede de distribuição. Quando se deseja simular a rede de subtransmissão agregada a de distribuição seu desempenho pode piorar muito ou mesmo não convergir, devido ao fato de aparecerem malhas nos circuitos e outras barras PV's. Para sistemas radiais, com uma única fonte, tem superior performance. Os métodos NR_1 e NR_2 têm aplicação ampla e apresentam boa convergência, sendo que as matrizes necessárias nestes métodos são de ordem superior as do método BX. No método NR_2 a matriz jacobiana tem os elementos da diagonal alterados porém isto exige uma nova inversão da matriz. Em termos de qualidade da resposta a modelagem das cargas como impedância constante (método NR_1) ou potência constante (método NR_2) não levaram a



valores de fluxos ou perfis de tensão muito diferentes. Porém para outros sistemas a modelagem da carga pode ser mais significativa, assim sendo, mais testes precisam ainda ser realizados. Por sua ampla aplicabilidade e características de convergência, com uma matriz jacobiana constante, o método NR_1 merece destaque.

Em todos os métodos foram empregadas técnicas de esparsidade de matrizes, que envolvem o armazenamento dos elementos diferentes de zero, uma ordenação, uma fatoração (apenas o NR_2 exige que a fatoração seja refeita quando a jacobiana é alterada), e soluções diretas para solução em cada iteração.

A fim de evidenciar melhor as diferenças entre os métodos, testes com sistemas reais devem ser realizados e para aumentar a gama de aplicação do programa computacional, diferentes modelos de componentes devem ser implementados.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ARRILLAGA, J., ARNOLD, C. P., HARKER, B. J. *Computer modeling of Eletircal Power Systems*: John Wiley & Sons, 1990.
- [2] BARAN, M. E. and WU, F. F. *Network Reconfiguration in Distributiom Systems for Loss Reduction and Load Balancing*. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 4, n. 2, p. 1401-1407, april 1989.
- [3] CHEN, M. S., DILLON, W.E. *Power System Modeling*. Proceedings of IEEE, v. 62, n. 7, p. 901-915, july 1974.
- [4] CHING, H. and JEAN-JUMEAU, R. *Optimal Network Reconfigurations in Distribution Systems: Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results*. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 5, n. 3, p. 1568-1574, july 1990.
- [5] GARCIA, A. V., ZAGO, M. G. Three-phase fast decoupled power flow for distribution networks. IEE Proc. – Gener. Transm. Distrib., vol. 143(2):188-192, março 1996.
- [6] GARCIA, P. A. N., PEREIRA, J. L. R., CARNEIRO JR, S., COSTA, V. M., MARTINS, N. *Fluxo de Potência para Sistemas de Distribuição Baseado em Injeções de Correntes*. Proceedings fo XII Brazilian Automatic Control Conference – XII CBA, vol. VI, pp. 1943-1948-Uberlândia, MG, Brazil, 14 – 18 september, 1998.
- [7] IEEE Distribution Planning Working Group Report, *Radial Distribuion Test Feeders*. IEEE Transactions on Power Systems, v. 6, n. 3, p. 975-985, august 1991.
- [8] LUO, G. X. and SEMLYEN, A. *Efficient Load Flow for Large Weakly Meshed Networks*. . IEEE Transactions on Power Systems, v. 5, n. 4, p. 1309-1316, november 1990.
- [9] MON, Y. H.; CLOI, B. K.; CHO, B. H.; KIM, S. H.; HA, B. N; LEE, J. H. *Fast and Reliable Distribution System Load Flow Algorithm Based on the Ybus Formulation* – Proceedings of IEEE PES Summer Meeting, pp. 238 – 242 Edmonton, Canada, 18 – 22 july 1999.



- [10] MONTICELLI, A. *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. São Paulo: Edgard Blucher, 1983. 164p.
- [11] MONTICELLI, A., GARCIA, A., SAAVEDRA, O. R. *Fast decoupled load flow: hypotesis, derivations and testing*. IEEE Trans. On Power Systems, vol. 5(4):1425-1431, novembro 1990.
- [12] SHIRMOHAMMADI, D. *A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks*. IEEE Transactions on Pwer Systems, vol. 3, N° 2, may 1988.
- [13] STEVENSON, Jr., W. D. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. São Paulo: McGraw-Hill, 347p, 1974.
- [14] STOTT, B., ALSAÇ, O. *Fast Decoupled Load Flow*. IEEE Transactions on Power Apparatus na Systems, v. 93, p. 859-869, may-june 1974.
- [15] VAN AMERONGEN, R. *A general purpose version of the fast decoupled load flow*, IEEE Trans. Power System, pp760-770, 1989.
- [16] ZAGO, M. G. *Fluxo de Carga Trifásico*, tese de mestrado, apresentada à Universidade Estadual de Campinas, 1992.



APÊNDICE A- Sistema 1

Sistema de sete barras e dois geradores, conforme a figura A.1, extraído de [1]. A barra número três é fictícia sendo introduzida neste ponto devido às mudanças construtivas nas linhas. A base p.u. adotada para este sistema é 33,3 MVA.

