

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO

**UMA IMPLEMENTAÇÃO VETORIAL DO MÉTODO DA SOMA
DE POTÊNCIA PARA APLICAÇÃO A REDES DE
DISTRIBUIÇÃO**

Mary Karlla Araújo Guimarães.

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Maior de 2000

UMA IMPLEMENTAÇÃO VETORIAL DO MÉTODO DA SOMA DE POTÊNCIA PARA APLICAÇÃO A REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Dissertação apresentada à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, Dr., UFPB
Orientador

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Mai de 2000



G963i Guimaraes, Mary Karlla Araujo
 Uma implementacao vetorial do metodo da soma de potencia
 para aplicacao a redes de distribuicao / Mary Karlla Araujo
 Guimaraes. - Campina Grande, 2000.
 90 f.

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

 1. Potencia Eletrica 2. Redes de Distribuicao 3. Soma de
 Potencia 4. Programacao Vetorial 5. Dissertacao I. Souza,
 Benemar Alencar de II. Universidade Federal da Paraiba -
 Campina Grande (PB)

CDU 621.3.026(043)

UMA IMPLEMENTAÇÃO VETORIAL DO MÉTODO DA SOMA DE POTÊNCIA
PARA APLICAÇÃO À REDES DE DISTRIBUIÇÃO

MARY KARLLA ARAÚJO GUIMARÃES

Dissertação Aprovada em 19.05.2000


PROF. BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFPB
Orientador


PROF. WASHINGTON LUIZ ARAUJO NEVES, Ph.D., UFPB
Componente da Banca


PROF. DAGOBERTO LOURENÇO RIBEIRO, D.Sc., UFPB
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
Maio - 2000

*A meus pais, que tanto me incentivam,
ao meu esposo e a minha filha pela compreensão ,*

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por todas as oportunidades que me foram dadas.

Agradeço ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPQ) o apoio financeiro dado para este projeto de pesquisa.

À Coordenação de Pós-graduação de Engenharia Elétrica (COPELE) pela oportunidade na realização do trabalho.

Aos meus grandes amigos que por uma ironia do destino são também meus pais, Edésio e Dasdôres, ao meu esposo Israel e a minha filha Glendha, pelo apoio, dedicação e incentivo.

Meus sinceros agradecimentos ao prof. Benemar (LSP-UEPB) por suas sugestões, discussões e por sua orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas Alexandre, James, Núbia e Diana nos quais sempre encontrei incentivo.

SUMÁRIO

| | |
|---|-------------|
| AGRADECIMENTOS | Vii |
| LISTA DE FIGURAS | Xi |
| LISTA DE TABELAS | Xiv |
| RESUMO | Xvi |
| ABSTRACT | Xvii |
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Revisão Bibliográfica | 2 |
| 1.2 Motivação | 5 |
| 1.3 Objetivo | 5 |
| 1.4 Organização do trabalho | 6 |
| CAPÍTULO 2 – A PROGRAMAÇÃO VETORIAL E A LINGUAGEM FORTRAN 90 | 7 |
| 2.1 Uma breve revisão histórica | 7 |
| 2.2 O paradigma da programação vetorial | 8 |
| 2.3 Fortran 90 | 11 |

**CAPÍTULO 3 – VERSÃO MONOFÁSICA DO MÉTODO DA
SOMA DE POTÊNCIAS** 12

| | |
|---|----|
| 3.1 Formulação Matemática do Método | 13 |
| 3.2 Algoritmo básico | 15 |
| 3.3 Implementação da versão monofásica para sistemas radiais com identificação e classificação automática de barras | 16 |
| 3.4 A reordenação de barras | 17 |
| 3.5 A extensão do método soma de potências a alimentadores não-radiais | 21 |
| 3.6 Reconhecimento e abertura de anéis: Aplicações | 22 |

**CAPÍTULO 4 – VERSÃO TRIFÁSICA DO MÉTODO DA
SOMA DE POTÊNCIA UMA
IMPLEMENTAÇÃO VETORIAL** 27

| | |
|---|----|
| 4.1 Introdução | 27 |
| 4.2 Notação | 28 |
| 4.3 Fundamentos | 28 |
| 4.4 Alimentador trifásico a quatro fios | 32 |
| 4.5 Eficiência computacional da implementação | 33 |
| 4.6 Algoritmo básico | 34 |
| 4.7 Programação orientada à objeto | 35 |
| 4.8 Numeração das barras | 42 |
| 4.9 Normalização da numeração de barra | 43 |

**CAPÍTULO 5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS
RESULTADOS** 45

| | |
|----------------------|----|
| 5.1 Introdução | 45 |
| 5.2 Fluxo monofásico | 46 |
| 5.3 Fluxo trifásico | 54 |

| | |
|--|-----------|
| | x |
| ❖ Sistema equilibrado | 60 |
| ❖ Sistema desequilibrado considerando os acoplamentos | 62 |
| ❖ Sistema desequilibrado desconsiderar os acoplamentos | 64 |
| ❖ Desempenho computacional | 66 |
| | |
| CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES | 68 |
| | |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 71 |
| | |
| ANEXOS | 74 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 3.1 Alimentador radial. | 13 |
| Figura 3.2 Um trecho do alimentador da figura 3.1. | 13 |
| Figura 3.3. Fluxograma para reordenação de barras utilizando a programação vetorial. | 19 |
| Figura 3.4 fluxograma proposto por (Das <i>et al.</i> , 1995). | 20 |
| Figura 3.5 Alimentador em anel. | 21 |
| Figura 3.6 Alimentador em anel derivado do alimentador da figura 3.1 fazendo-se as interligações 5-15 e 13-15. | 22 |
| Figura 3.7 Alimentador em anel derivado do alimentador da figura 3.1 fazendo-se as interligações 8-15 e 8-13. | 24 |
| Figura 4.1 Trecho de alimentador trifásico. | 29 |
| Figura 4.2 Trecho de um alimentador trifásico com neutro aterrado por impedância. | 32 |
| Figura 4.3 Estrutura de dados. | 36 |
| Figura 4.4 Alimentador trifásico do exemplo 1. | 37 |
| Figura 4.5 Estrutura de dados correspondente ao alimentador do exemplo 1. Detalhe dados gerais do alimentador. | 38 |
| Figura 4.6 Estrutura de dados correspondentes ao alimentador do exemplo 1. Detalhe dos dados de entrada do trecho 2. | 39 |
| Figura 4.7 Estrutura de dados correspondentes ao alimentador do exemplo 1. Detalhe dos dados de saída do trecho 2. | 40 |
| Figura 4.8 Alimentador radial com os níveis das barras indicados. | 42 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 5.16 Tensão de barra no alimentador da figura 5.8 no subcaminho de (40-420).. | 64 |
| Figura 5.17 Tensão de barra no alimentador da figura 5.8 no subcaminho de (80-360). | 64 |
| Figura 5.18 Comparação entre as potências ativas para o casos com e sem mútua. | 65 |
| Figura 5.19 Comparação entre as potências reativas para o casos com e sem mútua. | 65 |
| Figura 5.20 Número de iterações realizadas pelo programa. | 66 |
| Figura 5.21 Tempo de processamento. | 67 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.9 Numerações padronizadas do alimentador da figura 4.7. | 43 |
| Figura 4.10 Numerações do alimentador da figura 4.7.(a) original e (b) normalizada. | 44 |
| Figura 5.1 Tensão de barra no alimentador direto. | 48 |
| Figura 5.2 Perdas ativas no alimentador direto. | 48 |
| Figura 5.3 Perdas reativas no alimentador direto. | 49 |
| Figura 5.4 Alimentador radial. | 50 |
| Figura 5.5 Perfil de tensão no alimentador da figura 5.4. | 52 |
| Figura 5.6 Perdas ativas no alimentador da figura 5.4. | 53 |
| Figura 5.7 Perdas reativas no alimentador da figura 5.4. | 53 |
| Figura 5.8 Alimentador PJA - 04 da subestação de Pajuçara . | 56 |
| Figura 5.9 Perfil de tensão completo do alimentador PJA-04. | 57 |
| Figura 5.10 Tensão de barra do alimentador da figura 5.8 no subcaminho de (40-420). | 60 |
| Figura 5.11 Tensão de barra do alimentador da figura 5.8 no subcaminho de (80-360). | 60 |
| Figura 5.12 Perdas ativas no alimentador 5.8 no subcaminho de (40-420). | 61 |
| Figura 5.13 Perdas reativas no alimentador 5.8 no subcaminho de (40-420). | 61 |
| Figura 5.14 Tensão de barra no alimentador da figura 5.8 no subcaminho de (40-420). | 62 |
| Figura 5.15 Tensão de barra no alimentador da figura 5.8 no subcaminho de (80-360). | 62 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 Dados de entrada para o alimentador da figura 3.6. | 23 |
| Tabela 3.2 Resultado das simulações para o alimentador da figura 3.6. | 23 |
| Tabela 3.3 Tensão em todas as barras do alimentador da figura 3.6. | 24 |
| Tabela 3.4 Dados de entrada para o alimentador da figura 3.7. | 25 |
| Tabela 3.5 Resultado das simulações para o alimentador da figura 3.7. | 25 |
| Tabela 3.6 Tensão em todas as barras do alimentador da figura 3.7.. | 26 |
| Tabela 5.1 Dados de entrada do alimentador direto. | 46 |
| Tabela 5.2 Resultado das simulações para o alimentador direto. | 47 |
| Tabela 5.3 Tensão em todas as barras do alimentador direto. | 47 |
| Tabela 5.4 Dados de entrada do alimentador da figura 5.1. | 50 |
| Tabela 5.5 Resultado das simulações para o alimentador da figura 5.1. | 51 |
| Tabela 5.6 Tensão em todas as barras para o alimentador da figura 5.1. | 48 |
| Tabela 5.7 Dados do alimentador PJA – 04. | 55 |

| | |
|---|-----------|
| | xv |
| Tabela A1 Dados de entrada do alimentador PJA -04. | 75 |
| Tabela A2 Dados de saída do alimentador PJA -04 para o caso equilibrado. | 79 |
| Tabela A3 Dados de saída do alimentador PJA -04 para o caso desequilibrado considerando as mútuas. | 83 |
| Tabela A4 Dados de saída do alimentador PJA -04 para o caso desequilibrado desconsiderando as mútuas. | 87 |

RESUMO

Para redes de transmissão e subtransmissão de energia, os desequilíbrios de fase, em geral, são pequenos e raros. Por isso, via de regra, não são considerados e a análise monofásica de fluxo de potência é suficiente para obtenção das informações desejadas. Entretanto, sistemas de distribuição são inerentemente desbalanceados devido a linhas sem transposição, diferentes números de fases por circuitos e cargas desbalanceadas. Sendo assim, uma avaliação mais realista das condições de operação de um sistema de distribuição exige o uso de um algoritmo de fluxo de potência que considere todas as fases da rede. Nesta dissertação é desenvolvida uma versão trifásica do método da soma de potência para implementação vetorial. São levados em conta a assimetria das cargas, o acoplamento de fase e a possibilidade da rede não ser completamente trifásica, mas ter trechos monofásicos e bifásicos também. O método da soma de potência é um método simples, mas de eficiência computacional muito elevada na análise de fluxo de carga em alimentadores radiais. Com facilidade o método pode ser estendido a alimentadores pouco malhados, conforme é discutido. A implementação computacional é feita em Fortran 90, explorando alguns dos recursos mais avançados dessa linguagem, tais como o de programação vetorial e estruturas de dados complexas. A rotina foi aplicada a alimentadores do sistema de distribuição de Maceió.

ABSTRACT

For transmission nets of energy, the phase unbalances, in general, are small and rare. However, distribution systems are inherently unbalanced due to lines without conversion, different numbers of phases for circuits and unbalanced loads. Being like this, an evaluation more realistic of the conditions of operation of a distribution system demands the use of an algorithm of power flow that considers all the phases of the net. In this dissertation a version three-phase of the method of the power sum is developed for vectorial implementation. They are taken into account the asymmetry of the loads, the phase joining and the possibility of the net not to be completely three-phase, but to have spaces single-phase and two-phase also. The method of the power sum is a simple method, but efficiency computational very elevated in the analysis of load flow in radial feeders. With easiness the method can be extended to not very mailed feeders, as it is discussed. The implementation computational is made in Fortran 90, exploring some of the advanced resources of that language, such as the one of vectorial programming and you structure of complex data. The routine was applied the feeders of the system of distribution of Maceió.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Eletricidade é a forma de energia mais útil e conveniente para o homem moderno. Sem ela não seria possível a infra-estrutura social de hoje. O aumento do consumo per capita de energia elétrica reflete a melhoria do padrão de vida de um povo (Souza, 1997).

As atividades de produção, transmissão e distribuição da energia elétrica, inerentes ao sistema elétrico de potência, tornaram-se estratégicas para todos os países que almejaram aumentar o seu ritmo de desenvolvimento.

Apesar dessas três etapas pelas quais a energia elétrica passa, até chegar ao seu ponto de consumo, terem o mesmo nível de importância para sua boa utilização, as duas primeiras (produção e transmissão) foram prioridade nos investimentos. Elas também tiveram preferência em estudos acadêmicos até o passado recente.

Devido à preocupação atual e crescente das concessionárias com a qualidade da energia, e em virtude do grande interesse pela conservação da energia elétrica,

aumentou a motivação para realização de estudos dos sistemas de distribuição de energia elétrica. As perdas na distribuição são muito maiores que na geração e na transmissão e só se comparam ao desperdício que ocorre na utilização. Portanto, na reengenharia da distribuição está um grande potencial de conservação da energia.

Nos últimos anos a preocupação com o desenvolvimento de novas ferramentas para análise de sistemas de distribuição vem crescendo. Novas tecnologias vem sendo utilizadas no processo de automação da distribuição iniciado na década de oitenta (Chen,1982), (Electrical Systems Division, 1983) e (Redmon & Gentz, 1981) e intensificado na década de noventa (Kato *et al*, 1991), (Schaffner,1994). Dessa forma, tem se tornado cada vez mais necessário conhecer com precisão o estado e as condições operativas do sistema de distribuição e dos dispositivos de controle que o integram.

Redes neurais, sistemas especialistas, lógica fuzzy e algoritmos genéticos são tecnologias que estão efetivamente dando sustentação à automação dos sistemas de distribuição. Vários trabalhos reportando o emprego dessas tecnologias na engenharia de distribuição são encontrados na literatura. Destacam-se Arranjo *et al*, (1996), que faz previsão de carga espacial e Ribeiro *et al*, (1997), previsão de carga horária. Minakawa *et al*, (1995) desenvolveu e implementou um sistema especialista para diagnóstico de faltas em sistemas de potência.

1.1 Revisão Bibliográfica

Fluxo de carga é uma ferramenta fundamental na análise de qualquer sistema de potência tanto na fase operacional quanto na fase de planejamento. Certas aplicações, particularmente em automatização de sistemas de distribuição e otimização de sistema de potência, requerem soluções de fluxo de carga repetidas. Nessas aplicações é muito

importante resolver o problema de fluxo de carga de modo preciso e sobretudo seguro (baixo risco de não convergência).

O estudo mais freqüente em um sistema elétrico quer seja este de transmissão ou de distribuição, tem por meta a determinação por antecipação das condições adequadas de operação em regime permanente. Para isto, se tem desenvolvido algoritmos eficientes de fluxo de potência, baseados nos métodos de Gauss-Seidel, Newton-Raphson completo e versões desacopladas. Mas, esses algoritmos foram originalmente desenvolvidos pensando exclusivamente em sistemas de transmissão. Por essa razão sua aplicação à redes de distribuição não dá bons resultados e muitas vezes só se obtém convergência com dificuldade. As redes de distribuição apresentam características muito particulares que as diferenciam das de transmissão. Entre as características da rede de distribuição se destacam configurações radiais ou pouco malhadas, diferentes tipos de circuitos (trifásicos, monofásicos e bifásicos), cargas de natureza discreta e em número extremamente elevado, linhas com resistência comparáveis com a reatância e linhas sem transposição.

O método *desacoplado rápido* é um dos métodos mais populares aplicado na simulação de fluxo de potência. Ele fornece bons resultados para sistemas com baixa relação R/X, mas tem dificuldade de convergência quando a relação R/X é alta (Wu,1977). Por outro lado as técnicas da matriz impedância de barra (Gauss-Seidel direto) se mostram mais rápidas, porém com um excessivo uso de memória.

Modificações na versão original do método Desacoplado Rápido para evitar as dificuldades de convergência foram propostas por Rajicic *et al* (1988).

Shirmohammadi *et al* (1988) propõe um método para solução de sistemas radiais e pouco malhados. Neste método o sistema é primeiramente convertido em uma rede estritamente radial, sendo em seguida aplicado um procedimento que consiste na

aplicação direta das leis de Kirchoff em dois passos. No primeiro passo calculam-se as correntes nos ramos e no segundo as tensões nodais. Um dos problemas desta metodologia é a impossibilidade de se considerar a rede de subtransmissão juntamente com a distribuição, dada a limitação dos sistemas serem pouco malhados. Já Luo & Semlyen (1990) apresenta um método semelhante ao anterior, mas que durante o primeiro passo o cálculo da corrente nos ramos é substituído pelo cálculo dos fluxos de potência. Extensões dos métodos acima citados, em que são consideradas análises multifásicas, cargas desequilibradas e análise em tempo real foram apresentadas por Chen *et al* (1991) e Cheng e Shirmohammadi (1995).

Um algoritmo desacoplado explorando a estrutura radial dos sistemas de distribuição é apresentada por Zimmerman & Chiang (1995), no qual um esquema de ordenação dos alimentadores laterais é aplicado, diminuindo o número de equações do fluxo de potência, em comparação com a formulação convencional.

Renato(1990) propôs um método para solução de fluxo de carga em redes de distribuição radial. O ângulo de fase da tensão é eliminado das equações e a solução é obtida trabalhando apenas com a amplitude da tensão de barra. Goswami & Basu (1991) propõe a solução pelo método direto para sistemas radiais e pouco malhados. Entretanto, a maior limitação desses métodos é que o número de sub-ramais não pode ser muito grande.

Jasmon & Lee (1991) apresenta um novo método para obtenção da solução do fluxo de carga em redes de distribuição radial. Eles o derivaram das equações fundamentais para a solução do problema de fluxo de carga em redes de distribuição e utilizaram um modelo equivalente para o alimentador.

Diante da necessidade de métodos de solução de fluxo de potência que aliem uma alta velocidade e confiabilidade, surgiram os métodos que levam em conta as

características específicas dos sistemas de distribuição, portanto, apresentam um bom desempenho quando aplicados em simulações desses sistemas.

Surgiram então, o método da Escada (*Ladder*) (Kersting *et al*, 1976), o método de *soma de correntes* (Shirmohammadi *et al*, 1987) e o *método da soma de potência* (Brodwater *et al*, 1988).

Em Das *et al* (1995) o objetivo principal dos autores é desenvolver uma técnica de fluxo de carga mais nova para redes de distribuição radiais. O método proposto envolve só a avaliação de uma expressão algébrica simples da amplitude da tensão e nenhuma condição trigonométrica é usada, como no caso do fluxo de carga padrão. O trabalho apresenta comparações com outros métodos para o cálculo de fluxo de carga.