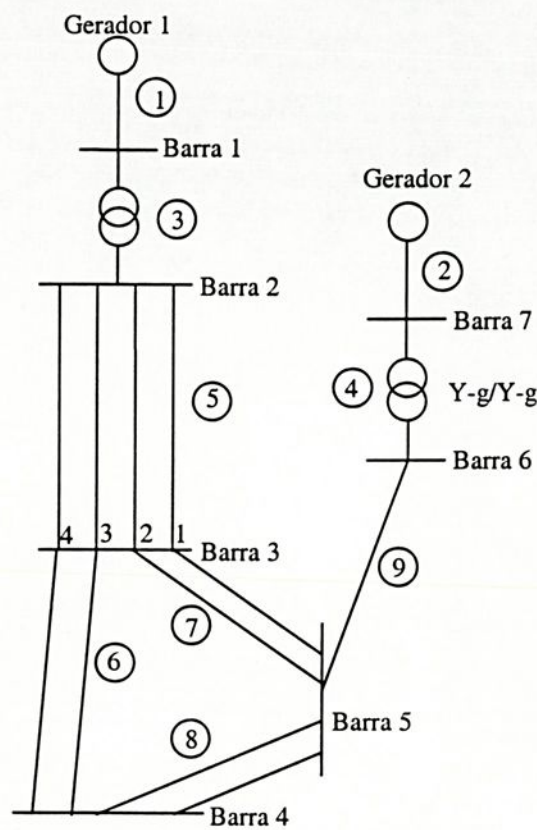


Figura A.1- Sistema de 7 barras, extraído de [1].

A.1- Dados das Barras

Os valores das cargas, potências ativas e reativas, estão na tabela A.1. Os dados referentes aos transformadores e geradores estão nas tabelas A.2 e A.3. Estes dados, que se encontram nas tabelas A.1 à A.3, foram adaptados por [16].

Tabela A.1 - Valores das Cargas, extraídos de [16]

Barras	Fase A		Fase B		Fase C	
	MW	MVAr	MW	MVAr	MW	MVAr
4	150,0	80,0	157,0	78,0	173,0	72,0
5	50,0	15,0	45,0	14,0	48,3	16,6
6	48,0	20,0	47,0	12,0	51,3	28,3



Tabela A.2 - Dados dos Transformadores, extraídos de [16]

Barras		Impedância (zt) em p.u.	Tipo de Conexão
Primário	Secundário		
2	1	0,0006 + j0,0164	Y - g / Y - g
6	7	0,0020 + 0,0380	Y - g / Y - g

Tabela A.3 - Dados do Gerador, extraídos de [16]

Número do Gerador	Impedâncias			P(total) MW	Tensão p.u.
	Z0	Z1	Z2		
1	j0,080	j0,010	j0,021	referência	1,0669
2	j0,150	j0,010	j0,091	281,27	1,0738

A.2- Dados das linhas

As matrizes $[Z]$ (impedâncias séries) e $[Ysh]$ (admitâncias totais em derivação) para as diversas linhas do sistema foram extraídas de [1], com algumas alterações.

Subsistema 9:

Este subsistema consiste de uma única linha equilibrada entre duas barras (5-6).

$$[Z_s] = \begin{bmatrix} 0.006 + j0.045 & 0.002 + j0.015 & 0.001 + j0.017 \\ 0.002 + j0.015 & 0.006 + j0.050 & 0.002 + j0.017 \\ 0.001 + j0.017 & 0.002 + j0.017 & 0.007 + j0.047 \end{bmatrix}$$

$$[Ysh] = \begin{bmatrix} 0.0 + j0.35 & 0.0 - j0.06 & 0.0 - j0.04 \\ 0.0 - j0.06 & 0.0 + j0.352 & 0.0 - 0.6 \\ 0.0 - 0.04 & 0.0 - 0.06 & 0.0 + 0.34 \end{bmatrix}$$

Subsistema 8:

Este subsistema consiste de duas linhas paralelas desequilibradas trifásicas, entre as barras 4-5, com mútuas entre estas linhas. A figura A.2 mostra a matriz $[Zs]$ deste subsistema e a figura A.3 a matriz $[Ysh]$.

linha 1			linha 2		
a	b	c	a	b	c
0,0023+j0,0147					
0,0012+j0,08	0,0021+j0,015				
0,0011+j0,007	0,001+j0,008	0,0024+j0,0148			
0,0009+j0,0062	0,0008+j0,0061	0,0008+0,0058	0,0023+j0,0147		
0,0008+j0,0061	0,0007+j0,0059	0,0007+j0,0056	0,0014+j0,009	0,0014+j0,009	
0,0008+j0,0058	0,0007+j0,0056	0,0006+j0,0054	0,012+j0,009	0,0012+j0,009	0,0021+j0,013

Figura A.2 - Matriz Impedância Série [Zs] do Subsistema 8.

linha 1			linha 2		
a	b	c	a	b	c
+j0,045					
-j0,008	-+j0,040				
-j0,009	-j0,011	+j0,035			
-j0,007	-j0,003	-j0,003	+j0,044		
-j0,003	-j0,005	-j0,002	-j0,01	+j0,040	
-j0,002	-j0,002	-j0,004	-j0,01	-j0,011	+j0,036

Figura A.3 - Matriz Capacitância Shunt [Ysh] do Subsistema 8.