1.2 Motivação

A programação orientada a objeto vem sendo aplicada em diversas áreas, principalmente, na engenharia de software, mas na área de sistemas de potência em particular, as aplicações ainda são muito reduzidas. Então, aproveitando um problema clássico de sistemas de potência que é o fluxo de carga em redes de distribuição, decidiu-se pela aplicação da programação orientada a objeto, na implementação de um algoritmo que resolvesse esse problema.

1.3 Objetivos

O objetivo geral é aproveitar os recursos avançados do Fortran 90 no desenvolvimento de uma rotina de fluxo de carga em redes de distribuição.

Os objetivos principais são:

- ❖ Fazer a implementação vetorial do método da soma de potência original.
- ❖ Estender o método para redes não radiais.

- ❖ Estruturar o programa desenvolvido de modo que possa funcionar como assistente na gerência do equilíbrio de fase.
- ❖ Generalizar as equações fundamentais do método da soma de potência para aplicação à alimentadores trifásicos com acoplamentos de fase.

1.4 Organização do Trabalho

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, contando com este de introdução.

No capítulo 2 são apresentadas o conceito de programação vetorial e a linguagem Fortran 90. É feita também uma breve revisão histórica, comentando o surgimento dos novos paradigmas de programação.

No capítulo 3 é apresentado o método da *soma de potência* na versão original para sistemas monofásicos. Se trata também da extensão desse método a alimentadores não-radiais.

No capítulo 4 é apresentada a versão trifásica do método da Soma de Potência.

No capítulo 5 é feita a apresentação e análise dos resultados das simulações dos fluxos de potência monofásicos e trifásicos. As simulações de fluxo monofásico foram realizadas usando os mesmos alimentadores empregados por Das *et al* (1995) e Jasmon *et al* (1991). Já na simulação do fluxo de potência trifásico foi utilizado o alimentador PJA-04 da subestação de Pajuçara pertencente ao sistema de distribuição da Companhia Energética de Alagoas – CEAL.

O último capítulo apresenta as conclusões e faz sugestões para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

A PROGRAMAÇÃO VETORIAL E A LINGUAGEM

FORTRAN 90

2.1 Uma breve revisão histórica

Os problemas maiores das rotinas em linguagem de programação estruturada convencional, como FORTRAN, são pelo menos dois. Primeiro, os programas são de arquitetura fechada, o que implica em dificuldades de modificação e expansão. Praticamente é impossível se alterar um programa sem que sejam acarretados erros, os quais, na maioria das vezes, não estão confinados nas imediações de onde a modificação ocorreu.

O segundo problema é que os programas necessitam de um número muito grande de linhas de código para satisfazer aos requisitos de manipulação dos dados em baixo nível. Em consequência, os método e modelo matemáticos adotados para a solução do problema, mesmo que relativamente simples, quando codificados tornam-se longos, dispersos e pouco compreensivos.

Ambas as características da programação convencional destacadas acima contrariam o modo natural do trabalho humano. Ninguém por mais competente que seja, consegue sempre e da primeira vez, realizar um trabalho impecável, que dispense mais tarde, correções, extensões e melhorias.

A modulação nas linguagens convencionais são fortemente restritas por duas razões: (a) a estrutura de dados limitada e rígida e (b) a interface dos módulos é implícita.

Geralmente, o que estão disponíveis com facilidade são tipos de dados predefinidos: inteiro, real, lógico, complexo e alfanumérico. O FORTRAN 77 incorporou recursos (STRUCTURE, RECORD, MAP e UNION) que permitem a definição de tipos de dados diferentes daqueles predefinidos. Com isso tornou-se possível criar estruturas de dados mais elaboradas e adequadas a muitas aplicações, sobretudo àquelas mais sofisticadas (MICROSOFT, 1989).

Embora o FORTRAN 77 permita ao programador criar suas próprias estruturas de dados, não oferece facilidade alguma para manipulá-las, porque se mantiveram rígidas as interfaces e os operadores. Só aos dados de tipo predefinidos se aplicam diretamente os operadores aritméticos (soma, subtração, multiplicação, divisão e potenciação). Essa mesma limitação acontece na entrada e saída de dados e com as funções intrínsecas.

A modulação de programas em FORTRAN é suportada por dois tipos de subprogramas: funções e subrotinas. O fluxo de dados definidos pelo usuário entre módulos só é possível através das estruturas especiais (UNION ou MAP).

2.2 O paradigma da programação vetorial

A maior parte dos engenheiros e pesquisadores de sistemas de potência ainda está acostumada com apenas um paradigma, o da programação por procedimento. Mas a partir da década passada, surgiram vários outros. Dentre os novos, destacam-se os seguintes paradigmas de programação: orientada para objetos, baseada em regras, baseada em lógica,

paralela, visual, baseada em restrição, baseada em fluxo de dados, baseada em redes neurais, baseada em ensaio.

A programação por procedimento não ficou indiferente às grandes mudanças que ocorreram em sua volta. Pelo contrário, atualizou-se em vários aspectos. A incorporação do paradigma da programação vetorial foi sem dúvida a inovação mais notável (Granelli *et al*, 1993; Huang & Lu, 1995). Segundo esse conceito, a programação é voltada para uma estrutura de dados elementar mais complexa que um simples escalar: o vetor. Em termos de arquitetura de computador, matrizes são vetores. Isto é, internamente as matrizes são armazenadas e manipuladas como vetores (listas encadeadas). Desse modo, na programação vetorial, vetores e matrizes são os elementos de dados. Não há uma estrutura mais simples. Nessa ótica, um escalar é visto como um vetor de comprimento um.

O paradigma¹ da programação vetorial foi implementado pioneiramente com o MATLAB[®] (Math Works, 1997). De fato, o MATLAB[®] foi um dos embriões da programação vetorial. (Souza, 1981) sentiu muito cedo as inconveniências da programação convencional para lidar com problemas típicos de sistemas de potência.

Apesar dos grandes obstáculos impostos pelo FORTRAN 77, conseguiu um código muito mais seguro, flexível e sobretudo, inteligível. Efetivamente, a programação vetorial se estabeleceu a partir de meados da década de 80, quando surgiram trabalhos desenvolvidos com auxílio de computadores de alto desempenho baseados em processadores especiais, que foram denominados de estações de trabalho ou computadores de vetor.

¹ Um paradigma de programação é um modelo básico para se explicar o modo como os programas são escritos. (TELLO, 1992).

O FORTRAN², desde sua concepção, é uma linguagem orientada para problemas numéricos científicos. Para esse tipo de tarefa não teve similar. Enquanto o cálculo numérico foi o problema central manteve a supremacia quase absoluta nas áreas da tecnologia e das ciências exatas. O aparecimento de compiladores rápidos e muito robustos, tornou prático o ensino da programação FORTRAN e da computação em si para grande número de estudantes.

Nos anos mais recentes, com o advento das interfaces gráficas avançadas, os cálculos em si, passaram para um plano secundário, em termos de requisitos computacionais. O FORTRAN passou a ter concorrentes fortes. De um lado, as linguagens de alto nível como Pascal e MATLAB[®]. Do outro o C, uma linguagem de nível médio, portanto muito mais poderosa, mas também menos fácil de ser aprendida e utilizada.

A sobrevivência do FORTRAN chegou a ser ameaçada. Durante a década de oitenta, os fabricantes incorporaram a seus compiladores FORTRAN uma infinidade de rotinas desenvolvidas em C para complementar o FORTRAN padrão, procurando a todo custo satisfazer as novas exigências de seus usuários. Eram rotinas as mais diversas: primitivas de gráfico, de acesso às funções de hardware, de processamento de baixo nível, tais como gerenciamento de memória e manipulação de bit.

Uma versão nova do FORTRAN padrão saiu em agosto de 1991, com o nome de FORTRAN 90. É uma concepção absolutamente nova. De fato, surgiu uma nova linguagem, muito mais poderosa. O FORTRAN 90 está para o FORTRAN 77 assim como o C++ está para o C. De fato, os compiladores FORTRAN 90 foram desenvolvidos em C++ (como os próprios compiladores C++).

² O FORTRAN (do inglês "FORmula TRANslation system), anunciada em 1954, foi uma das primeiras linguagens de programação com fins gerais e orientadas para problemas.

2.3 Fortran 90

Ao contrário do que alguns imaginam, FORTRAN 90 é muito mais que uma nova versão do tradicional FORTRAN, primeira linguagem de programação. Na verdade, o FORTRAN 90 é uma linguagem absolutamente nova, concebida de conformidade com os conceitos mais atuais de engenharia de software. Muitos dos novos recursos são bastante avançados e inacessíveis a maioria dos engenheiros especialistas em sistemas de potência. Não é raro encontrar usuários utilizando o FORTRAN 90 exatamente como faziam com o FORTRAN, isto é, simplesmente ignorando os recursos avançados e abusando das estruturas antigas (IF...,ELSE...ENDIF, DO...ENDDO, DOWHILE...ENDDO, e até o obsoleto e contra-indicado GO TO).

Alguns dos novos recursos que o FORTRAN 90 oferece são:

- ❖ Alocação dinâmica de memória;
- ❖ Estruturas de dados praticamente ilimitadas, possíveis de ser definidas pelo usuário;
- ❖ Interfaces de procedimentos abertas, que permitem inclusive sobreposição e recursividade;
- ❖ Construtor e reformatador de vetores;
- ❖ Facilidade para operações diretas com estruturas de dados complexas, notadamente com variáveis indexadas simples e mútuas (vetores e matrizes);
- ❖ Facilidade para criação de novos operadores e extensão de operadores já existentes;
- ❖ Editor poderoso e confortável de interfaces amigáveis;
- ❖ Possibilidade de criar aplicativos para WINDOWS[®] 95 e WINDOWS[®] NT.
- ❖ Facilidade para criação e utilização de bibliotecas.

CAPÍTULO 3

VERSÃO MONOFÁSICA DO MÉTODO DA SOMA DE POTÊNCIA

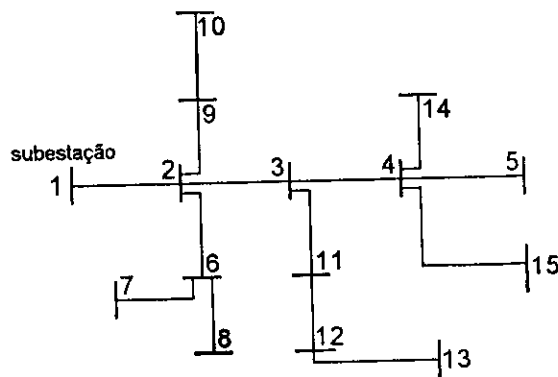
O *método soma de potência* é o mais usado para sistemas de distribuição radiais, pois apresenta melhor convergência, mesmo em caso de sobrecargas do sistema (Rudnik, 1990).

A solução do problema de fluxo de potência em um sistema radial, usando o método soma de potência, consiste em resolver, para cada trecho da rede uma equação de quarto grau em termos da tensão nodal.

O processo do cálculo da potência equivalente para uma determinada barra consiste em somar as potências (daí o nome do método) referentes às cargas e às perdas de potência dos ramos (trechos) que estão depois da barra de interesse. Na soma das cargas é incluída a carga própria. Esse processo é realizado do nó terminal ao nó fonte, ou seja, é um processo "de baixo para cima".

3.1 Formulação Matemática do Método

A Figura 3.1 mostra o diagrama de um alimentador de distribuição. A Figura 3.2 mostra o



circuito elétrico equivalente da Figura 3.1.

Figura 3.1 – Alimentador radial.

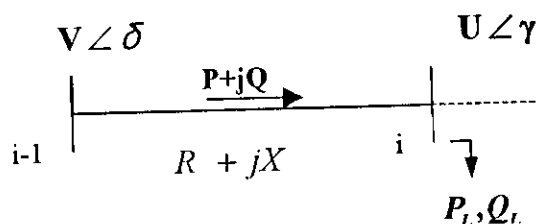


Figura 3.2 – Um trecho do alimentador da figura 3.1

Da Figura 3.2, teremos as equações a seguir:

$$I(1) = \frac{|V(1)|\angle\delta(1) - |V(2)|\angle\delta(2)}{R(1) + jX(1)} \quad (3.1)$$

$$P(2) - jQ(2) = V(2)^* I(1) \quad (3.2)$$

Substituindo a equação (3.1) em (2) temos:

$$\frac{P(2) - jQ(2)}{V(2)^*} = \frac{|V(1)|\angle\delta(1) - |V(2)|\angle\delta(2)}{R(1) + jX(1)} \quad (3.3)$$

Mas,

$$V(2)^* = V(2) \angle -\delta(2)$$

Assim, a equação (3.3) torna-se:

$$|V(1)| \cdot |V(2)| \angle (\delta(1) - \delta(2)) - |V(2)|^2 = (R(1) + jX(1))(P(2) - jQ(2))$$

Transformando para a forma retangular e separando parte real e parte imaginária:

$$|V(1)| \cdot |V(2)| \cos[\delta(1) - \delta(2)] = |V(2)|^2 + P(2)R(1) + Q(2)X(1)$$

$$|V(1)| \cdot |V(2)| \sin[\delta(1) - \delta(2)] = P(2)X(1) - Q(2)R(1) \quad (3.4)$$

Elevando ao quadrado e somando as equações (3.4) chegamos à equação (3.5) que é biquadrada na variável V:

$$\begin{aligned} &|V(2)|^4 + 2[P(2)R(1) + Q(2)X(1) - 0.5|V(1)|^2]|V(2)|^2 \\ &+ (R^2(1) + X^2(1))(P^2(2) + Q^2(2)) = 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Ela pode ser escrita de maneira mais conveniente como:

$$V^4 + 2AV^2 + C = 0 \quad (3.6)$$

Definindo-se:

$$A(j) = P(m2) * R(j) + Q(m2) * X(j) - 0.5 * |V(m1)|^2 \quad (3.7)$$

$$C(j) = (R^2(j) + X^2(j)) * (P^2(m2) + Q^2(m2)) \quad (3.8)$$

j é o número do ramo, $m1$ e $m2$ são os nós iniciais e finais, respectivamente.

Com:

$$B(j) = \sqrt{A^2(j) - C(j)} \quad (3.9)$$

Desse modo a solução é

$$|V(m2)| = \sqrt{B(j) - A(j)} \quad (3.10)$$

De acordo com DAS *et al* (1995) as perdas de potência são dadas por:

$$LP(j) = \frac{R(j)[P^2(m2) + Q^2(m2)]}{|V(m2)|^2}$$

$$LQ(j) = \frac{X(j) * LP(j)}{R(j)} \quad (3.11)$$

3.2 Algoritmo básico

De acordo com a formulação da seção 3.2, a tensão de um trecho qualquer¹, U, de um alimentador radial, pode ser determinada, conhecendo-se a tensão V, no trecho antecedente, através do seguinte algoritmo básico:

1. Inicialmente, considerar nulas as perdas ativas e reativas no alimentador.
2. Calcular os fluxos no trecho (P e Q) considerando a configuração do alimentador e a carga instalada em cada barra e as perdas por trecho do alimentador.
3. Calcular os vetores auxiliares A e C empregando as eqs. (3.7) e (3.8), respectivamente.
4. Calcular o vetor auxiliar B empregando a eq. (3.9).

¹ Aqui se entende como tensão do trecho a tensão de sua barra final.

5. Calcular a tensão do trecho empregando a eq. (3.10).
6. Calcular as perdas de potência ativa e reativa no trecho empregando as eqs. (3.11).
7. Repetir os passos 2 a 6 para todos os trechos do alimentador.
8. Repetir os passos 2 a 7 enquanto houver variação significativa nas perdas totais do alimentador.

3.3 Implementação da versão monofásica para sistemas radiais com identificação e classificação automática de barras.

Essa é uma versão original (para sistemas radiais monofásicos) utilizando o método da Soma de Potência, mas em que a identificação e classificação das barras é automática.

Basicamente consiste em:

1. Entrada dos parâmetros do alimentador e dados da carga;
2. Identificação do número de trechos;
3. Classificação das barras;
4. Teste da estrutura radial do alimentador;
5. Identificação das barras;
6. Rotina para reordenação das barras;
7. Inicializações (perdas, fluxos de potência e variáveis de controle do processo iterativo);
8. Teste de convergência;
9. Acumulação das cargas a jusante de cada trecho;
10. Cálculo do fluxo de potência e da tensão nas barras atualização das perdas.

3.4 A reordenação de barras

Os processos de cálculo das potências equivalentes e das tensões nodais, pelo método da soma de potência, exigem que a rede de distribuição seja percorrida nos sentidos ascendente e descendente, respectivamente. Então é necessária uma maneira sistemática para percorrer as barras da rede, um sistema de numeração especial apresentado por Rajagopalan (1978) que numera os nós e os ramos da rede em conjunto, ou seja, cada ramo recebe um número que coincide com um dos seus dois nós terminais. Então, procurando uma forma mais eficiente para solucionar esse problema, utilizou-se o paradigma de programação vetorizada, que resultou na implementação de uma rotina bastante simplificada e eficiente. Foram realizados vários testes entrando com as barras em qualquer ordem e os resultados obtidos estiveram de acordo com os apresentados na referência (Das *et al*, 1995).

Este método de reordenação de barras não se encontra em nenhuma bibliografia à que se teve acesso, talvez se trate de uma implementação nova. Por ter sido desenvolvido como um trabalho inédito, a implementação do método requereu mais tempo que o previsto. Mas, as facilidades obtidas por fim justificam o tempo gasto.

A classificação automática de barras também faz parte da rotina implementada. Embora, as barras sejam identificadas por um nome ou um código, elas recebem na fase de processamento computacional uma numeração sequencial e são classificadas em três tipos, da maneira como mostrado na tabela a seguir:

| Tipo | Barra | Propriedades |
|------|---------------|---|
| 0 | Terminal | Uma barra onde termina o alimentador |
| 1 | intermediária | São simplesmente barra de carga ou de mudança de cabo ou de tipo de circuito. |
| > 1 | De derivação | Que não se classifica como nenhuma das anteriores. |

Comparando o fluxograma implementado para versão monofásica (figura 3.3) com o fluxograma do método proposto por (Das *et al*, 1995) (figura 3.4), pode-se observar facilmente que o esforço computacional e a complexidade foram bastante reduzidas, podendo agora o usuário entrar com os trechos em qualquer ordem. Além da simplificação na fase de ordenação dos trechos, os cálculos do fluxo de potência foram realizados de uma forma bem simplificada quando comparada a forma proposta por (Das *et al*, 1995).

Os novos recursos do Fortran 90 possibilitam maiores confortos e segurança na implementação dos programas. As várias funções intrínsecas proporcionam programas mais compactos e flexíveis. Por exemplo, a função *count* que é bastante empregada no fluxograma da (figura 3.3), poupando tempo e simplificando a estrutura de programação.