Subsistema 5:

Este subsistema consiste de quatro linhas paralelas desequilibradas, trifásicas, entre as barras 2-3, e com mútuas entre estas linhas. A figura A.4 mostra os valores da matriz [Zs] deste subsistema e a figura A.5 os valores da matriz [Ysh]. Estas duas matrizes deverão ser multiplicadas por 0,75 unidades, devido a introdução da barra fictícia 3, em que esta secção passou a ser 75% do comprimento total.

linha 1			linha 2			linha 3			linha 4		
a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
0,0156+ j0,1088											
0,008+ 0,032	0,0150+ j0,1080										
0,007+ 0,022	0,008+ j0,032	0,0160+ j0,1095									
0,003+ j0,025	0,004+ j0,032	0,002+ j0,025	0,0156+ j0,1088								
0,0025 j0,022	0,0042+ j0,028	0,004+ j0,028	0,008+ j0,032	0,0150+ j0,1080							
0,002+ j0,025	0,004+ j0,028	0,0042+ j0,028	0,007+ j0,032	0,008+ j0,032	0,016+ j0,1095						
0,0015+ j0,012	0,0012+ j0,01	0,001+ j0,011	0,001+ j0,01	0,0008+ j0,007	0,0009+ j0,007	0,0133+ j0,0904					
0,0012+ j0,01	0,0015+ j0,012	0,0012+ j0,01	0,0008+ j0,007	0,001+ j0,01	0,0008+ j0,007	0,006+ j0,04	0,0140+ j0,08				
0,001+ j0,011	0,0012+ j0,015	0,0015+ j0,012	0,0009+ j0,07	0,0008+ j0,007	0,001+ j0,01	0,005+ j0,02	0,006+ j0,04	0,0130+ j0,085			
0,0009+ j0,009	0,0008+ j0,01	0,0008+ j0,009	0,0008+ j0,006	0,0006+ j0,004	0,0005+ j0,003	0,003+ j0,025	0,002+ j0,02	0,002+ j0,01	0,0133+ j0,0904		
0,0008+ j0,01	0,0006+ j0,008	0,0006+ j0,008	0,0006+ j0,04	0,0008+ j0,006	0,0006+ j0,004	0,002+ j0,02	0,003+ j0,025	0,002+ j0,02	0,006+ j0,04	0,0140+ j0,08	
0,0008 j0,009	0,0006+ j0,008	0,0006+ j0,008	0,0005+ j0,003	0,0006+ j0,004	0,0008+ j0,006	0,002+ j0,01	0,002+ j0,02	0,003+ j0,025	0,005+ j0,03	0,006+ j0,04	0,0130+ j0,085

Figura A.4 - Matriz Impedância Série [Zs] do subsistema 5.

linha 1			linha 2			linha 3			linha 4		
a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
+j0,2967											
-j0,06	+j0,299										
-j0,05	-j0,06	+j0,31									
-j0,04	-j0,03	-j0,035	+j0,2967								
-j0,045	-j0,035	-j0,032	-j0,06	+j0,299							
-j0,04	-j0,032	-j0,028	-j0,05	-j0,06	+j0,3						
-j0,02	-j0,022	-j0,018	-j0,018	-j0,012	-j0,009	+0,2569					
-j0,022	-j0,018	-j0,015	-j0,012	-j0,012	-j0,01	-j0,050	+j0,26				
-j0,018	-j0,015	-j0,018	-j0,009	-j0,01	-j0,014	-j0,045	-j0,042	+j0,251			
-j0,15	-j0,009	-j0,009	-j0,01	-j0,009	-j0,008	-j0,043	-j0,04	-j0,032	+j0,2569		
-j0,009	-j0,008	-j0,009	-j0,009	-j0,008	-j0,007	-j0,032	-j0,038	-j0,028	-j0,050	+j0,026	
-j0,009	-j0,008	-j0,008	-j0,008	-j0,007	-j0,006	-j0,028	-j0,032	-j0,025	-j0,045	-j0,041	+j0,251

Figura A.5 - Matriz Capacitância Shunt [Ysh] do subsistema 5.



Subsistema 6 e 7:

Este subsistema consiste em quatro linhas de transmissão, sendo que existe acoplamento mútuo entre as linhas 1-2 (ligação das barras 3-5), e entre as linhas 3-4 (ligação das barras 3-4). A figura A.6 mostra os valores da matriz $[Z_s]$ deste subsistema e a figura A.7 os valores da matriz $[Y_{sh}]$. Estas duas matrizes deverão ser multiplicadas por 0,25 unidades, devido a introdução da barra fictícia 3, em que esta secção passou a ser 25% do comprimento total.

linha 1			linha 2			linha 3			linha 4		
a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
0,0156+ j0,1088											
0,008+ 0,032	0,0150+ j0,1080										
0,007+ 0,022	0,008+ j0,032	0,0160+ j0,1095									
0,003+ j0,025	0,004+ j0,032	0,002+ j0,025	0,0156+ j0,1088								
0,0025 j0,022	0,0042+ j0,028	0,004+ j0,028	0,008+ j0,032	0,0150+ j0,1080							
0,002+ j0,025	0,004+ j0,028	0,0042+ j0,028	0,007+ j0,032	0,008+ j0,032	0,016+ j0,1095						
						0,0133+ j0,0904					
						0,006+ j0,04	0,0140+ j0,08				
						0,005+ j0,02	0,006+ j0,04	0,0130+ j0,085			
						0,003+ j0,025	0,002+ j0,02	0,002+ j0,01	0,0133+ j0,0904		
						0,002+ j0,02	0,003+ j0,025	0,002+ j0,02	0,006+ j0,04	0,0140+ j0,08	
						0,002+ j0,01	0,002+ j0,02	0,003+ j0,025	0,005+ j0,03	0,006+ j0,04	0,0130+ j0,085

Figura A.6 - Matriz Impedância Série $[Z_s]$ dos subsistemas 6 e 7.