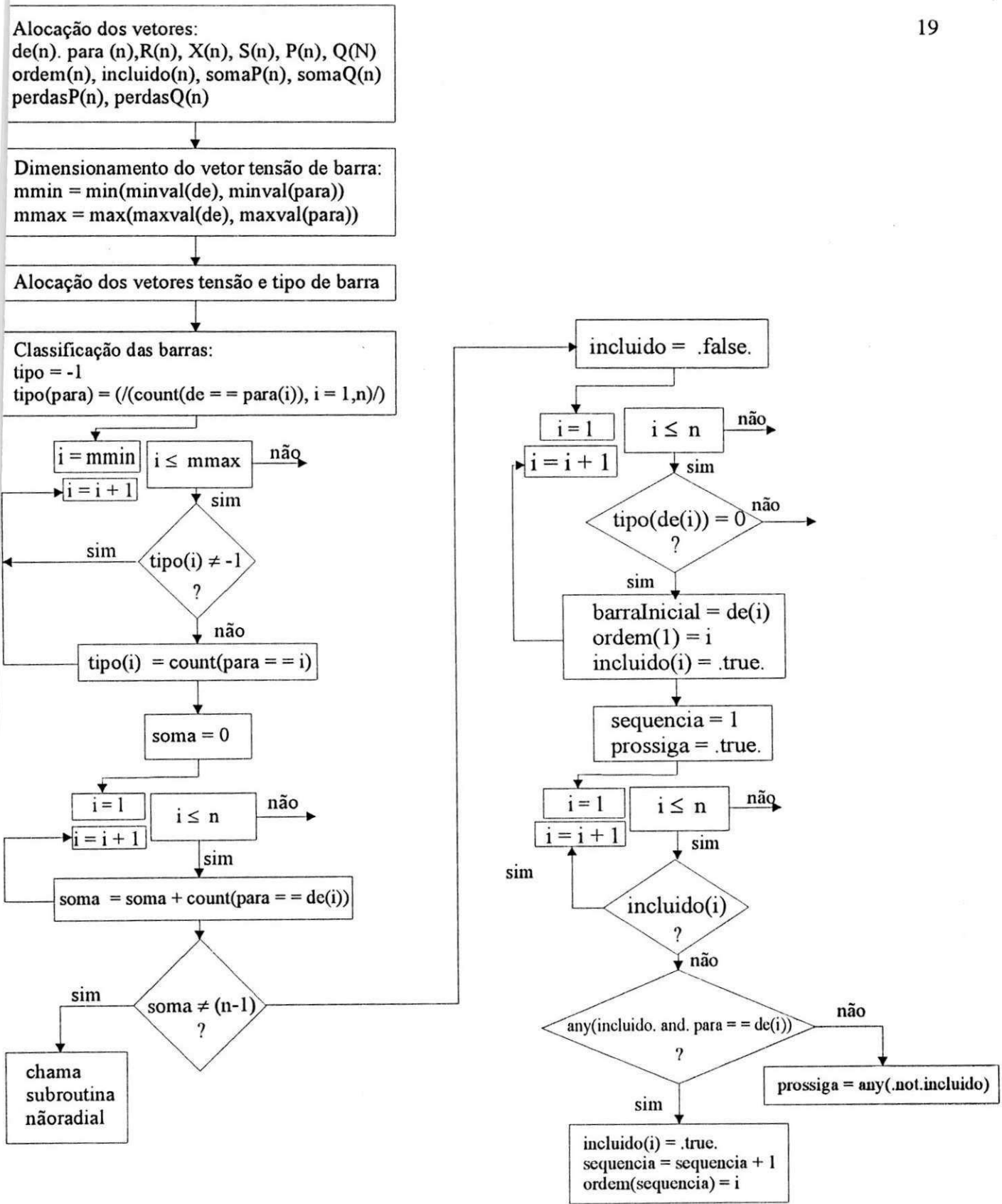


Figura 3.3 - Fluxograma para reordenação de barras utilizando a programação vetorizada.

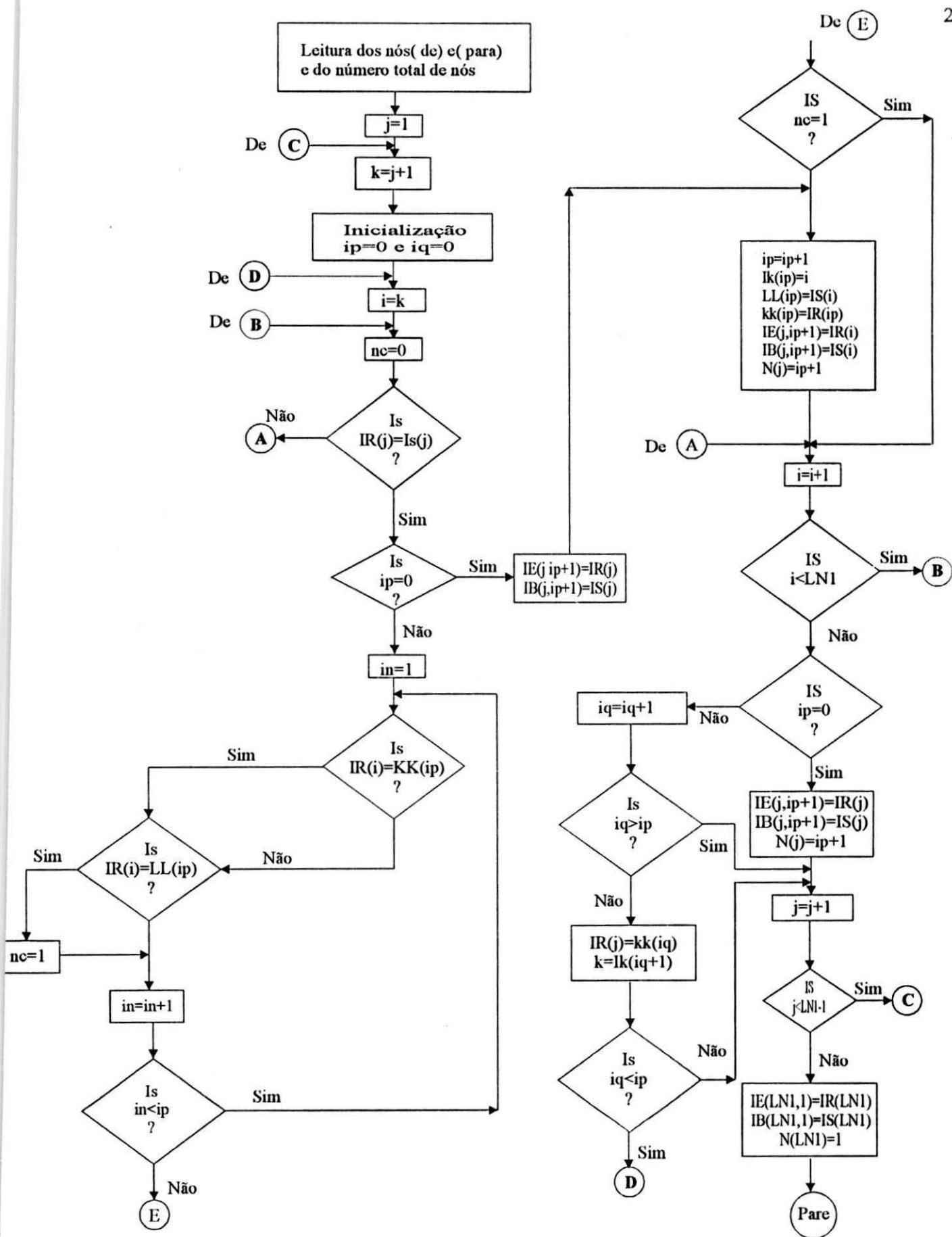


Figura 3.4 - Fluxograma para reordenação de barras segundo (Das et al., 1995)

3.5 A extensão do método soma de potências a alimentadores não-radiais

Os sistemas malhados podem ser modelados através de um equivalente radial. Para que a equivalência entre os dois sistemas ocorra, necessita-se determinar a injeção de potência nos pontos de seccionamento do sistema não-radial original. Cria-se, então, um novo sistema radial a partir do sistema não-radial original, com um ramo a mais, sendo, o seu destino, um nó fictício. Esta técnica foi empregada em trabalhos anteriores (Ribeiro, 1996), mas como estamos utilizando a técnica de programação vetorial não será necessário empregar essa metodologia. O sistema radial equivalente será obtido pelo método da abertura do anel.

Os sistemas em anel podem ser convertidos, para efeito de cálculo, em radiais fazendo-se uma "abertura". A figura 3.5 exemplifica este artifício.

A condição que se impõe para que os alimentadores da figura 3.5 sejam equivalentes é que as tensões às barras terminais artificiais (barras i na figura 3.5 a e $n+1$ na figura 3.5 b) sejam iguais à tensão da barra i do sistema original (figura 3.5 a).

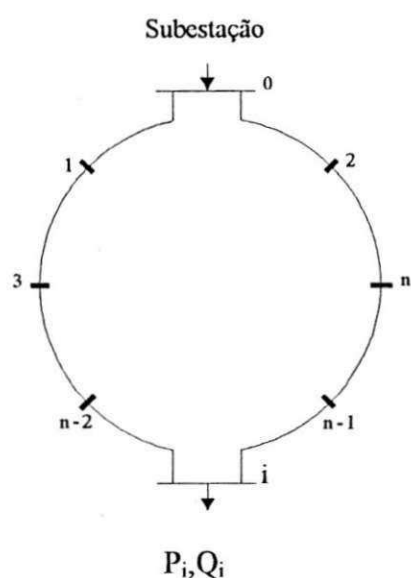


Figura – 3.5 (a)
Alimentador em anel.

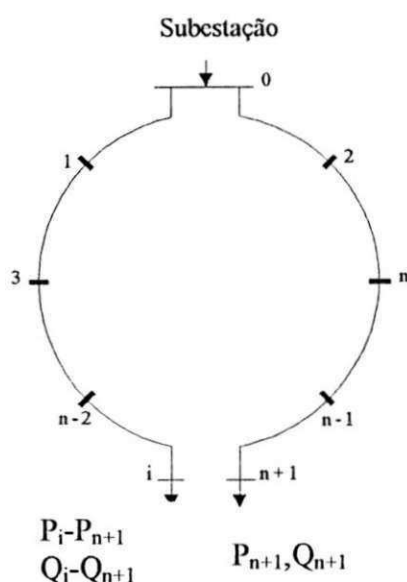


Figura – 3.5 (b)
Alimentador radial equivalente.

Na figura 3.5, a barra 0 é a barra de origem, i é a barra em que se pretende abrir o anel, $j=1,2,\dots, n$ são as barras de derivação intermediárias e $n+1$ é a barra artificial.

3.6 Reconhecimento e abertura de anéis: Aplicações

Na figura 3.6 é apresentado um alimentador em anel com 15 barras. Os dados de entrada estão na tabela 3.1 e os resultados das simulações nas tabelas 3.2 e 3.3.

As características dos alimentadores das figuras 3.6 e 3.7, assim como as variáveis de controle do processo iterativo são:

| | |
|--------------------------------|------------|
| Tensão nominal | 11.0 kV |
| Fator de potência ¹ | 0.70 |
| Tolerância | 10^{-10} |
| Número de iterações | 5/10 |

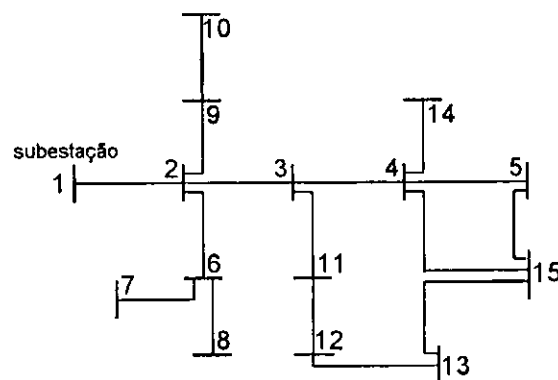


Figura 3.6 – Alimentador anel derivado do alimentador da fig. 3.1

fazendo-se as interligações 5-15 e 13-15.

¹Todas as cargas possuem o mesmo fator de potência.

Tabela 3.1 – Dados de entrada para o alimentador da figura 3.6.

| Impedância, Ω | | Carga | | |
|----------------------|-------|-------|------|-------|
| R | X | Kva | kW | Kvar |
| 1.523 | 1.028 | 63 | 44.1 | 45 |
| 1.088 | 0.734 | 200 | 140 | 142.8 |
| 2.013 | 1.358 | 100 | 70 | 71.4 |
| 2.448 | 1.651 | 100 | 70 | 71.4 |
| 2.231 | 1.505 | 50 | 35 | 35.7 |
| 1.796 | 1.211 | 200 | 140 | 142.8 |
| 1.197 | 0.807 | 100 | 70 | 71.4 |
| 2.557 | 1.725 | 200 | 140 | 142.8 |
| 1.687 | 1.138 | 63 | 44.1 | 45 |
| 2.013 | 1.358 | 63 | 44.1 | 45 |
| 1.251 | 0.844 | 100 | 70 | 71.4 |
| 0.841 | 0.823 | 200 | 140 | 142.8 |
| 1.17 | 1.145 | 100 | 70 | 71.4 |
| 1.353 | 1.323 | 63 | 44.1 | 45 |
| 1.353 | 1.323 | 63 | 44.1 | 45 |
| 1.353 | 1.323 | 50 | 35 | 35.7 |

Tabela 3.2 – Resultado das simulações para o alimentador da figura 3.6.

| Trecho | | Tipo | | Perdas | | Fluxo | |
|--------|------|------|------|--------|---------|--------|---------|
| De | Para | De | Para | P(kW) | Q(kvar) | P(Kw) | Q(kvar) |
| 4 | 5 | 3 | 1 | 0.2 | 0.1 | 88.2 | 90 |
| 6 | 7 | 2 | 0 | 0.4 | 0.3 | 140 | 142.8 |
| 2 | 9 | 3 | 1 | 0.5 | 0.3 | 114.2 | 116.4 |
| 11 | 12 | 1 | 1 | 1 | 0.7 | 149.4 | 152.3 |
| 4 | 14 | 3 | 0 | 0.1 | 0 | 35 | 35.7 |
| 3 | 11 | 2 | 1 | 2.8 | 1.9 | 290.4 | 295.8 |
| 4 | 15 | 3 | 0 | 0.1 | 0.1 | 70 | 71.4 |
| 2 | 6 | 3 | 2 | 5.8 | 3.9 | 350.5 | 357.4 |
| 9 | 10 | 1 | 0 | 0.1 | 0 | 44.1 | 45 |
| 12 | 13 | 1 | 1 | 0.2 | 0.2 | 79.1 | 80.7 |
| 6 | 8 | 2 | 0 | 0.1 | 0.1 | 70 | 71.4 |
| 3 | 4 | 2 | 3 | 1.7 | 1.7 | 333.6 | 340.2 |
| 2 | 3 | 3 | 2 | 10.5 | 10.2 | 698.6 | 711.1 |
| 1 | 2 | 0 | 3 | 36.1 | 35.3 | 1224.1 | 1244.4 |
| 5 | 16 | 1 | 0 | 0 | 0 | 44.1 | 45 |
| 13 | 17 | 1 | 0 | 0 | 0 | 35 | 35.7 |
| | | | | 59.6 | 54.9 | | |

Tabela 3.3 – Tensão em todas as barras do alimentador da figura 3.6.

| Barra | Tensão | Barra | Tensão |
|-------|--------|-------|--------|
| 1 | 11.000 | 9 | 10.655 |
| 2 | 10.691 | 10 | 10.643 |
| 3 | 10.536 | 11 | 10.452 |
| 4 | 10.483 | 12 | 10.393 |
| 5 | 10.461 | 13 | 10.367 |
| 6 | 10.548 | 14 | 10.47 |
| 7 | 10.523 | 15 | 10.469 |
| 8 | 10.534 | 16 | 10.45 |
| | | 17 | 10.358 |

A figura 3.7 é um alimentador em anel de 15 barras. Os dados de entrada estão na tabela 3.4 e os resultados das simulações nas tabelas 3.5 e 3.6.

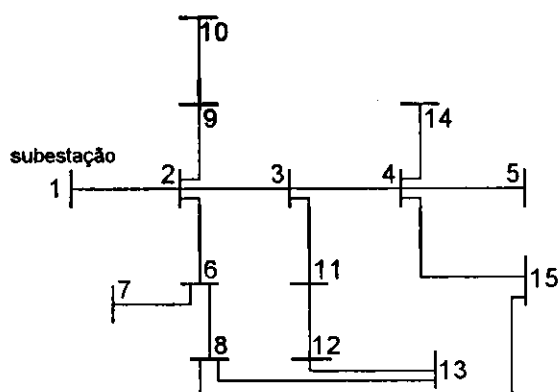


Figura 3.7 – Alimentador anel derivado do alimentador da fig. 3.1
fazendo-se as interligações 8-15 e 8-13.

Tabela 3.4 – Dados de entrada para o alimentador da figura 3.7.

| Impedância, Ω | | Carga | | |
|----------------------|-------|-------|------|-------|
| R | X | KVA | kW | kvar |
| 1.523 | 1.028 | 63 | 44.1 | 45 |
| 1.088 | 0.734 | 200 | 140 | 142.8 |
| 2.013 | 1.358 | 100 | 70 | 71.4 |
| 2.448 | 1.651 | 100 | 70 | 71.4 |
| 2.231 | 1.505 | 50 | 35 | 35.7 |
| 1.796 | 1.211 | 200 | 140 | 142.8 |
| 1.197 | 0.807 | 100 | 70 | 71.4 |
| 2.557 | 1.725 | 200 | 140 | 142.8 |
| 1.687 | 1.138 | 63 | 44.1 | 45 |
| 2.013 | 1.358 | 63 | 44.1 | 45 |
| 1.251 | 0.844 | 100 | 70 | 71.4 |
| 0.841 | 0.823 | 200 | 140 | 142.8 |
| 1.17 | 1.145 | 100 | 70 | 71.4 |
| 1.353 | 1.323 | 63 | 44.1 | 45 |
| 1.353 | 1.323 | 63 | 44.1 | 45 |
| 1.353 | 1.323 | 50 | 35 | 35.7 |

Tabela 3.5 – Resultado das simulações para o alimentador da figura 3.7.

| Trecho | | Tipo | | Perdas | | Fluxo | |
|--------|------|------|------|--------|---------|--------|---------|
| de | Para | De | Para | P(kW) | Q(kvar) | P(kW) | Q(kvar) |
| 4 | 5 | 3 | 0 | 0.1 | 0 | 44.1 | 45 |
| 6 | 7 | 2 | 0 | 0.4 | 0.3 | 140 | 142.8 |
| 2 | 9 | 3 | 1 | 0.5 | 0.3 | 114.2 | 116.4 |
| 11 | 12 | 1 | 1 | 0.6 | 0.4 | 114.2 | 116.5 |
| 4 | 14 | 3 | 0 | 0.1 | 0 | 35 | 35.7 |
| 3 | 11 | 2 | 1 | 2.2 | 1.5 | 254.8 | 259.7 |
| 4 | 15 | 3 | 0 | 0.1 | 0.1 | 70 | 71.4 |
| 2 | 6 | 3 | 2 | 8.7 | 5.9 | 430.1 | 438.5 |
| 9 | 10 | 1 | 0 | 0.1 | 0 | 44.1 | 45 |
| 12 | 13 | 1 | 0 | 0.1 | 0 | 44.1 | 45 |
| 6 | 8 | 2 | 2 | 0.5 | 0.3 | 149.2 | 152.2 |
| 3 | 4 | 2 | 3 | 1.3 | 1.3 | 289.3 | 295.1 |
| 2 | 3 | 3 | 2 | 8.2 | 8 | 617.5 | 628.9 |
| 1 | 2 | 0 | 3 | 36 | 35.2 | 1223.3 | 1243 |
| 8 | 17 | 2 | 0 | 0 | 0 | 44.1 | 45 |
| 8 | 16 | 2 | 0 | 0 | 0 | 35 | 35.7 |
| | | | | 58.8 | 53.5 | | |

Tabela 3.6 – Tensão em todas as barras do alimentador da figura 3.6.

| Barra | Tensão | Barra | Tensão |
|-------|--------|-------|--------|
| 1 | 11.000 | 9 | 10.655 |
| 2 | 10.691 | 10 | 10.643 |
| 3 | 10.555 | 11 | 10.481 |
| 4 | 10.508 | 12 | 10.436 |
| 5 | 10.498 | 13 | 10.421 |
| 6 | 10.515 | 14 | 10.496 |
| 7 | 10.490 | 15 | 10.495 |
| 8 | 10.485 | 16 | 10.476 |
| | | 17 | 10.473 |

Os resultados mostrados nas tabelas anteriores validam a rotina para simulação de sistemas em anel. As perdas foram reduzidas e a tensão nas barras se elevaram, de acordo com o esperado quando se realiza a abertura do anel.