linha 1			linha 2			linha 3			linha 4		
a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
+j0,2967											
-j0,06	+j0,299										
-j0,05	-j0,06	+j0,31									
-j0,04	-j0,03	-j0,035	+j0,2967								
-j0,045	-j0,035	-j0,032	-j0,06	+j0,299							
-j0,04	-j0,032	-j0,028	-j0,05	-j0,06	+j0,3						
						+0,2569					
						-j0,050	+j0,26				
						-j0,045	-j0,042	+j0,251			
						-j0,043	-j0,04	-j0,032	+j0,2569		
						-j0,032	-j0,038	-j0,028	-j0,050	+j0,026	
						-j0,028	-j0,032	-j0,025	-j0,045	-j,0.041	+j0,251

Figura A.7 - Matriz Capacitância Shunt [Ysh] dos Subsistemas 6 e 7



APÊNDICE B- Sistema 2

Sistema de distribuição baseado no sistema IEEE 34 barras proposto em [7], conforme a Figura B.1. Este sistema é composto por linhas de transmissão aéreas trifásicas (equilibradas e desequilibradas), cargas monofásicas e bancos de capacitores “shunt”. Os reguladores de tensão não foram considerados.

A barra de referência é a número 1, com tensão equilibrada igual a 1,03 p.u. A base p.u. adotada para este sistema é 1MVA (potência /fase) e 24,9kV (tensão fase-fase).

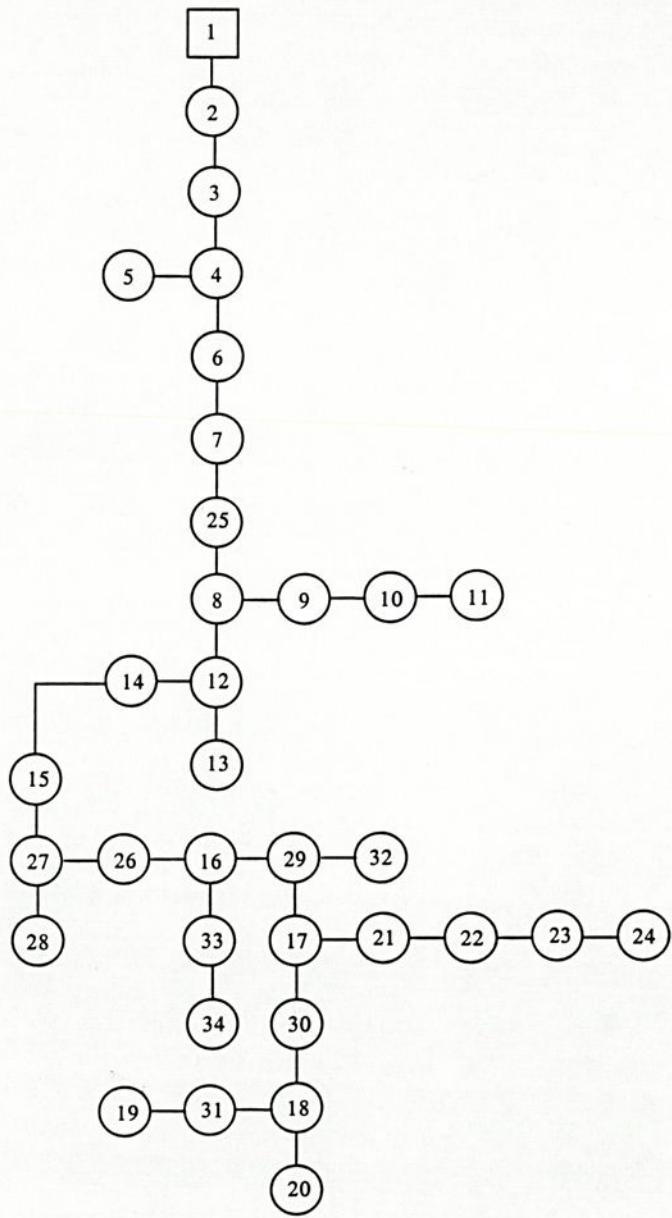


Figura B1 - Sistema de 34 Barras



B.1- Dados das Barras

As cargas, potências ativas e reativas do sistema, foram consideradas como concentradas nas respectivas barras, e conectadas em estrela para o caso de cargas trifásicas e entre linha e neutro para o caso de cargas monofásicas. Todas foram modeladas como valores constantes em KW e KVAr.

Os dados para as barras com cargas diferentes de zero estão na tabela B.1, os dados referentes ao banco de capacitores estão na tabela B.2. E os dados do transformador na tabela B.3.

Tabela B.1 - Dados das Barras

Barra Número	Cargas (Ativas e Reativas)					
	Fase A		Fase B		Fase C	
002	0,000	0,000	31,220	16,140	26,070	13,480
004	0,000	0,000	15,880	8,210	0,000	0,000
008	0,000	0,000	0,390	0,200	0,000	0,000
009	33,900	17,520	0,000	0,000	0,000	0,000
010	35,530	70,070	0,000	0,000	0,000	0,000
012	0,000	0,000	41,930	21,680	2,780	1,440
014	6,180	3,200	0,000	0,000	0,000	0,000
016	6,680	3,450	1,080	0,560	5,350	2,770
017	15,660	8,090	20,860	10,780	111,150	57,460
018	17,490	9,040	21,810	11,270	0,000	0,000
020	8,860	7,090	8,860	7,090	8,860	7,090
021	9,120	4,710	0,000	0,000	0,000	0,000
022	133,440	106,830	158,030	119,540	155,670	118,320
023	0,000	0,000	22,620	11,700	0,000	0,000
024	19,450	15,570	19,450	15,570	19,450	15,570
027	0,000	0,000	3,710	1,920	0,000	0,000
029	4,620	2,390	12,550	6,490	12,820	6,6300
030	47,280	30,090	30,460	21,390	61,960	37,680
031	27,610	14,270	0,000	0,000	0,000	0,000
034	27,000	21,620	27,000	21,620	27,000	21,620

Tabela B.2 - Dados dos Bancos de Capacitores

Barra Número	Capacitores		
	Fase A	Fase B	Fase C
	KVAr	KVAr	KVAr
022	100,00	100,00	100,00
024	150,00	150,00	150,00



Tabela B.3 - Dados do Transformador

Barras		Impedância (zt) em (Ω)	Tipo de Conexão
Primário	Secundário		
16	33	1,90 + 4,08	Y – g / Y – g

B.2- Dados das Linhas

Os dados das linhas para este sistema estão nas tabelas B.4, B.5 e B.6.

Tabela B.4 - Dados das linhas

Barra A	Barra B	Comprimento em pés	Código da Configuração
001	002	2580	301
002	003	1730	301
003	004	32230	301
004	005	5840	303
004	006	37500	301
006	007	29730	301
007	025	1000	301
008	009	1710	302
008	012	10210	301
009	010	48150	302
010	011	13740	302
012	013	3030	303
012	014	840	301
014	015	20440	301
015	027	520	301
016	029	4900	301
017	030	2020	301
017	021	280	301
018	020	860	301
018	031	280	301
021	022	1350	301
022	023	3640	301
023	024	530	301
025	008	310	301
026	016	1000	301
027	028	23330	303
027	026	36830	301
029	032	1620	302
029	017	5830	301
030	018	2680	301
031	019	4860	304
033	034	10560	300



Tabela B.5 - Descrição dos Códigos de Configuração

Código da Configuração	Seqüência de Fases	Condutor		Tipo de Estrutura
		Fases	Neutro	
300	B - A - C - N	1/0	1/0	500
301	B - A - C - N	2 (6/1)	2 (6/1)	500
302	A - N	4 (6/1)	4 (6/1)	510
303	B - N	4 (6/1)	4 (6/1)	510
304	A - N	2 (6/1)	2 (6/1)	510

Tabela B.6 - Características dos Condutores das Linhas Aéreas

Condutor	Tipo	Resistência (ohm/milha)	Diâmetro (polegadas)	GMR (pés)	Ampères
336.400	ACSR	0,306	0,721	0,02440	530
4/0	ACSR	0,592	0,563	0,00814	340
1/0	CU	0,607	0,368	0,01113	310
2	ACSR	1,690	0,316	0,00418	180
4	ACSR	2,550	0,257	0,00452	140

Tipos de Estrutura	Tipos de Linhas
500	linha trifásica (4 condutores)
505	linha bifásica (3 condutores)
510	linha monofásica (2 condutores)

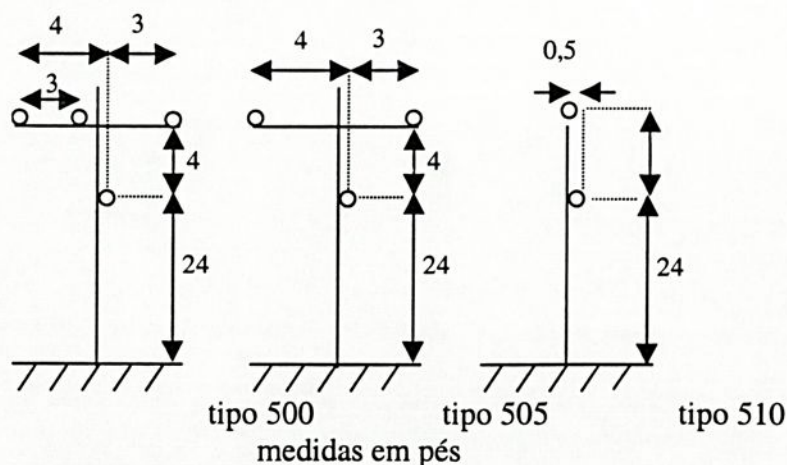


Figura B.2 - tipos de estruturas para linhas aéreas

APÊNDICE C- Sistema 3

Sistema de distribuição, baseado no sistema IEEE 123 barras proposto [7], com algumas modificações como mostra a figura C.1, passou a possuir 119 barras, como em [16]. É um sistema composto por linhas de transmissão aéreas trifásicas, bifásicas e monofásicas, cargas trifásicas (equilibradas e desequilibradas), cargas monofásicas, bancos de capacitores trifásicos e monofásicos e um motor de 150HP com fator de potência igual a 0,8 conectado à barra 119.

As linhas trifásicas subterrâneas do sistema original foram substituídas por linhas aéreas com configuração idêntica a das demais linhas trifásicas e os reguladores de tensão não foram considerados.

A barra de referência é a número 115, com tensão equilibrada igual a 0,98 pu. A base pu adotada para este sistema é 1,6667 MVA (potência/fase) e 4,16KV(tensão fase-fase).

C.1- Dados da Barras

As cargas, potências ativas e reativas do sistema, foram consideradas como concentradas nas respectivas barras, e conectadas em estrela para o caso de cargas trifásicas e entre linha e neutro para o caso de cargas monofásicas. Todas foram modeladas como valores constantes em KW e KVAr.

Os dados referentes ao banco de capacitores estão na tabela C.1, os dados do transformador na tabela C.2 e os dados para as barras com cargas diferentes de zero na tabela C.3.