CAPÍTULO 4

VERSÃO TRIFÁSICA DO MÉTODO DA SOMA DE POTÊNCIA:

UMA IMPLEMENTAÇÃO VETORIAL

4.1 Introdução

Para estender o método da Soma de Potência a sistemas trifásicos com desequilíbrio de fase será feita uma generalização das equações fundamentais do método, estabelecendo novas estruturas de dados (matrizes e vetores) e operações adequadas para que sejam mantidas a coerência e a validade quando aplicadas a alimentadores trifásicos com acoplamento de fase. A implementação será realizada segundo o paradigma de programação orientada a objeto e usando as facilidades de programação vetorial da linguagem Fortran 90.

4.2 Notação

Para efeito de simplificar a notação se evitarão por enquanto, os índices que normalmente indicam a que barra ou trecho a variável se refere. Assim, serão usados eventualmente apenas os índices de fase.

Vetores e matrizes serão escritos em negrito. Os fasores serão indicados com um ^ (sinal de circunflexo) e quando expresso em coordenadas polares o símbolo \angle se colocará entre o módulo e a fase, nessa ordem. Essa notação se aplica tanto a escalares quanto a vetores de fasor.

No equacionamento a seguir constarão multiplicações, divisões e potenciações de vetores. Também ocorrerão produtos matriciais todos entre matrizes 3x3 e vetores 3x1. A natureza da operação será de fácil identificação, o que dispensará o emprego de símbolo especial.

4.3 Fundamentos

A figura 4.1 representa um trecho de um alimentador trifásico com acoplamento de fase. Em princípio não se restringirá a natureza desse acoplamento, que pode ser eletrostático ou eletromagnético.

As relações entre as tensões nas barras terminais e a corrente no trecho são:

$$V_a \angle \delta_a = (R_{aa} + jX_{aa}) \hat{I}_a + (R_{ab} + jX_{ab}) \hat{I}_b + (R_{ac} + jX_{ac}) \hat{I}_c + U_a \angle \gamma_a \quad (4.1a)$$

$$V_b \angle \delta_b = (R_{ba} + jX_{ba}) \hat{I}_a + (R_{bb} + jX_{bb}) \hat{I}_b + (R_{bc} + jX_{bc}) \hat{I}_c + U_b \angle \gamma_b \quad (4.1b)$$

$$V_c \angle \delta_c = (R_{ca} + jX_{ca}) \hat{I}_a + (R_{cb} + jX_{cb}) \hat{I}_b + (R_{cc} + jX_{cc}) \hat{I}_c + U_c \angle \gamma_c \quad (4.1c)$$

Sendo os índices a, b e c correspondentes às fases. R_{aa} , por exemplo é a resistência própria da fase a. X_{ab} é a reatância mútua das fases a e b.

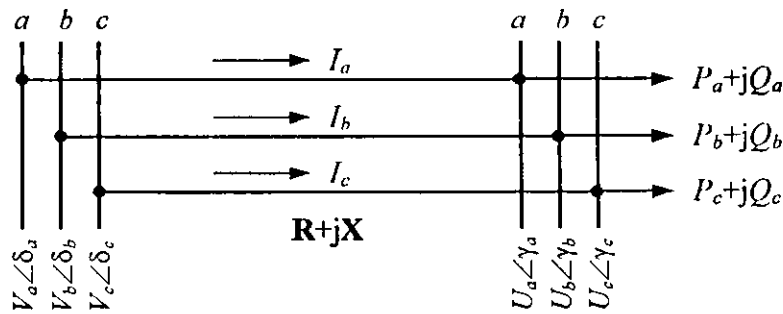


Fig. 4.1 - Trecho de alimentador trifásico.

Definindo-se as matrizes:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{aa} & R_{ab} & R_{ac} \\ R_{ba} & R_{bb} & R_{bc} \\ R_{ca} & R_{cb} & R_{cc} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_{aa} & X_{ab} & X_{ac} \\ X_{ba} & X_{bb} & X_{bc} \\ X_{ca} & X_{cb} & X_{cc} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

e os vetores

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\delta} = \begin{bmatrix} \delta_a \\ \delta_b \\ \delta_c \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\gamma} = \begin{bmatrix} \gamma_a \\ \gamma_b \\ \gamma_c \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \hat{\mathbf{I}} = \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

então as três equações (4.1) dão lugar a uma equação matricial única:

$$\mathbf{V} \angle \boldsymbol{\delta} = (\mathbf{R} + j\mathbf{X}) \hat{\mathbf{I}} + \mathbf{U} \angle \boldsymbol{\gamma} \quad (4.4)$$

As relações entre as tensões e potências são:

$$P_a - jQ_a = \hat{U}_a^* \hat{I}_a, \quad (4.5a)$$

$$P_b - jQ_b = \hat{U}_b^* \hat{I}_b \quad (4.5b)$$

$$\text{e} \quad P_c - jQ_c = \hat{U}_c^* \hat{I}_c, \quad (4.5c)$$

com o asterisco indicando conjugado complexo.

Definindo-se os vetores:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_a \\ P_b \\ P_c \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{bmatrix},$$

as equações (4.5) podem ser rescritas da seguinte forma compacta:

$$\mathbf{P} - j\mathbf{Q} = \hat{\mathbf{U}}^* \hat{\mathbf{I}} = \hat{\mathbf{I}} \hat{\mathbf{U}}^*. \quad (4.6)$$

O produto indicado na eq. (4.6) é vetorial (elemento-a-elemento).

Para eliminar a corrente da eq. (4.4), se multiplica (vetorialmente) todos os seus termos em ambos os lados por $\hat{\mathbf{U}}^* = U \angle -\gamma$. Isso resulta:

$$\begin{aligned} \mathbf{V} U \angle (\delta - \gamma) &= (\mathbf{R} + j\mathbf{X}) \hat{\mathbf{I}} \hat{\mathbf{U}}^* + U^2 \\ \text{ou} \quad \mathbf{V} U \angle (\delta - \gamma) &= (\mathbf{R} + j\mathbf{X})(\mathbf{P} - j\mathbf{Q}) + U^2. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Aplicando-se a propriedade distributiva do produto matricial na eq. (4.7) se chega a:

$$\mathbf{V} U \angle (\delta - \gamma) = (\mathbf{R}\mathbf{P} + \mathbf{X}\mathbf{Q} + U^2) + j(\mathbf{X}\mathbf{P} - \mathbf{R}\mathbf{Q}) \quad (4.8)$$

À equação complexa (4.8) correspondem duas equações reais que relacionam os componentes (retangular ou polar) das variáveis. A equação que relaciona as amplitudes ao quadrado é:

$$\mathbf{V}^2 U^2 = (\mathbf{R}\mathbf{P} + \mathbf{X}\mathbf{Q} + U^2)^2 + (\mathbf{X}\mathbf{P} - \mathbf{R}\mathbf{Q})^2$$

Ou,

$$U^4 + 2 \left\{ \mathbf{R}\mathbf{P} + \mathbf{X}\mathbf{Q} - \frac{1}{2} \mathbf{V}^2 \right\} U^2 + (\mathbf{R}\mathbf{P} + \mathbf{X}\mathbf{Q})^2 + (\mathbf{X}\mathbf{P} - \mathbf{R}\mathbf{Q})^2 = 0. \quad (4.9)$$

A equação (4.9) é biquadrada na variável U , vetor dos módulos das tensões no final do trecho. Ela pode ser escrita de forma mais conveniente:

$$U^4 + 2\mathbf{A} U^2 + \mathbf{C} = 0, \quad (4.10)$$

ao se definirem:

$$\boxed{A = RP + XQ - \frac{1}{2}V^2} \quad (4.11)$$

e

$$\boxed{C = (RP + XQ)^2 + (XP - RQ)^2} \quad (4.12)$$

Desse modo a solução é:

$$\boxed{U = \sqrt{B - A}} \quad (4.13a)$$

sendo

$$\boxed{B = \sqrt{A^2 - C}} \quad (4.13b)$$

Observe-se que as eqs. (4.10) e (4.11) que equacionam o problema trifásico e as eqs. (4.13) que expressam a solução são semelhantes às do fluxo monofásico. O que difere é a eq. (4.12), que pode ser vista como uma generalização da correspondente no fluxo monofásico. Caso não haja acoplamento de nenhuma natureza, as matrizes R e X são diagonais e então,

$$C = (R^2 + X^2)(P^2 + Q^2).$$

como no caso original. Sem acoplamento, as três fases são independentes, ou seja, se comportam como três alimentadores monofásicos distintos.

Uma vez determinada a tensão na barra final é possível determinarem-se as perdas no trecho:

$$\boxed{\mathcal{P} = R \frac{P^2 + Q^2}{U^2}} \quad (4.14)$$

$$\boxed{\mathcal{Q} = X \frac{P^2 + Q^2}{U^2}} \quad (4.15)$$

ou se preferir,

$$\mathcal{Q} = X R^{-1} \mathcal{P} \quad (4.16)$$

Nas equações (4.14) e (4.15) as potenciações e divisões são operações vetoriais (elemento-a-elemento) e os produtos são matriciais. R^{-1} é a inversa da matriz R .

4.4 Alimentador trifásico a quatro fios

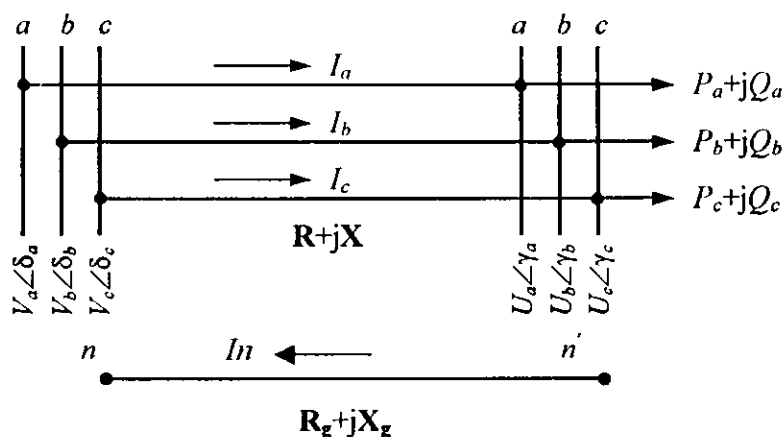


Figura 4.2 - Trecho de um alimentador trifásico com neutro aterrado por impedância.

A figura 4.2 representa um trecho de um alimentador trifásico a quatro fios.

As relações entre as tensões nas barras terminais e a corrente no trecho são:

$$\hat{I}_n = \hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c \quad (4.17a)$$

$$V_a \angle \delta_a = (R_{aa} + jX_{aa})\hat{I}_a + (R_{ab} + jX_{ab})\hat{I}_b + (R_{ac} + jX_{ac})\hat{I}_c - (\hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c)(R_{ag} + jX_{ag}) + U_a \angle \gamma_a \quad (4.17b)$$

$$V_b \angle \delta_b = (R_{ba} + jX_{ba})\hat{I}_a + (R_{bb} + jX_{bb})\hat{I}_b + (R_{bc} + jX_{bc})\hat{I}_c - (\hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c)(R_{bg} + jX_{bg}) + U_b \angle \gamma_b \quad (4.17c)$$

$$V_c \angle \delta_c = (R_{ca} + jX_{ca})\hat{I}_a + (R_{cb} + jX_{cb})\hat{I}_b + (R_{cc} + jX_{cc})\hat{I}_c - (\hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c)(R_{cg} + jX_{cg}) + U_c \angle \gamma_c \quad (4.17d)$$

Definindo-se as matrizes:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{aa} - R_{ag} & R_{ab} - R_{ag} & R_{ac} - R_{ag} \\ R_{ba} - R_{bg} & R_{bb} - R_{bg} & R_{bc} - R_{bg} \\ R_{ca} - R_{cg} & R_{cb} - R_{cg} & R_{cc} - R_{cg} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_{aa} - X_{ag} & X_{ab} - X_{ag} & X_{ac} - X_{ag} \\ X_{ba} - X_{bg} & X_{bb} - X_{bg} & X_{bc} - X_{bg} \\ X_{ca} - X_{cg} & X_{cb} - X_{cg} & X_{cc} - X_{cg} \end{bmatrix}$$

e os vetores

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\delta} = \begin{bmatrix} \delta_a \\ \delta_b \\ \delta_c \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\gamma} = \begin{bmatrix} \gamma_a \\ \gamma_b \\ \gamma_c \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \hat{\mathbf{I}} = \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix}$$

Sendo o índice g correspondente ao condutor do neutro. R_{ag} , por exemplo é a resistência mútua da fase (a) e o neutro (g).

Observe-se que as equações de (4.4) a (4.16) que equacionam o problema trifásico, sem considerar o aterramento do neutro permanecem inalteradas. O que difere são as matrizes \mathbf{R} e \mathbf{X} . Caso o neutro seja solidamente aterrado, as matrizes \mathbf{R} e \mathbf{X} são as mesmas de (4.2).

4.5 Eficiência computacional da implementação

Em sistemas de distribuição convencionais o que realmente é significativo é o acoplamento magnético das fases. A matriz \mathbf{R} é diagonal e a matriz \mathbf{X} é cheia, porém simétrica. Para aumentar a eficiência computacional ao implementar o método para alimentadores com grande número de trechos, é preferível que as matrizes quadradas definidas pelas eqs. (4.2) sejam substituídas por:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{aa} \\ R_{bb} \\ R_{cc} \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_{aa} & X_{ab} \\ X_{bb} & X_{ac} \\ X_{cc} & X_{bc} \end{bmatrix}$$

Em Fortran 90 o operador $*$ é predefinido para multiplicações escalar e vetorial. O que se tem que fazer é apenas criar uma nova interface de operador para estender $*$ ao produto matricial em que a matriz 3×3 simétrica esteja na forma compacta apresentada acima. Ou seja, se deve inserir no programa principal a seguinte interface:

```
interface operator (*)
  function meuProduto(c,b)
    real, intent(in):: c(3,2),b(3)
    real:: meuProduto(3)
  end function meuProduto
end interface
```

correspondente ao seguinte subprograma:

```
function meuProduto(c,b)
  real:: meuProduto(3),c(3,2),b(3)
  meuProduto(1)=c(1,1)*b(1)+c(1,2)*b(2)+c(2,2)*b(3)
  meuProduto(2)=c(1,2)*b(1)+c(2,1)*b(2)+c(3,2)*b(3)
  meuProduto(3)=c(2,2)*b(1)+c(3,2)*b(2)+c(3,1)*b(3)
  return
end function meuProduto
```

4.6 Algoritmo básico

De acordo com a formulação da seção 4.2, a tensão num trecho qualquer¹, U , de um alimentador radial trifásico, pode ser determinada, conhecendo-se a tensão V , no trecho antecedente, através do seguinte algoritmo básico:

1. Inicialmente, considerar nulas as perdas ativas e reativas no alimentador.
2. Calcular os fluxos no trecho (vetores P e Q) considerando a configuração do alimentador, a carga instalada em cada barra e as perdas por trecho do alimentador.
3. Calcular os vetores auxiliares A e C empregando as eqs. (4.11) e (4.12), respectivamente.
4. Calcular o vetor auxiliar B empregando a eq. (4.13b).

¹ Aqui se entende como tensão do trecho a tensão de sua barra final.

5. Calcular a tensão do trecho empregando a eq. (4.13a).
6. Calcular as perdas de potência ativa e reativa no trecho empregando as eqs. (4.14) e (4.15).
7. Repetir os passos 2 a 6 para todos os trechos do alimentador.
8. Repetir os passos 2 a 7 enquanto houver variação significativa nas perdas totais do alimentador.

4.7 Programação orientada a objeto

O algoritmo estabelecido na seção anterior sugere claramente que sua implementação seja feita de maneira orientada a um objeto *trecho* do alimentador, principalmente. Noutros termos, a estrutura de dados principal apropriada é aquela que descreve o alimentador por trecho. Especificamente, essa estrutura seria alguma coisa assim:

```

type trecho

integer:: de      !número do trecho antecedente
integer:: tipo    !tipo da barra final do trecho:
                  !terminal (0),
                  !intermediária (1)
                  !ou de derivação (>1)
real:: r(3)       !resistência por fase
real:: x(3,2)     !reatâncias próprias
                  !(1a. coluna) e mútuas (2a. coluna)
real:: pl(3)      !carga ativa do trecho
                  !(instalada na barra final)
real:: ql(3)      !carga reativa do trecho
                  !(instalada na barra final)
real:: p(3)       !fluxo ativo no trecho por fase
real:: q(3)       !fluxo reativo no trecho por fase
real:: u(3)       !tensão na barra final por fase
real:: dp(3)      !perdas ativas no trecho por fase
real:: dq(3)      !perdas reativas no trecho por fase
end type

```

Fig. 4.3 - Estrutura de dados.

Para um alimentador radial com $n+1$ barras, contando com a barra da subestação, deveria ser especificada uma coleção (*array*) de comprimento n para representar todos os trechos do alimentador. Ou seja no programa principal se deve especificar:

```
type (trecho), allocatable:: trec(:)
```

Depois da identificação do número de trechos do alimentador, n , por varredura do arquivo de dados no tempo de execução, a memória necessária para armazenar essa estrutura é reservada mediante a instrução: `allocate (trec(n))`.

Observe-se que, os vetores auxiliares **A**, **B** e **C** podem ser reutilizados no processamento de trecho. Isto é, não há necessidade de especificarem-se vetores desses para cada trecho.

Os métodos associados à classe *trecho* são:

| Método | variáveis definidas |
|---------------|---------------------|
| Leitura | de, r, x, pl, ql |
| Classificação | Tipo |
| Fluxo | p, q |
| Tensão | U |
| Perdas | dp, dq |

Uma segunda classe, denominada *alimentador*, é necessária para tratar as informações gerais do alimentador:

```

type alimentador
  integer:: n           !número de trechos
  integer:: ns          !número da barra da subestação
  real    :: vs         !tensão da barra da subestação
  real    :: dpTotais   !perdas ativas totais
  real    :: dqTotais   !perdas reativas totais
end type

```

com objeto

```
type(alimentador):: alim
```

e cujos métodos são:

| Método | variáveis definidas |
|--------------|---------------------|
| Leitura | ns, vs |
| Trechos | n |
| PerdasTotais | dpTotais, dqTotais |

O exemplo simples a seguir é suficiente para tornar mais claro a estrutura de dados e o procedimento apresentado acima.

Exemplo 1

Calcular os módulos das tensões de barra e as perdas totais no alimentador trifásico de 13,8 kV da fig. 4.4.