Tabela C.1 - Dados do Bancos de capacitores

Barra Número	Capacitores		
	Fase 1	Fase 2	Fase 3
	KVAr	KVAr	KVAr
083	200,00	200,00	200,00
088	50,00		
090		50,00	
092			50,00



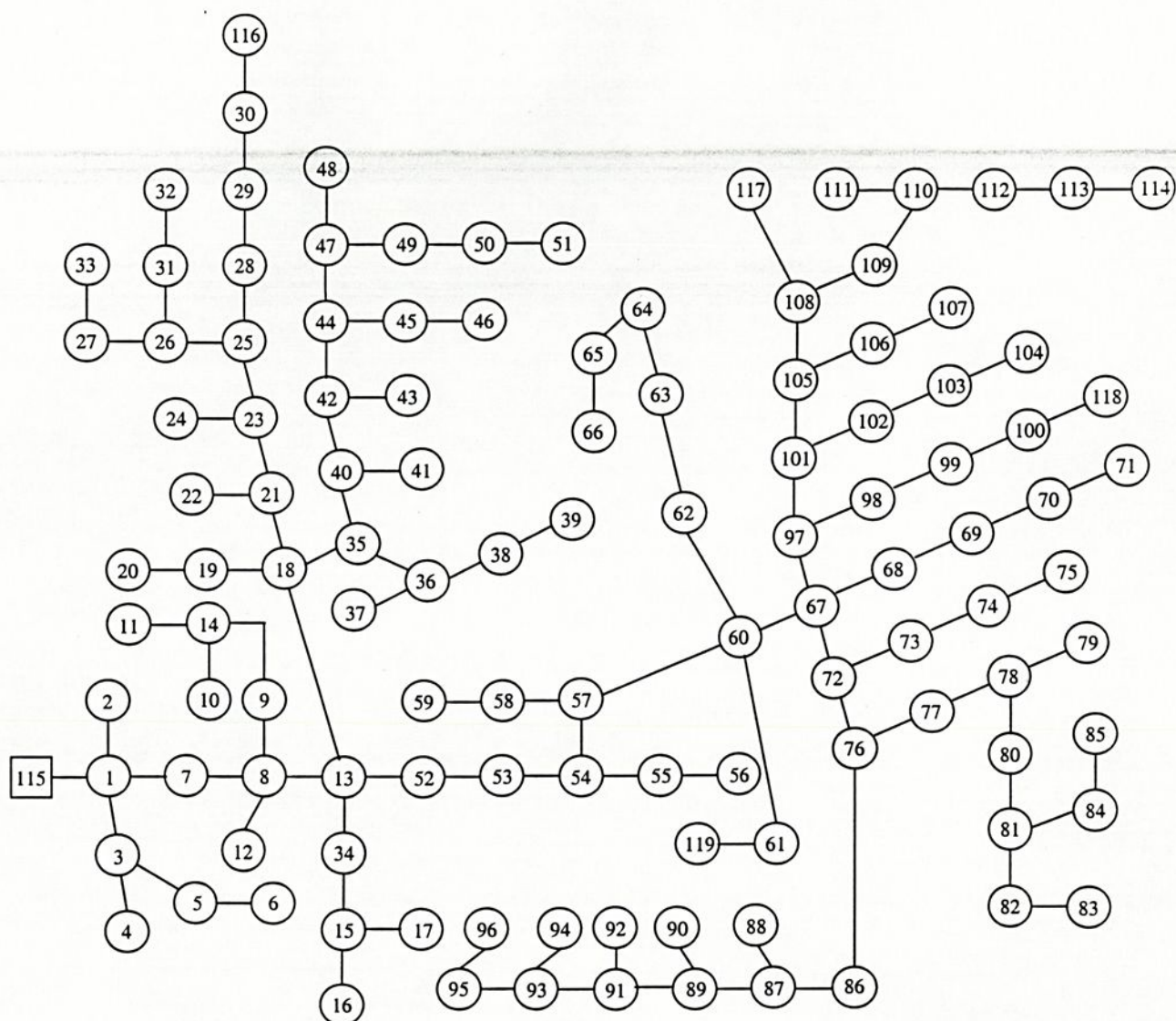


Figura C.1 - Sistema de 119 barras

Tabela C.2 - Dados do Transformador

Barras		Impedância (zt) em p.u.	Tipo de Conexão
Primário	Secundário		
61	119	0,0127+j0,0272	Y-g Y-g

Tabela C.3 - Dados das Barras

Barra Número	Cargas (Ativas e Reativas)					
	Fase 1		Fase 2		Fase 3	
	KW	KVAr	KW	KVAr	KW	KVAr
001	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
002	0,000	0,000	19,230	9,610	0,000	0,000
004	0,000	0,000	0,000	0,000	34,470	19,220
005	0,000	0,000	0,000	0,000	19,230	9,610
006	0,000	0,000	0,000	0,000	38,470	19,220
007	19,230	9,610	0,000	0,000	0,000	0,000
009	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
010	19,230	9,610	0,000	0,000	0,000	0,000
011	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
012	0,000	0,000	19,230	9,610	0,000	0,000
016	0,000	0,000	0,000	0,000	38,470	19,220
017	0,000	0,000	0,000	0,000	19,230	9,610
019	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
020	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
022	0,000	0,000	38,470	19,220	0,000	0,000
024	0,000	0,000	0,000	0,000	38,470	19,220
028	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
029	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
030	0,000	0,000	0,000	0,000	38,470	19,220
031	0,000	0,000	0,000	0,000	19,230	9,610
032	0,000	0,000	0,000	0,000	19,230	9,610
033	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
034	0,000	0,000	0,000	0,000	38,470	19,220
035	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
037	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
038	0,000	0,000	19,230	9,610	0,000	0,000
039	0,000	0,000	19,230	9,610	0,000	0,000
041	0,000	0,000	0,000	0,000	19,230	9,610
042	19,230	9,610	0,000	0,000	0,000	0,000
043	0,000	0,000	38,470	19,220	0,000	0,000
045	19,230	9,610	0,000	0,000	0,000	0,000
046	19,230	9,610	0,000	0,000	0,000	0,000
047	34,190	26,460	34,190	26,460	34,190	26,460
048	68,380	52,910	68,380	52,910	68,380	52,910
049	34,190	26,460	68,380	52,910	34,190	26,460
050	0,000	0,000	0,000	0,000	38,470	19,220
051	19,230	9,610	0,000	0,000	0,000	0,000
052	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
053	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
055	19,230	9,610	0,000	0,000	0,000	0,000
056	0,000	0,000	19,230	9,610	0,000	0,000
058	0,000	0,000	19,230	9,610	0,000	0,000
059	0,000	0,000	19,230	9,610	0,000	0,000
060	19,230	9,610	0,000	0,000	0,000	0,000



Tabela C.3 - Dados das Barras - continuação

Barra Número	Cargas (Ativas e Reativas)					
	Fase 1		Fase 2		Fase 3	
	KW	KVAr	KW	KVAr	KW	KVAr
062	0,000	0,000	0,000	0,000	38,470	19,220
063	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
064	0,000	0,000	76,930	38,440	0,000	0,000
065	34,190	26,460	34,190	26,460	68,380	52,910
066	0,000	0,000	0,000	0,000	76,930	38,440
068	19,230	9,610	0,000	0,000	0,000	0,000
069	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
070	19,230	9,610	0,000	0,000	0,000	0,000
071	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
073	0,000	0,000	0,000	0,000	38,470	19,220
074	0,000	0,000	0,000	0,000	38,470	19,220
075	0,000	0,000	0,000	0,000	38,470	19,220
076	102,570	79,370	68,380	52,910	68,380	52,910
077	0,000	0,000	38,470	19,220	0,000	0,000
079	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
080	0,000	0,000	38,470	19,220	0,000	0,000
082	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
083	0,000	0,000	0,000	0,000	19,230	9,610
084	0,000	0,000	0,000	0,000	19,230	9,610
085	0,000	0,000	0,000	0,000	38,470	19,220
086	0,000	0,000	19,230	9,610	0,000	0,000
087	0,000	0,000	38,470	19,220	0,000	0,000
088	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
090	0,000	0,000	38,470	19,220	0,000	0,000
092	0,000	0,000	0,000	0,000	38,470	19,220
094	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
095	0,000	0,000	19,230	9,610	0,000	0,000
096	0,000	0,000	19,230	9,610	0,000	0,000
098	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
099	0,000	0,000	38,470	19,220	0,000	0,000
100	0,000	0,000	0,000	0,000	38,470	19,220
102	0,000	0,000	0,000	0,000	19,230	9,610
103	0,000	0,000	0,000	0,000	38,470	19,220
104	0,000	0,000	0,000	0,000	38,470	19,220
106	0,000	0,000	38,470	19,220	0,000	0,000
107	0,000	0,000	38,470	19,220	0,000	0,000
109	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
111	19,230	9,610	0,000	0,000	0,000	0,000
112	19,230	9,610	0,000	0,000	0,000	0,000
113	38,470	19,220	0,000	0,000	0,000	0,000
114	19,230	9,610	0,000	0,000	0,000	0,000



C.2- Dados das Linhas

Os dados construtivos das linhas, assim como uma explanação a respeito das equações e considerações utilizadas no cálculo dos parâmetros das linhas e dos elementos das matrizes $[Z]$ e $[Y_{sh}]$ para as diversas linhas do sistema estão nas tabelas C.4 à C.6.

Tabela C.4 - Dados da Linhas – Sistema de 119 Barras

Barra A	Barra B	Comprimento em pés	Código da configuração
001	002	175	10
001	003	250	11
001	007	300	01
003	004	200	11
003	005	325	11
005	006	250	11
007	008	200	01
008	012	225	10
008	009	225	09
008	013	300	01
009	014	425	09
013	034	150	11
013	018	825	02
014	011	250	09
014	010	250	09
015	016	375	11
015	017	350	11
018	019	250	09
018	021	300	02
019	020	325	09
021	022	525	10
021	023	116	02
023	024	550	11
023	025	275	02
025	026	350	07
025	028	200	02
026	027	275	07
026	031	225	11
027	033	500	09
028	029	300	02
029	030	350	02
030	116	200	02
031	032	300	11
034	015	100	11
035	036	650	08
035	040	250	01
036	037	300	09
036	038	250	10
038	039	325	10
040	041	325	11
040	042	250	01
042	043	500	10



Tabela C.4 - Dados da Linhas – Sistema de 119 Barras - continuação

Barra A	Barra B	Comprimento em pés	Código da configuração
042	044	200	01
044	045	200	09
044	047	250	01
045	046	300	09
047	048	150	04
047	049	250	04
049	050	250	04
050	051	250	04
052	053	200	01
053	054	125	01
054	055	275	01
054	057	350	03
055	056	250	01
057	058	250	10
057	060	750	03
058	059	250	10
060	061	550	05
060	062	250	01
062	063	175	01
063	064	350	01
064	065	425	01
065	066	325	01
067	068	200	09
067	072	275	03
067	097	250	03
068	069	275	09
069	070	325	09
070	071	275	09
072	073	275	11
072	076	200	03
073	074	350	11
074	075	400	11
076	077	400	06
076	086	700	03
077	078	100	06
078	079	225	06
078	080	475	06
080	081	175	06
081	082	250	06
081	084	675	11
082	083	250	06
084	085	475	11
086	087	450	06
087	088	175	09
087	089	275	06
089	090	250	10
089	091	225	06
091	092	300	11
091	093	225	06
093	094	275	09