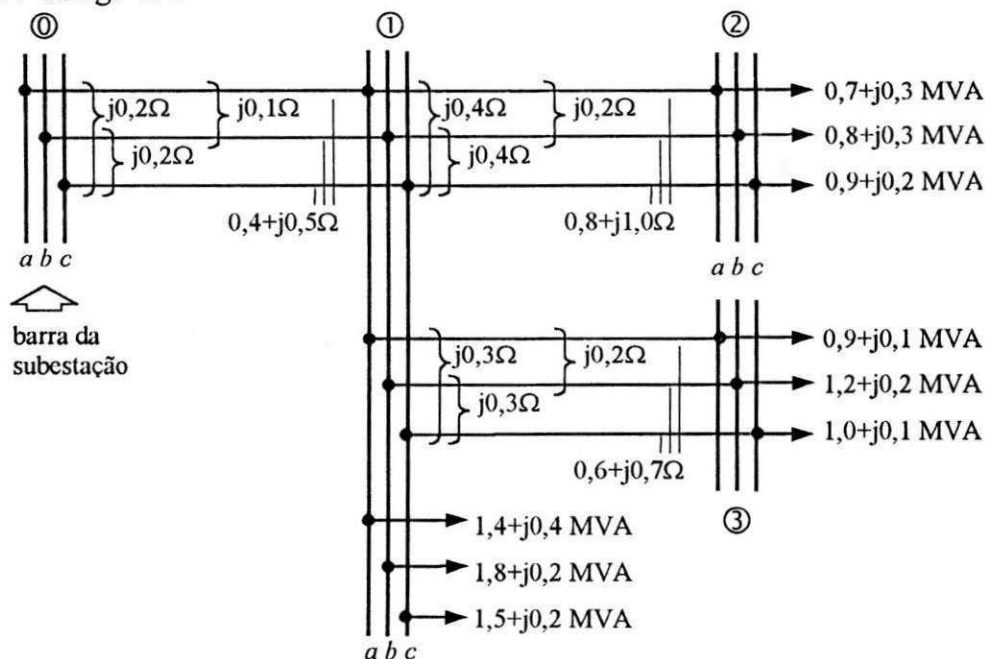


Fig. 4.4 - Alimentador trifásico do exemplo 1.

As estruturas adotadas com os dados deste alimentador são representadas nas figs. 4.5 e 4.6.

Aplicando-se a rotina implementada a este problema em particular se obtém o seguinte resultado:

| n | ns | vs | tol | kmax | | | | |
|--------------------|------|------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--|
| 3 | 0 | 13.8 | 0.1E-04 | 10 | | | | |
| de | para | r | x | pl | ql | | | |
| 0 | 1 | 0.4 | 0.5 | 0.1 | 0.7 | 0.3 | | |
| | | 0.4 | 0.5 | 0.2 | 0.8 | 0.3 | | |
| | | 0.4 | 0.5 | 0.2 | 0.9 | 0.3 | | |
| 1 | 2 | 0.8 | 1.0 | 0.2 | 1.4 | 0.4 | | |
| | | 0.8 | 1.0 | 0.4 | 1.8 | 0.2 | | |
| | | 0.8 | 1.0 | 0.4 | 1.5 | 0.2 | | |
| 1 | 3 | 0.6 | 0.7 | 0.2 | 0.9 | 0.1 | | |
| | | 0.6 | 0.7 | 0.3 | 1.2 | 0.2 | | |
| | | 0.6 | 0.7 | 0.3 | 1.0 | 0.1 | | |
| de | para | tipo | u | dp | dq | p | q | |
| 0 | 1 | 2 | 13.67 | 0.021 | 0.047 | 3.0 | 0.8 | |
| | | | 13.64 | 0.032 | 0.059 | 3.8 | 0.7 | |
| | | | 13.65 | 0.026 | 0.059 | 3.4 | 0.6 | |
| 1 | 2 | 0 | 13.54 | 0.009 | 0.020 | 1.4 | 0.4 | |
| | | | 13.51 | 0.014 | 0.025 | 1.8 | 0.2 | |
| | | | 13.53 | 0.010 | 0.024 | 1.5 | 0.2 | |
| 1 | 3 | 0 | 13.62 | 0.003 | 0.006 | 0.9 | 0.1 | |
| | | | 13.58 | 0.005 | 0.008 | 1.2 | 0.2 | |
| | | | 13.60 | 0.003 | 0.008 | 1.0 | 0.1 | |
| totais (MW, Mvar): | | | | .124 | .257 | 10.32 | 2.36 | |
| totais (%): | | | | 100. | 100. | 1.20 | 10.89 | |

A solução do problema propriamente dita é apresentada acima em negrito. As perdas ativas são muito baixas (1,2% da potência ativa total entregue na barra da subestação), enquanto as perdas reativas são altas (10,89%). A queda de tensão máxima ocorre na fase *b* da barra 2 (2,1%). O processo iterativo convergiu em apenas duas iterações.

```

☐ alim {...}
  |
  |--- alim%N          3
  |--- alim%NS        0
  |--- alim%VS        13.80000
  |--- alim%DPTOTAIS  0.1697876
  |--- alim%DQTOTAIS  0.3522217
☒ trec {...}

```

Fig. 4.5 - Estrutura de dados correspondente ao alimentador do exemplo 1. Detalhe dos dados gerais do alimentador.

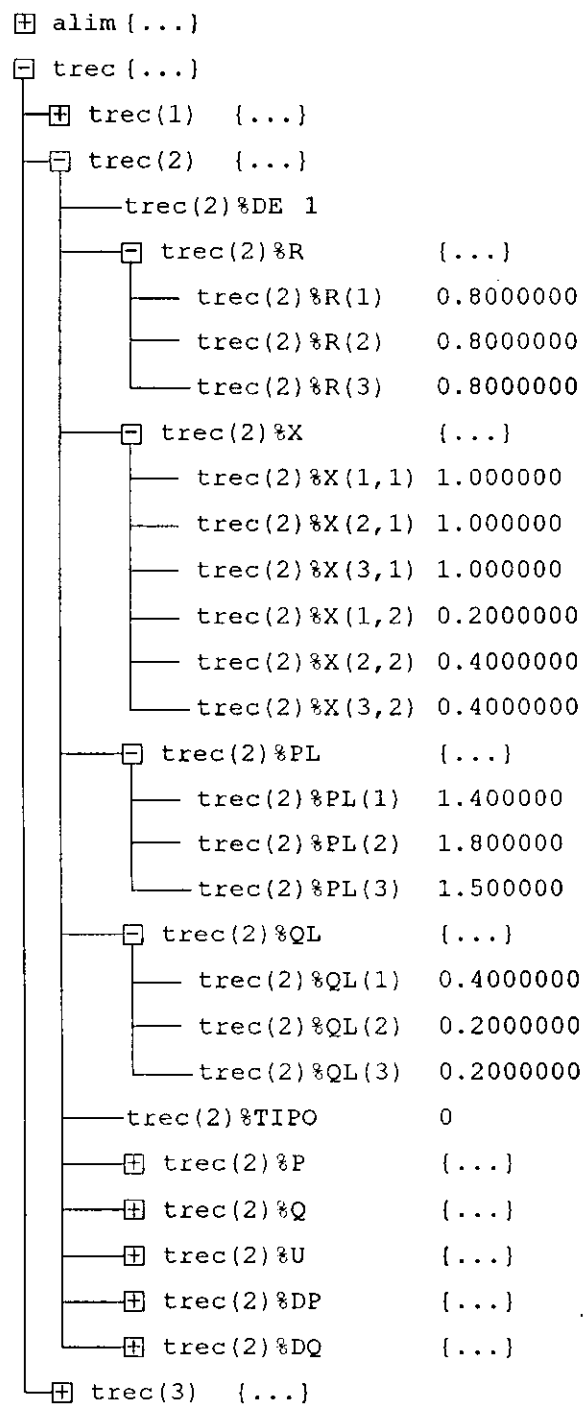


Fig. 4.6 - Estrutura de dados correspondentes ao alimentador do exemplo 1. Detalhe dos dados de entrada do trecho 2.

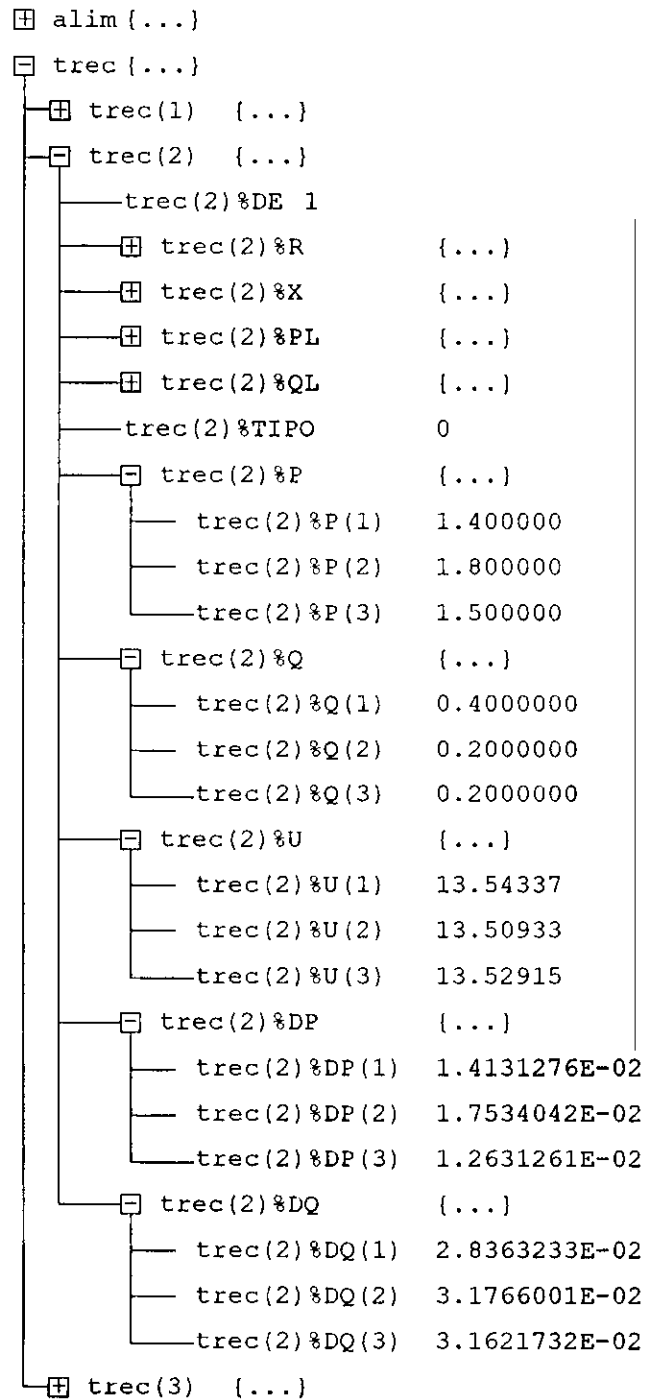


Fig. 4.7 - Estrutura de dados correspondentes ao alimentador do exemplo 1. Detalhe dos dados de saída do trecho 2.

Exemplo 2

Calcular os módulos das tensões de barra e as perdas totais no alimentador de 13,8 kV da fig. 4.4. Agora os trechos (0-1), (1-2), (1-3) são: trifásico, monofásico e bifásico, respectivamente.

Para simulação dos trechos monofásico e bifásico, a resistência nas fases que estariam "ausentes" foi colocada 10^4 vezes maior do que as das fases presentes.

Aplicando-se a rotina implementada a este problema em particular se obtém o seguinte resultado:

| n | ns | vs | tol | kmax | | | |
|--------------------|------|--------|--------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| 3 | 0 | 13.8 | .1E-04 | 10 | | | |
| de | para | r | x | pl | ql | | |
| 0 | 1 | .4 | .5 | .1 | .7 | .3 | |
| | | .4 | .5 | .2 | .8 | .3 | |
| | | .4 | .5 | .2 | .9 | .3 | |
| 1 | 2 | .8 | 1.0 | .2 | 1.4 | .4 | |
| | | 8000.0 | 1.0 | .4 | .0 | .0 | |
| | | 8000.0 | 1.0 | .4 | .0 | .0 | |
| 1 | 3 | .6 | .7 | .2 | .9 | .1 | |
| | | .6 | .7 | .3 | 1.2 | .2 | |
| | | 6000.0 | .7 | .3 | .0 | .0 | |
| de | para | tipo | u | dp | dq | p | q |
| 0 | 1 | 2 | 13.67 | .021 | .029 | 3.0 | .8 |
| | | | 13.71 | .009 | .018 | 2.0 | .5 |
| | | | 13.74 | .002 | .017 | .9 | .3 |
| 1 | 2 | 0 | 13.56 | .009 | .012 | 1.4 | .4 |
| | | | 13.71 | .000 | .002 | .0 | .0 |
| | | | 13.73 | .000 | .005 | .0 | .0 |
| 1 | 3 | 0 | 13.63 | .003 | .005 | .9 | .1 |
| | | | 13.65 | .005 | .006 | 1.2 | .2 |
| | | | 13.74 | .000 | .004 | .0 | .0 |
| totais (MW, Mvar): | | | | .048 | .097 | 5.95 | 1.70 |
| totais (%): | | | | 100. | 100. | .82 | 5.74 |

A solução do problema propriamente dita é apresentada acima em negrito. As perdas ativas são muito baixas (0,82% da potência ativa total entregue na barra da subestação), enquanto as perdas reativas são de (5,74%). O processo iterativo convergiu em apenas duas iterações.

4.8 Numeração das Barras

O modo como as barras são numeradas é muito importante. Zimmerman & Chien (1995) empregam uma numeração baseada na classificação em níveis e na indexação dos subcaminhos (tronco, ramais, laterais). Cada barra é identificada por uma seqüência de três números, em que o primeiro indica o nível do ramal. Os outros são índices de ramal e de barra.

Nesta dissertação, o sistema de numeração é muito mais simples, embora bastante eficiente e geral. Baseia-se no conceito de *nível de barra*, conforme se define a seguir.

Definição 1. O nível da barra inicial de um alimentador (barra da subestação) é zero. O nível de qualquer outra barra é igual ao de sua barra antecedente mais um.

Numa notação matemática simples em que

k = barra qualquer do alimentador;
 k_0 = barra inicial do alimentador
 $de(k)$ = barra antecedente de k ;
 $N(k)$ = nível da barra k ;

a definição 1 se enuncia como:

$$N(k_0) = 0$$

$$N(k) = n \text{ se } k \neq k_0 \text{ e}$$

$$N(de(k)) = n-1$$

O nível de uma barra portanto, é sua ordem em relação à barra inicial do alimentador.

Na fig. 4.8 são indicados os níveis de cada barra.

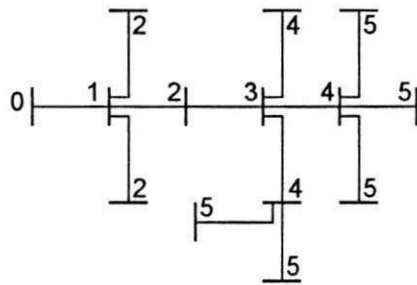


Figura 4.8 – Alimentador radial com níveis das barras indicados.

Definição 2. A *numeração normalizada* de um alimentador de $n+1$ barras é a seqüência $S = \{0, 1, 2, \dots, n-1, n\}$ dos $n+1$ primeiros números naturais com $N(0)=0$ e para quaisquer $i, j \in S$, tais que $i < j$, se

- $N(i) < N(j)$

ou se

- $N(i) = N(j)$ e $tipo(i) \geq tipo(j)$

Numerações normalizadas alternativas do alimentador da fig. 4.8 são vistas na fig. 4.9.

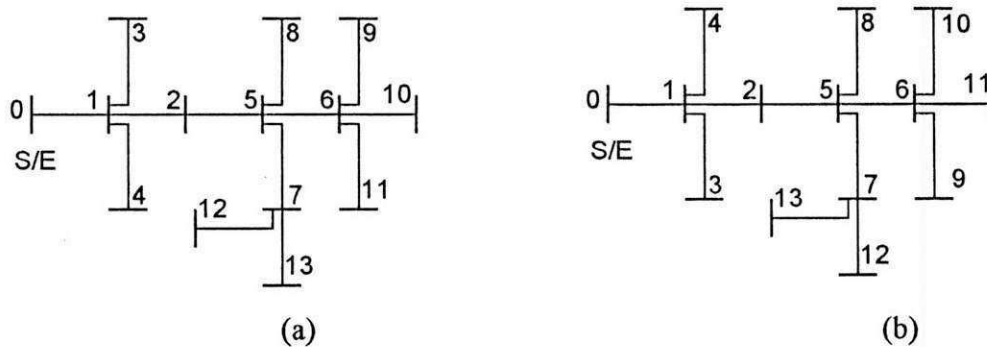


Fig. 4.9 - Numerações padronizadas do alimentador da fig. 4.7.

A numeração normalizada de um alimentador não é única, uma vez que é possível barras distintas serem do mesmo nível e tipo. Essa redundância não tem importância, já que todas as numerações normalizadas têm a seguinte propriedade: se os trechos do alimentador são ordenados, pelas respectivas barras finais, estão necessariamente ordenados pelas barras iniciais. Essa propriedade melhora sobremaneira a eficiência do processo iterativo de cálculo do fluxo de carga pelo método da soma de potência. Os processos recursivos de cálculo das cargas acumuladas e das tensões de barra passam a ser feitos por varreduras únicas e unidirecionais em cada iteração.

4.9 Normalização da numeração de barra

A numeração das barras de um alimentador é arbitrária ou segue critério completamente alheio ao método de cálculo. De fato, as barras podem ser identificadas por códigos alfanuméricos. O procedimento computacional deve incluir uma rotina que faça a renumeração das barras. Ou seja, que associe a cada código de barra original, um novo número, de acordo com o critério da numeração normalizada.

O algoritmo de numeração normalizada é o seguinte:

1. Identifique a barra de nível zero, ou seja, identifique a barra da subestação e a numere com 0.
2. Classifique todas as barras, isto é defina o tipo de cada uma delas.
3. Identifique as barras de nível 1 e numere-as seqüencialmente na ordem decrescente do tipo, que corresponde à ordem decrescente do grau de derivação. Se o tipo e o nível de duas ou mais barras coincidirem (ambos) escolha arbitrariamente a ordem de numerá-las.
4. Identifique as barras de nível 2 pesquisando pela ordem dos novos números de barra e numere –as do modo que foi feito no passo 3.
5. Repita o passo 4 para todos os níveis, até que a numeração normalizada tenha sido estendida a todas as barras do alimentador.

A figura 4.10 mostra a numeração normalizada do alimentador da fig. 4.8 resultante da aplicação do algoritmo acima.

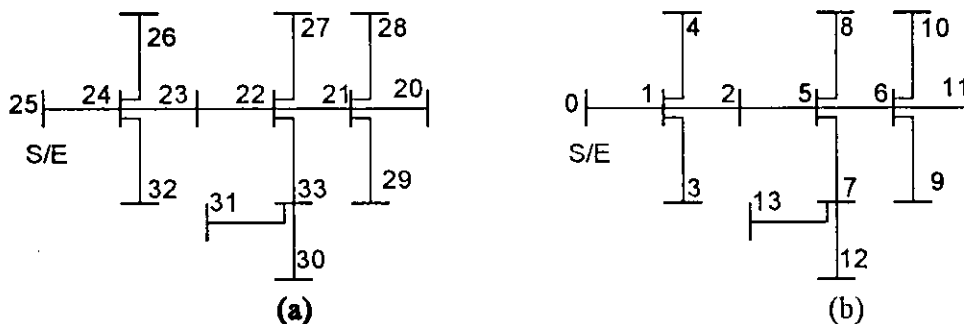


Fig. 4.10 - Numerações do alimentador da fig. 4.8. (a) Original e (b) normalizada.

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através de simulações usando-se o método da soma de potências. Foram analisados sistemas de distribuição com características típicas através de estudos de fluxo de potência trifásico, sem considerar os acoplamentos mútuos entre fases e com os referidos acoplamentos. Realizaram-se vários estudos, com alimentadores reais e outros encontrados na literatura, mas aqui serão apresentados apenas alguns.

5.2 Fluxo monofásico

Apresentam-se a seguir duas aplicações do algoritmo desenvolvido. A primeira trata-se de um alimentador radial direto de nove barras e a segunda de um alimentador radial de quinze barras.

❖ Alimentador radial direto:

Os dados de entrada desse alimentador são apresentados na tabela 5.1 e as suas características, assim como as variáveis de controle do processo iterativo são:

| | |
|--------------------------------|-------------------|
| Tensão nominal | 23.6 kV |
| Fator de potência ¹ | 0.70 |
| Tolerância | 10 ⁻¹⁰ |
| Número de iterações | 04/10 |

Tabela 5.1 – Dados de entrada do alimentador direto.

| Trecho de | Para | Tipo | | Impedância, Ω | | Carga KVA |
|--------------|------|------|------|----------------------|--------|--------------|
| | | De | para | R | X | |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0.1603 | 1.6028 | 141.42 |
| 1 | 2 | 1 | 1 | 1.6028 | 1.6028 | 141.42 |
| 2 | 3 | 1 | 1 | 1.6028 | 1.6028 | 141.42 |
| 3 | 4 | 1 | 1 | 1.6028 | 1.0628 | 141.42 |
| 4 | 5 | 1 | 1 | 1.6028 | 1.0628 | 1004.99 |
| 5 | 6 | 1 | 1 | 1.6028 | 1.0628 | 1004.99 |
| 6 | 7 | 1 | 1 | 1.6028 | 1.0628 | 296.04 |
| 7 | 8 | 1 | 1 | 1.6028 | 1.0628 | 141.42 |
| 8 | 9 | 1 | 0 | 1.6028 | 1.0628 | 1118.03 |

¹Todas as cargas possuem o mesmo fator de potência.

Tabela 5.2 – Resultados da simulação para o alimentador direto.

| Trecho | | Tipo | | Perdas | | Fluxo | |
|--------|------|------|------|--------|---------|---------|---------|
| De | Para | De | para | P(Kw) | Q(kvar) | P(Kw) | Q(kvar) |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 5.30 | 52.99 | 3999.14 | 1479.4 |
| 1 | 2 | 1 | 1 | 49.86 | 49.86 | 3849.28 | 1329.54 |
| 2 | 3 | 1 | 1 | 46.80 | 46.80 | 3702.48 | 1182.73 |
| 3 | 4 | 1 | 1 | 43.84 | 29.07 | 3558.64 | 1053.66 |
| 4 | 5 | 1 | 1 | 40.97 | 27.17 | 3417.67 | 926.50 |
| 5 | 6 | 1 | 1 | 21.33 | 14.14 | 2396.34 | 812.36 |
| 6 | 7 | 1 | 1 | 8.19 | 5.43 | 1388.15 | 706.93 |
| 7 | 8 | 1 | 1 | 5.39 | 3.58 | 1104.30 | 602.85 |
| 8 | 9 | 1 | 0 | 4.30 | 2.85 | 1000.00 | 500.00 |
| | | | | 226.00 | 231.90 | | |

Tabela 5.3 – Tensão em todas as barras do alimentador direto.

| Barra | Tensão | Barra | Tensão |
|-------|--------|-------|--------|
| 0 | 23.58 | 5 | 22.15 |
| 1 | 23.45 | 6 | 21.93 |
| 2 | 23.09 | 7 | 21.79 |
| 3 | 22.75 | 8 | 21.69 |
| 4 | 22.44 | 9 | 21.59 |

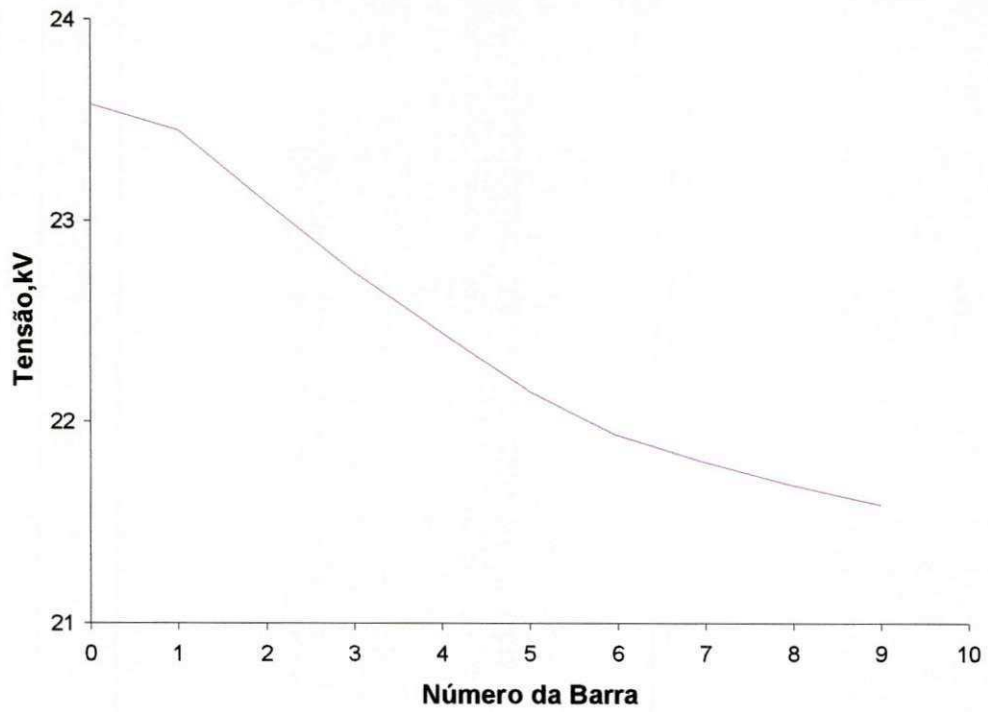


Figura 5.1 – Tensão de barra para o alimentador direto.

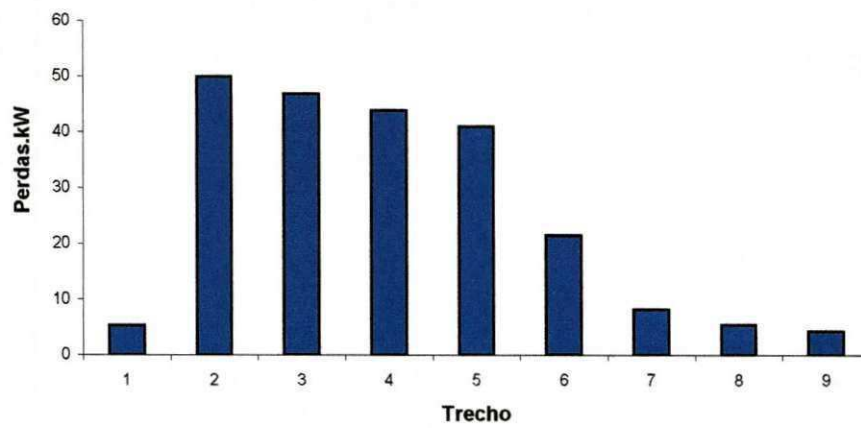


Figura 5.2 – Perdas ativas para o alimentador direto.

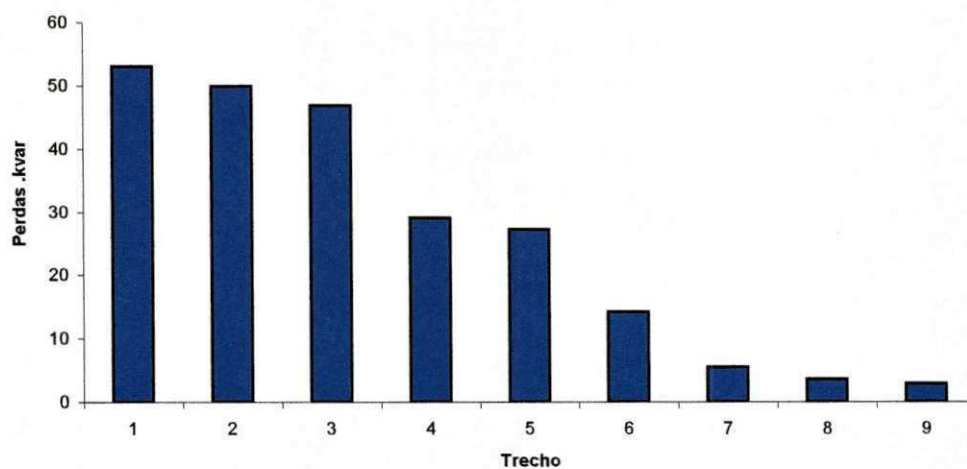


Figura 5.3 – Perdas reativas para o alimentador direto.

Na figura 5.1 observa-se que quanto mais afastada da subestação a barra estiver maior é a queda na tensão, conforme esperado, pois trata-se de um alimentador radial direto.

As perdas de potência de acordo com as figuras 5.2 e 5.3 são maiores para as barras localizadas mais próximas da subestação. Essas perdas são uma função da corrente, da impedância do trecho e do carregamento.

❖ Alimentador radial de quinze barras:

A figura 5.4 apresenta esse alimentador. Os dados de entrada estão na tabela 5.4 e as suas características, assim como as variáveis de controle do processo iterativo são:

| | |
|--------------------------------|------------|
| Tensão nominal | 11.0 kV |
| Fator de potência ¹ | 0.70 |
| Tolerância | 10^{-10} |
| Número de iterações | 5/10 |

¹Todas as cargas possuem o mesmo fator de potência.

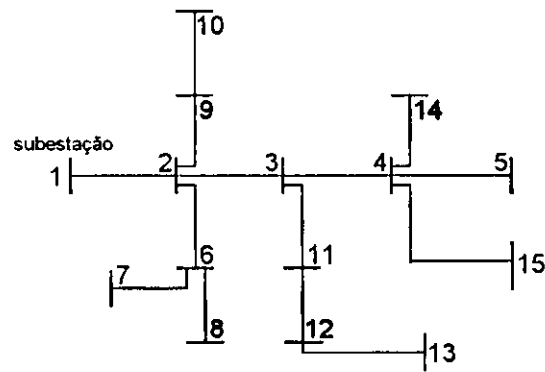


Figura 5.4 Alimentador radial.

Tabela 5.4 – Dados de entrada para o alimentador da figura 5.4.

| De | Trecho Para | Impedância, ohm | | Carga KVA |
|----|----------------|-----------------|-------|--------------|
| | | R | X | |
| 4 | 5 | 1.523 | 1.028 | 63.0 |
| 6 | 7 | 1.088 | 0.734 | 200.0 |
| 2 | 9 | 2.013 | 1.358 | 100.0 |
| 11 | 12 | 2.448 | 1.651 | 100.0 |
| 4 | 14 | 2.231 | 1.505 | 100.0 |
| 3 | 11 | 1.796 | 1.211 | 200.0 |
| 4 | 15 | 1.197 | 0.807 | 200.0 |
| 2 | 6 | 2.557 | 1.725 | 200.0 |
| 9 | 10 | 1.687 | 1.138 | 63.0 |
| 12 | 13 | 2.013 | 1.358 | 63.0 |
| 6 | 8 | 1.251 | 0.844 | 100.0 |
| 3 | 4 | 0.841 | 0.823 | 200.0 |
| 2 | 3 | 1.17 | 1.145 | 100.0 |
| 1 | 2 | 1.353 | 1.323 | 63.0 |

Tabela 5.5 – Resultado das simulações para o alimentador da figura 5.1.

| Trecho | | Tipo | | Perdas | | | Fluxo | |
|--------|------|------|------|--------|---------|--------|---------|--|
| de | Para | de | para | P(kW) | Q(kvar) | P(kW) | Q(kvar) | |
| 4 | 5 | 3 | 0 | .1 | .0 | 44.1 | 45.0 | |
| 6 | 7 | 2 | 0 | .4 | .3 | 140.0 | 142.8 | |
| 2 | 9 | 3 | 1 | .5 | .3 | 114.2 | 116.4 | |
| 11 | 12 | 1 | 1 | .6 | .4 | 114.2 | 116.5 | |
| 4 | 14 | 3 | 0 | .2 | .1 | 70.0 | 71.4 | |
| 3 | 11 | 2 | 1 | 2.2 | 1.5 | 254.8 | 259.7 | |
| 4 | 15 | 3 | 0 | .4 | .3 | 140.0 | 142.8 | |
| 2 | 6 | 3 | 2 | 5.8 | 3.9 | 350.5 | 357.4 | |
| 9 | 10 | 1 | 0 | .1 | .0 | 44.1 | 45.0 | |
| 12 | 13 | 1 | 0 | .1 | .0 | 44.1 | 45.0 | |
| 6 | 8 | 2 | 0 | .1 | .1 | 70.0 | 71.4 | |
| 3 | 4 | 2 | 3 | 2.4 | 2.4 | 394.8 | 402.5 | |
| 2 | 3 | 3 | 2 | 11.3 | 11.0 | 724.2 | 737.5 | |
| 1 | 2 | 0 | 3 | 37.7 | 36.9 | 1250.5 | 1271.6 | |
| | | | | 61.8 | 57.3 | | | |

Tabela 5.6 – Tensão em todas as barras para o alimentador da figura 5.1.

| Barra | Tensão | Barra | Tensão |
|-------|--------|-------|--------|
| 1 | 11.000 | 9 | 10.648 |
| 2 | 10.684 | 10 | 10.636 |
| 3 | 10.523 | 11 | 10.449 |
| 4 | 10.460 | 12 | 10.404 |
| 5 | 10.449 | 13 | 10.390 |
| 6 | 10.541 | 14 | 10.435 |
| 7 | 10.516 | 15 | 10.433 |
| 8 | 10.526 | | |

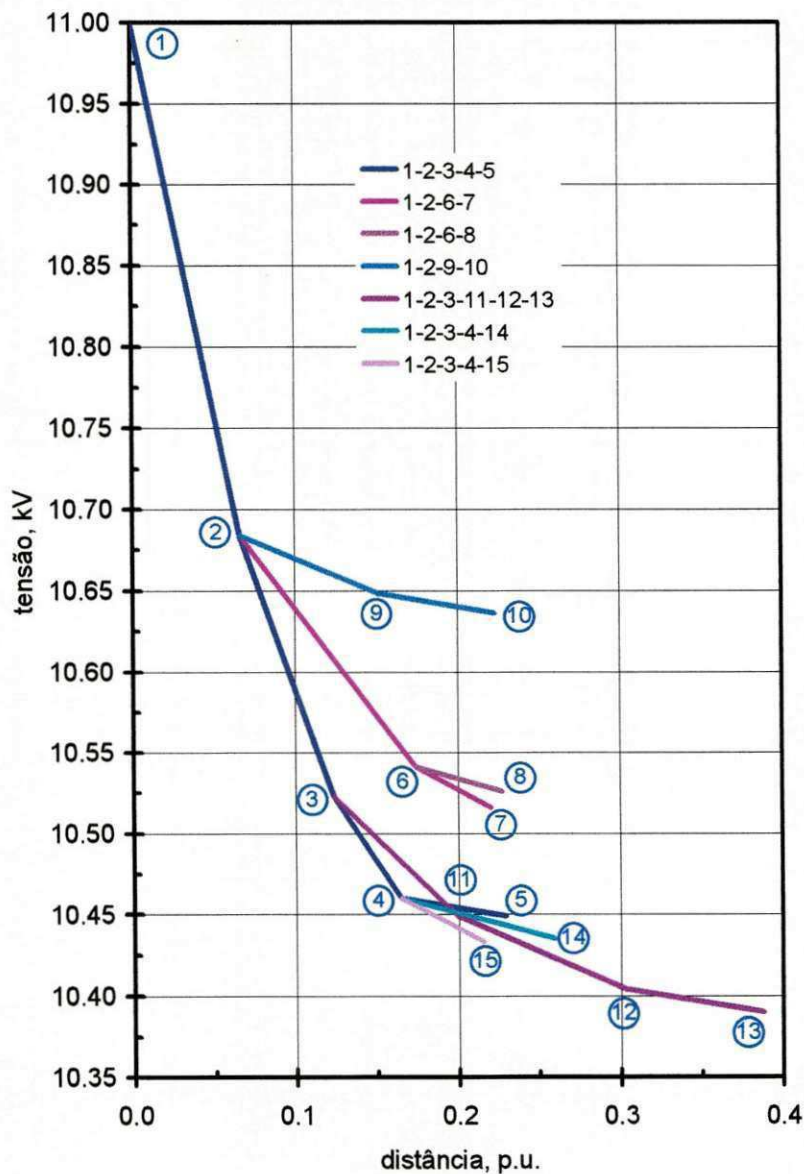


Figura 5.5 – Perfil de tensão para o alimentador da figura 5.4.

Na figura 5.5, 1 p.u. corresponde ao comprimento total do alimentador, ou seja, a soma dos comprimentos de todos seus trechos. Os números com círculos são as barras. O ponto mais crítico do alimentador é a barra 13, fim do ramal que começa na barra de derivação 3. Essa barra sofre influência diretamente das suas antecedentes, que apresentam um carregamento duas vezes maior. Por isso apresenta uma tensão mais baixa que a das anteriores, já que elas serviram de “fonte” para barra em questão.