Tabela C.4 - Dados da Linhas – Sistema de 119 Barras - continuação

Barra A	Barra B	Comprimento em pés	Código da configuração
093	095	300	06
095	096	200	10
097	098	275	03
098	099	550	03
099	100	300	03
100	118	800	03
101	102	225	11
101	105	275	03
102	103	325	11
103	104	700	11
105	106	225	10
105	108	325	03
106	107	575	10
108	109	450	09
108	117	1000	03
109	110	300	09
110	111	575	09
110	112	125	09
112	113	525	09
113	114	325	09
018	035	375	04
115	001	400	01
013	052	400	01
060	067	350	06
097	101	250	03

Tabela C.5 - Descrição dos Códigos de Configuração

Código da Configuração	Seqüência de Fases	Condutor		Tipo de Estrutura
		Fases	Neutro	
01	A – B – C – N	336,400(26/7)	4/0(6/1)	500
02	C – A – B – N	336,400(26/7)	4/0(6/1)	500
03	B – C – A – N	336,400(26/7)	4/0(6/1)	500
04	C – B – A – N	336,400(26/7)	4/0(6/1)	500
05	B – A – C – N	336,400(26/7)	4/0(6/1)	500
06	A – C – B – N	336,400(26/7)	4/0(6/1)	500
07	A – C – N	336,400(26/7)	4/0(6/1)	505
08	A – B – N	336,400(26/7)	4/0(6/1)	505
09	A – N	1/0	1/0	510
10	B – N	1/0	1/0	510
11	C – N	1/0	1/0	510

Tabela C.6 - Características dos Condutores das Linhas Aéreas

Condutor	Tipo	Resistência (ohm/milha)	Diâmetro (polegadas)	GMR (pés)	Ampères
336.400	ACSR	0,306	0,721	0,02440	530
4/0	ACSR	0,592	0,563	0,00814	340
1/0	CU	0,607	0,368	0,01113	310
2	ACSR	1,690	0,316	0,00418	180
4	ACSR	2,550	0,257	0,00452	140



APÊNDICE D

Cálculo dos Parâmetros de Linhas de Transmissão

Impedância da linha de transmissão:

As impedâncias das linhas de transmissão são definidas como a soma complexa da resistência do condutor e de sua reatância indutiva na frequência do sistema:

$$Z_{pm} = R_{pm} + j\omega L_{pm},$$

sendo que, caso não seja consideradas as perdas pela terra, tem-se [13]:

R_{pp} é a resistência dos condutores de uma fase de um circuito em Ω/m ;

$$R_{pm} = 0.$$

$$L_{pp} = \frac{\mu\omega}{2\pi} \ln \frac{2h_p}{GMR} \text{ em H/m},$$

$$L_{pm} = \frac{\mu\omega}{2\pi} \ln \frac{D'_{pm}}{D_{pm}} \text{ em H/m},$$

sendo que:

$\mu\omega$ (permeabilidade do vácuo) = $4\pi \times 10^{-7}$ em H/m;

h_p é a distância do condutor da fase p ao solo;

D'_{pm} é a distância entre o condutor da fase p e a imagem do condutor da fase m ;

D_{pm} é a distância entre os condutores das fases p e m .

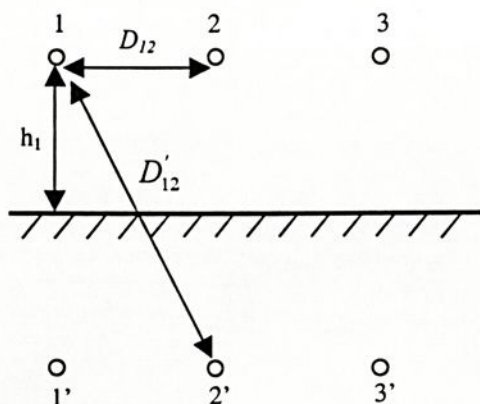


Figura D.1 - Distância entre condutores das linhas aéreas

Para estruturas de linhas aéreas em que são considerados os neutros, como mostra a figura B.2 no apêndice B, o cálculo da impedância do neutro é igual à dos condutores das

fases. Sendo assim, em linhas trifásicas com quatro condutores, a matriz impedância terá dimensão 4x4, havendo a necessidade de aplicar a redução de Crown, para a dimensão passar a ser 3x3, ou seja:

Linha trifásica:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{n2} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix},$$

em que:

a, b e c indicam as fases e n indica o neutro.

Redução de Crown:

$$Z'_{pp} = Z_{pp} - \frac{Z_{pn} \times Z_{np}}{Z_{nn}},$$

$$Z'_{pm} = Z_{pm} - \frac{Z_{pn} \times Z_{nm}}{Z_{nn}}.$$

Obs: para linhas bifásicas com três condutores a matriz impedância terá dimensão 3x3 e após a redução de Crown passará a ter dimensão 2x2; e para linhas monofásicas com dois condutores, esta matriz terá inicialmente dimensão 2x2 passando a ter dimensão 1x1 após a redução.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
AV. BRASIL, 56 - CAIXA POSTAL 31
15385-000 - ILHA SOLTEIRA - SP**