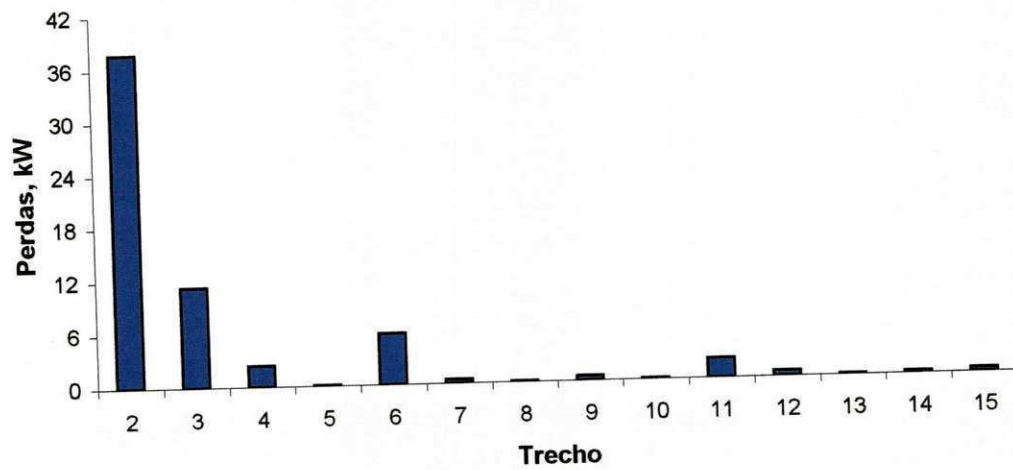


Figura 5.6 – Perdas ativas por trecho no alimentador da figura 5.4

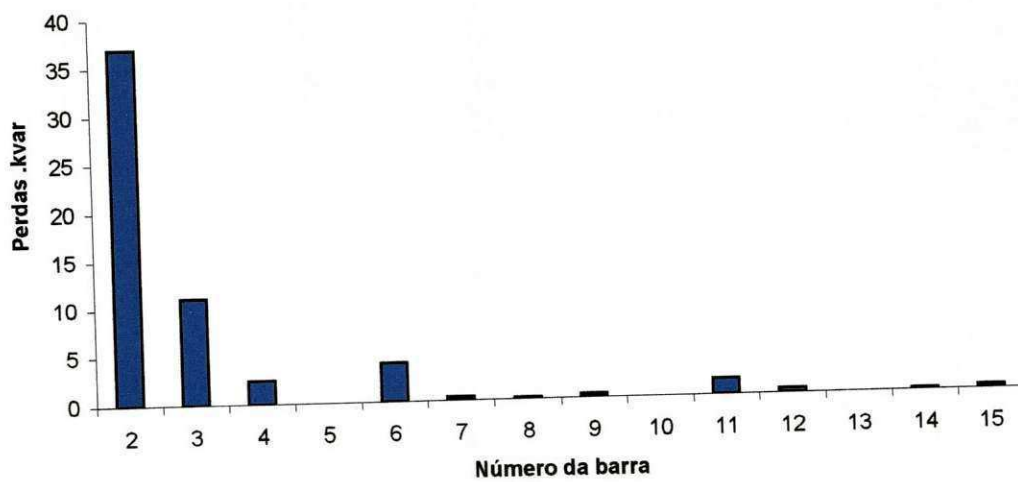


Figura 5.7 – Perdas reativas por trecho no alimentador da figura 5.4

5.3 Fluxo trifásico

Apresentam-se a seguir os resultados da aplicação do algoritmo implementado ao alimentador PJA – 04, pertencente à Companhia Energética de Alagoas (CEAL). Esse alimentador é radial trifásico de 60 barras, conforme esquematizado na figura 5.8. O comprimento, tipo de cabo de cada trecho e a carga instalada em cada barra são apresentadas na tabela 5.7. Na figura 5.10 é mostrado o perfil de tensão completo para esse alimentador.

Foram feitos estudos com o sistema equilibrado, desequilibrado considerando os acoplamentos e desequilibrado desconsiderando os acoplamentos.

Tabela 5.7 - Dados do alimentador PJA - 04.

| trecho | comprimento (km) | cabo | potência instalada (kVA) |
|---------|------------------|-----------|--------------------------|
| 10 20 | 0.43 | CA# 336.4 | 112.5 |
| 20 30 | 0.13 | CA# 336.4 | -- |
| 30 31 | 0.21 | CU# 4 | 150. |
| 30 40 | 0.11 | CA# 336.4 | 45. |
| 40 50 | 0.25 | CA# 336.4 | 75. |
| 50 51 | 0.33 | CA# 336.4 | -- |
| 51 52 | 0.12 | CAA# 2 | 75. |
| 50 60 | 0.04 | CA# 336.4 | 150. |
| 60 70 | 0.08 | CA# 336.4 | 75. |
| 70 80 | 0.06 | CA# 336.4 | -- |
| 80 81 | 0.24 | CA# 1/0 | 150. |
| 80 90 | 0.37 | CA# 336.4 | 45. |
| 90 100 | 0.06 | CA# 336.4 | 500. |
| 100 110 | 0.47 | CA# 336.4 | 187.5 |
| 110 120 | 0.10 | CA# 336.4 | 75. |
| 120 130 | 0.04 | CA# 336.4 | 150. |
| 130 140 | 0.13 | CA# 336.4 | 150. |
| 140 150 | 0.04 | CA# 336.4 | -- |
| 150 151 | 0.04 | CA# 4 | 112.5 |
| 151 152 | 0.03 | CA# 4 | 112.5 |
| 152 153 | 0.02 | CA# 4 | 150. |
| 153 154 | 0.02 | CA# 4 | 75. |
| 150 160 | 0.12 | CA# 336.4 | 112.5 |
| 160 170 | 0.08 | CA# 336.4 | 225. |
| 170 180 | 0.08 | CA# 336.4 | 150. |
| 180 190 | 0.09 | CU# 2/0 | 75. |
| 190 200 | 0.07 | CU# 2/0 | 75. |
| 200 210 | 0.04 | CU# 6 | 75. |
| 210 220 | 0.04 | CU# 6 | 75. |
| 220 230 | 0.09 | CU# 6 | 120. |
| 230 240 | 0.04 | CU# 6 | 225. |
| 240 250 | 0.02 | CU# 6 | 75. |
| 250 260 | 0.15 | CU# 6 | 300. |
| 260 270 | 0.04 | CU# 6 | 75. |
| 270 280 | 0.13 | CU# 6 | 112.5 |
| 130 290 | 0.20 | CA# 336.4 | 112.5 |
| 290 300 | 0.04 | CU# 2/0 | 112.5 |
| 300 310 | 0.08 | CU# 2/0 | 150. |
| 310 315 | 0.04 | CU# 2/0 | 75. |
| 315 320 | 0.04 | CU# 2/0 | 112.5 |
| 320 330 | 0.45 | CU# 2/0 | 1300. |
| 330 335 | 0.01 | CU# 2/0 | 500. |
| 330 340 | 0.63 | CU# 2/0 | -- |
| 340 350 | 0.10 | CU# 2/0 | 2000. |
| 340 360 | 0.71 | CU# 2/0 | 300. |
| 70 370 | 0.16 | CA# 336.4 | 112.5 |
| 370 380 | 0.04 | CA# 336.4 | 112.5 |
| 380 390 | 0.41 | CA# 336.4 | 262.5 |
| 390 400 | 0.15 | CA# 336.4 | 75. |
| 400 410 | 0.13 | CA# 336.4 | 75. |
| 390 420 | 0.26 | CA# 336.4 | 75. |
| 420 430 | 0.04 | CA# 336.4 | 150. |
| 430 440 | 0.16 | CA# 336.4 | 1750. |
| 440 450 | 0.11 | CA# 336.4 | 112.5 |
| 450 460 | 0.11 | CA# 336.4 | 45. |
| 460 470 | 0.04 | CA# 336.4 | 150. |
| 440 441 | 0.11 | CU# 6 | 150. |
| 441 442 | 0.11 | CU# 6 | 202.5 |
| 442 443 | 0.13 | CU# 6 | 165. |

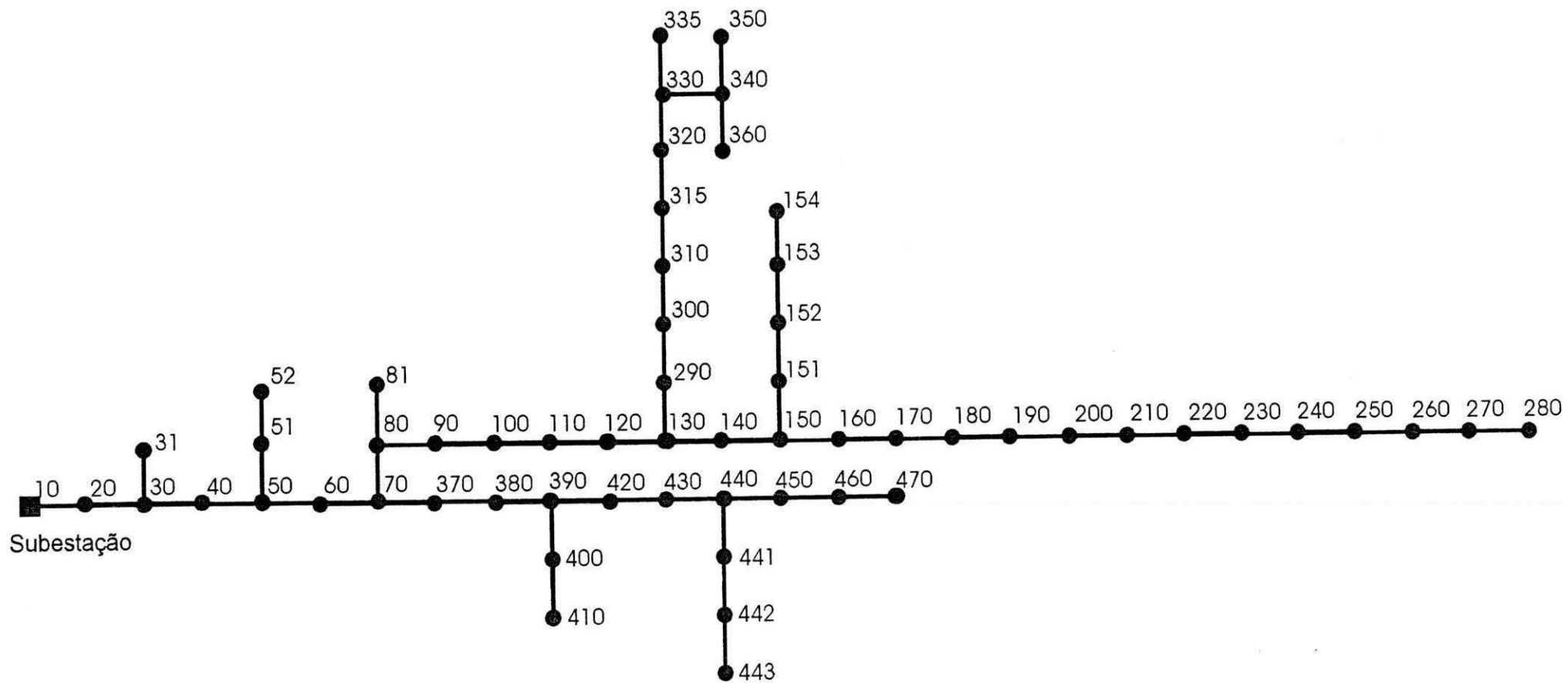


Figura 5.8 - Alimentador PJA-04 da Subestação de Pajuçara.

Perfil de Tensão

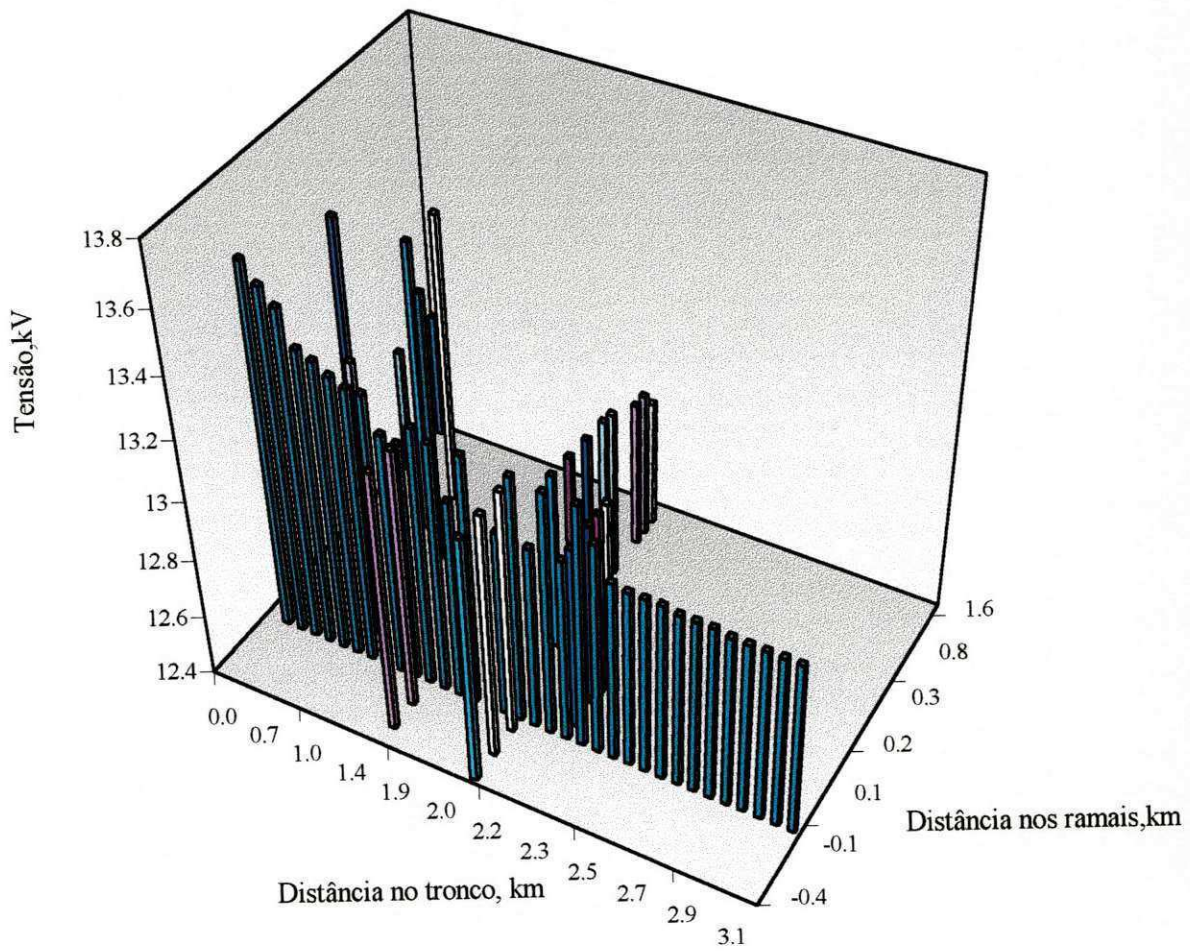


Figura 5.9 – Perfil de tensão completo para o alimentador PJA – 04.

❖ Os dados de entrada para o programa são:

R – resistência (própria e mútua) por fase do trecho em (ohm).

X - reatância indutiva (própria e mútua) por fase do trecho em (ohm).

ql - carga reativa do trecho (instalada na barra final) (kvar).

pl - carga ativa do trecho (instalada na barra final) (kW).

V – tensão nominal em (kV).

n – número de trechos.

ns – número da barra da subestação.

Para o cálculo da indutância podem ser empregados dois métodos:

- 1) Se os dados de entrada são tipo de cabo, distância entre os condutores das fases e distância entre fase , a reatância indutiva pode ser calculada pela equação abaixo. Esse método é encontrado em Stevenson Jr. (1978).

$$XL = 4\pi \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{r'} \text{ henrys/metro}$$

Sendo:

D = distância equivalente entre as fases.

$r' = 0.788r$, r é o raio do cabo

r' = é o raio médio geométrico.

- 2) Se os dados são: tipo de cabo e os valores das impedâncias de sequência positiva, negativa e zero dos condutores, a equação para determinar a matriz impedância de fase dá os valores de reatância e resistência para cada fase.

Definindo-se a matriz de impedância de fase,

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}$$

e a matriz impedância de sequência,

$$\mathbf{Z}_{012} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_1 \end{bmatrix}$$

A equação matricial :

$$\mathbf{Z}_{abc} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{Z}_{012} \cdot \mathbf{T}^{-1}, \text{ determina a matriz impedância de fase considerando os}$$

acoplamentos.

Sendo:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

❖ Sistema equilibrado

As figuras 5.11 e 5.12 mostram os perfis de tensão para as três fases em dois trechos do alimentador, na figura 5.11 o trecho de 40-420 e na figura 5.12 de 80-360. Esses trechos foram escolhidos por apresentarem maior variação na tensão.

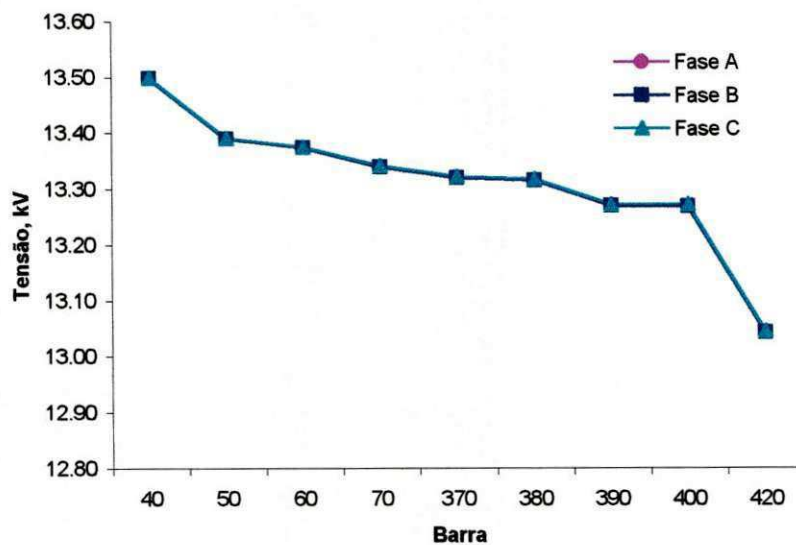


Figura 5.10 - Tensão de barra do alimentador da figura 5.8 no subcaminho de 40-420.

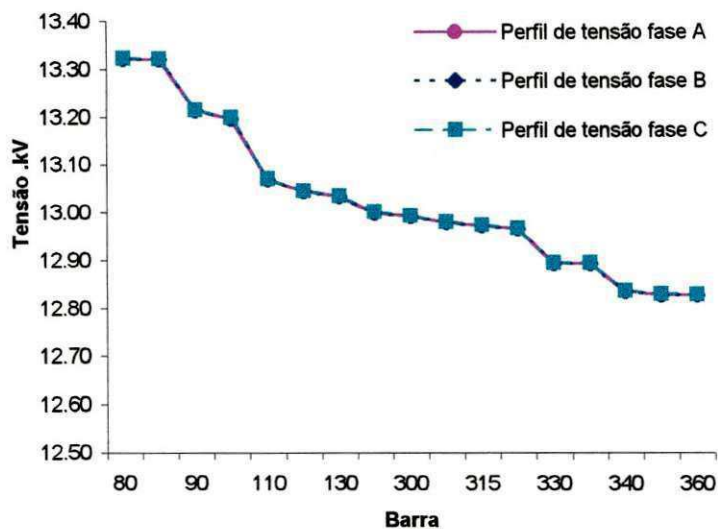


Figura 5.11 – Tensão de barra do alimentador da figura 5.8 no subcaminho de 80-360.

As figuras 5.12 e 5.13 mostram as perdas ativas e reativas, respectivamente, para as três fases em dois subcaminhos do alimentador.

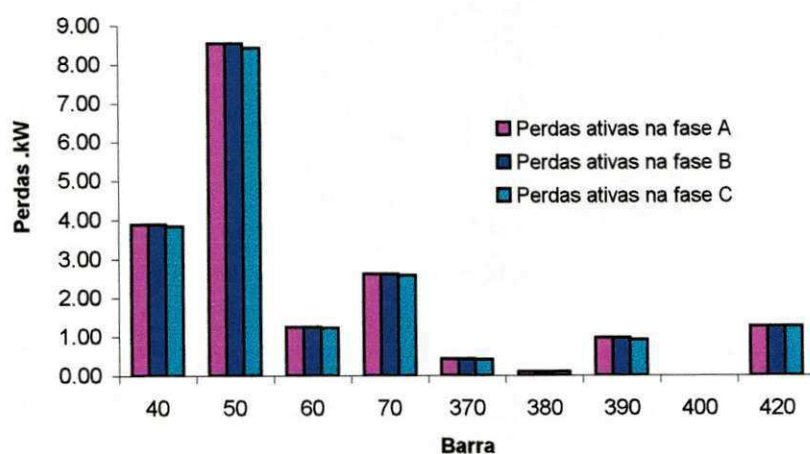


Figura 5.12 – Perdas ativas por trecho no alimentador da figura 5.8 no subcaminho de 40-420.

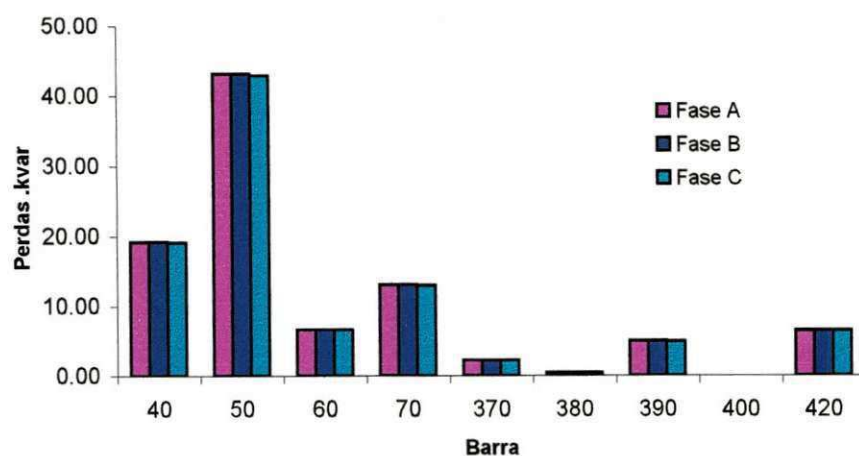


Figura 5.13 – Perdas reativas por trecho no alimentador da figura 5.8 no subcaminho de 40-420.

Para o caso das cargas serem balanceadas e os acoplamentos mútuos entre fases serem considerados, o estudo do sistema equilibrado foi feito apenas para testar a rotina. Como pode-se observar nas figuras de 5.10 a 5.15, os resultados obtidos validam a implementação realizada.

❖ Sistema desequilibrado considerando os acoplamentos

As figuras 5.14 e 5.15 mostram os perfis de tensão para as três fases em dois trechos do alimentador, na figura 5.14 o trecho de 40 -420 e na figura 5.15 de 80 - 360. Esses trechos foram escolhidos por apresentarem maior variação na tensão.

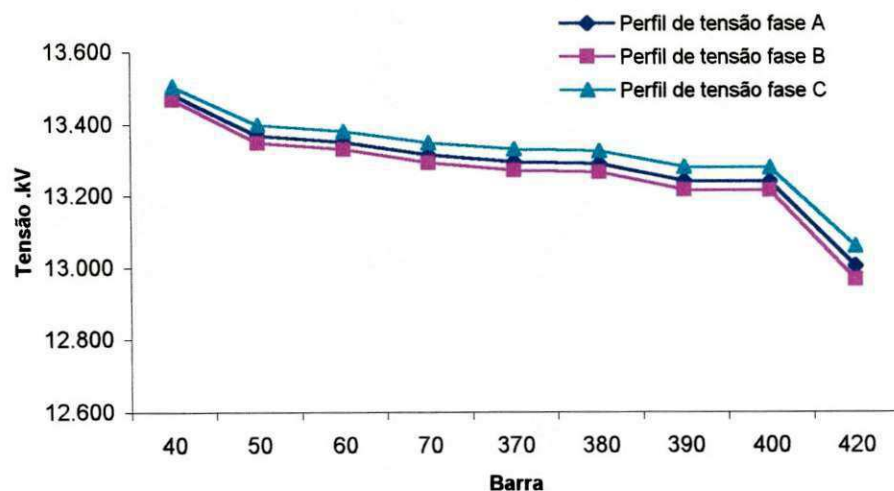


Figura 5.14 – Tensão de barra do alimentador da figura 5.8 no subcaminho de 40-420.

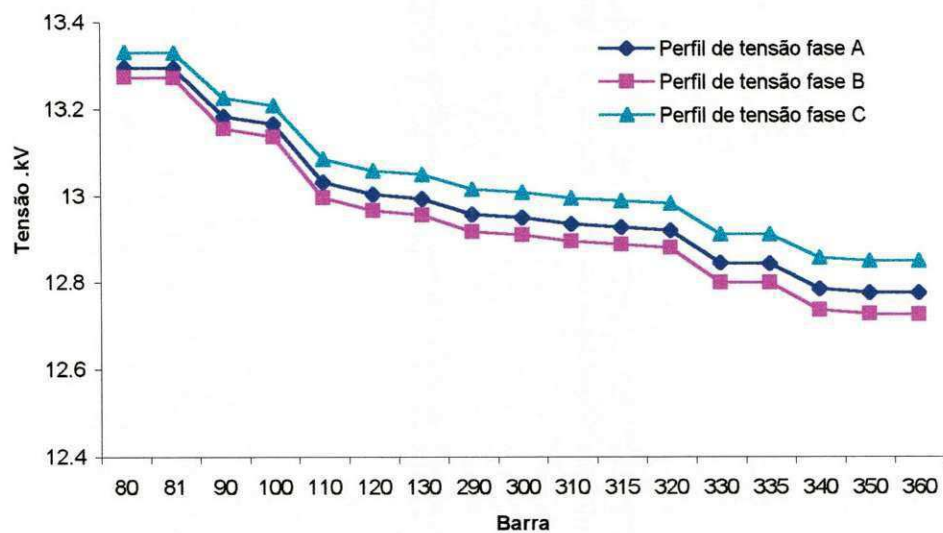


Figura 5.15 – Tensão de barra do alimentador da figura 5.8 no subcaminho de 80-360.

Os percentuais de desequilíbrio foram de 10% na fase A, 30% na fase B e 40% na C. As figuras 5.14 e 5.15 mostram os as tensões de barra para esse caso. A consideração do acoplamento mútuo entre fases fornece resultados mais precisos, já que o sistema é representado de forma real sem simplificações.

❖ Sistema desequilibrado desconsiderando os acoplamentos

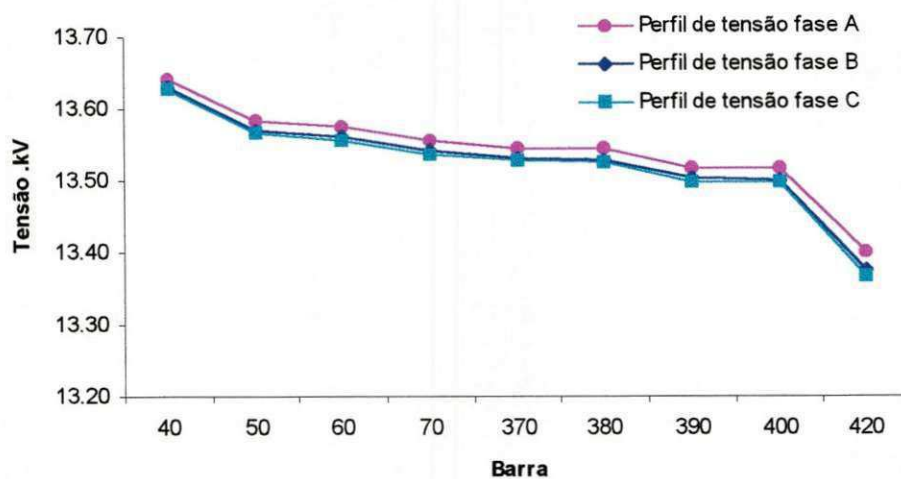


Figura 5.16 – Tensão de barra do alimentador da figura 5.8 no subcaminho de 40-420.

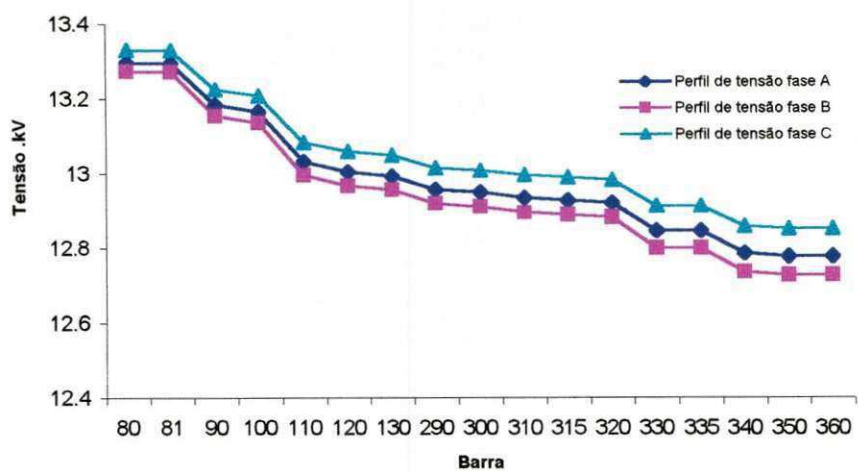


Figura 5.17 – Tensão de barra do alimentador da figura 5.8 no subcaminho de 80-360.

Nas figuras 5.18 e 5.19 são mostradas as comparações entre as perdas ativas e reativas para o caso com mútua e sem mútuas.

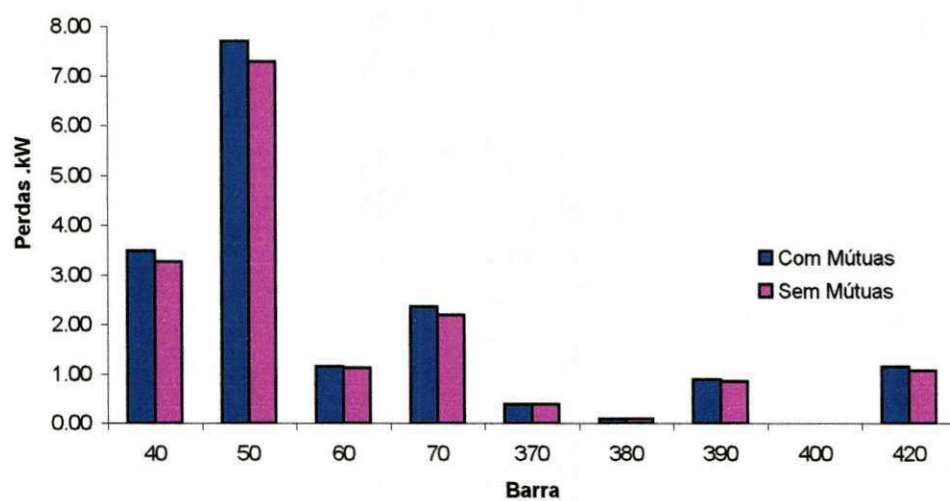


Figura 5.18 – Comparação entre as potências ativas para o casos com e sem reatâncias mútuas.

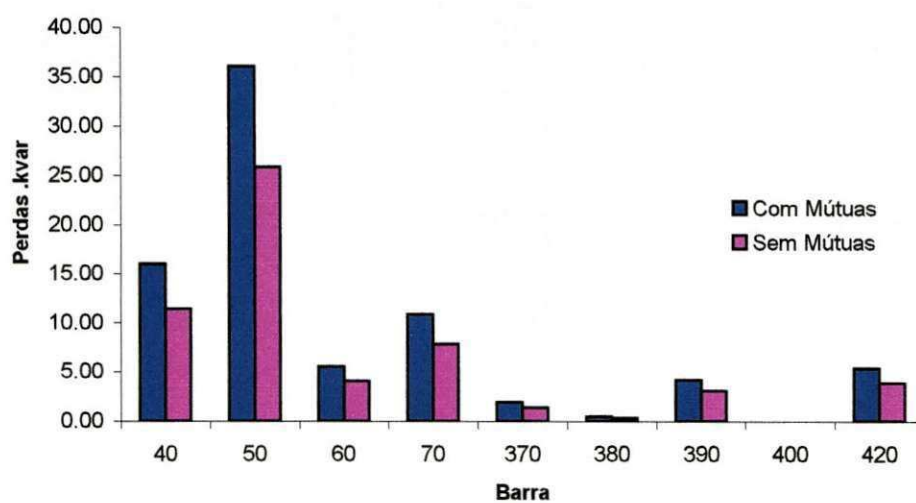


Figura 5.19 - Comparação entre as potências reativas para o casos com e sem reatâncias mútuas.

Comparando-se as figuras 5.14 e 5.15 com as figuras 5.16 e 5.17, respectivamente observa-se que não considerar as indutâncias mútuas contribui para ampliar a diferença entre os resultados. O gráfico da tensão na figura 5.16 aproxima-se mais de um sistema equilibrado, o mesmo pode ser constatado para a figura 5.17.

Nas figuras 5.18 e 5.19 são comparadas as perdas de potência ativa e reativa para o caso desequilibrado com e sem mútuas. Sem considerar as mútuas as perdas encontradas foram menores, pode-se assim observar que a consideração dos acoplamentos entre fases forneceram resultados mais seguros que são cada vez mais importantes quando a complexidade do sistema aumenta e uma análise de fluxo de carga precisa é necessária.

❖ Desempenho computacional

Na figura 5.20, observa-se a quantidade de iterações que foram necessárias para obtenção da convergência do processo, em cada caso de estudo de fluxo de carga trifásico realizado para o sistema da figura 5.8.

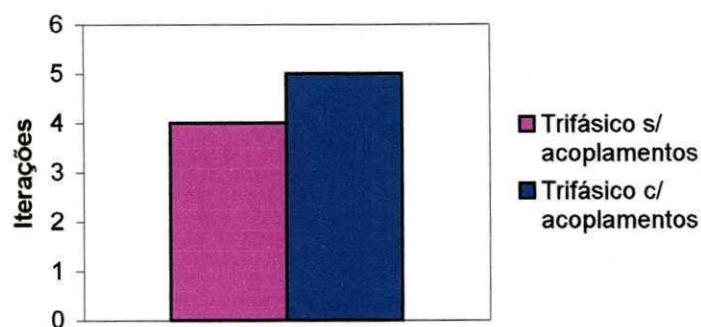


Figura 5.20 – Número de iterações realizadas pelo programa.

O tempo de processamento associado a cada caso foi medido em centésimos de segundo. Nos resultados apresentados na figura 5.23, estão incluídos os intervalos de

tempo correspondentes às operações de leitura do arquivo de dados de entrada e de gravação do relatório no arquivo de saída.

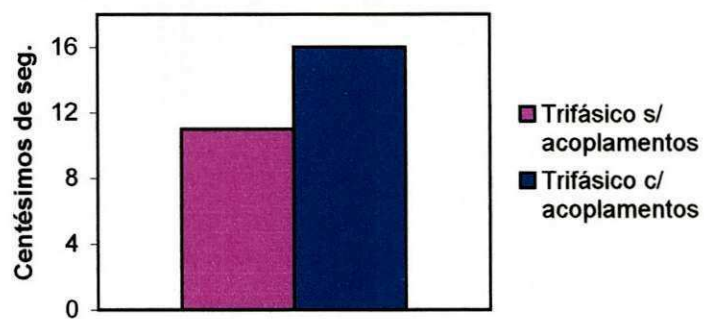


Figura 5.21 – Tempo de processamento do programa.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

As equações fundamentais do método da Soma de Potência foram generalizadas, através da implementação de estruturas de dados e operações adequadas, procurando manter a validade e a coerência quando aplicadas a alimentadores trifásicos com acoplamentos de fase. Os acoplamentos mútuos e os desbalanceamentos existentes podem ser tratados de forma suficientemente rigorosa, sem, entretanto, gerar equações de difícil manipulação.

O estudo de fluxo de potência, com o método e as técnicas de programação orientada a objeto em conjunto com as facilidades da programação vetorial do Fortran 90 adotadas, além da grande eficiência computacional obtida, também tem como grande vantagem não envolver elevados requisitos de memória de computador ou processamentos numéricos muito extensos.

O programa foi empregado com sucesso na análise de vários alimentadores. Para não ser repetitiva foram reportados apenas os resultados relativos ao alimentador PJA - 04 do sistema CEAL.

A eficiência computacional da rotina se mostra muito boa, mesmo nos casos em que as cargas apresentam grande desequilíbrio de fase.

Dispondo-se de resultados de fluxo de potência determinados para cada fase de uma rede elétrica com menos suposições simplificadoras, os gerentes dos sistemas de distribuição estão mais bem informados sobre suas condições operativas e, por conseguinte, têm bases mais realistas para a tomada de decisões sobre, por exemplo, como tratar de problemas de queda de tensões e compensação de reativos.

Considerando-se a robustez, a relativa simplicidade de implementação computacional, quando comparada a outros métodos, além dos menores requisitos de memória e a rapidez de processamento inerentes ao estudo de fluxo de potência em redes radiais, através do método da soma de potência, cogita-se a possibilidade de aproveitamento do respectivo algoritmo básico como parte integrante de ferramentas mais abrangentes para a análise de redes.

O produto desta dissertação pode ser de grande utilidade em diferentes trabalhos futuros:

1. Compensação reativa ótima;
2. Análise de contingência;
3. Reconfiguração de redes;
4. Análise de faltas;
5. Análise de estabilidade de tensão;

Para todas essas aplicações a rotina está pronta. Aqueles que se interessarem em melhorá-la pode desenvolver uma interface gráfica amigável. Contribuição melhor, entretanto, será adaptar a rotina para que possa se aplicar a alimentadores com regulador de tensão, ou para aceitar modelos de carga dependente da tensão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARRANJO, H.G., TORRES, G.L. e SILVA, A.P.A. " Algoritmo Genético para Previsão Espacial de Carga", V SEDOPE, Recife-PE, 19-24 Maio, 1996.
- BARBOSA, A.S. "Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição: Aplicações Práticas". Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, 1995.
- BROADWATER, R. P., CHANDRASEKARAN A., HUDDLESTON, C.T. and KHAN, A.H. "Power flow analysis of unbalanced multiphase radial distribution systems". Electric Power Systems Research, vol. 14, pp. 23-33, 1988.
- CHEN, A.C.M. "Automated Power Distribution". IEEE Spectrum, pp. 55-60, April 1982.
- CHEN, T.H., *et al.* "Distribution system power flow analysis – A rigid approach". IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, pp. 1146-1152.
- CHENG, C.S. e SHIRMOHANNADI, D. "A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis". IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, pp. 1146-1152.
- DAS, D., KOTHARI, D.P. e KALAM, A. "Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks". Electrical Power & Energy Systems, vol. 17, N.º 5, pp. 335-346, 1995.
- DECMANN, S. *et al.* "Numerical testing of power system load flow equivalents". ELECTRICAL SYSTEMS DIVISION, " Distribution Automation". In R&D status Report, EPRI J., pp. 43-45, May 1983.

- GOSWAMI, S.K. e BASU, S. K. "Direct Solution of distribution networks". IEEE Proc. C. vol. 188, N.º 1, pp. 78-88, 1991.
- JASMON, G.B. e LEE, L H C C "Stability of a load flow techniques for distribution system voltage stability analysis". IEE Proc. C., vol. 138, N.º 6, 1991.
- KATO, K., NAGASAKA, H., OKIMOTO, A ., KUNIEDA, T. e NAKAMURA, T. "Distribution automation systems for high-quality power-supply". IEEE Transactions on Power Delivery., 6:(3), pp.1196-1204, July, 1991.
- KERSTING, W.H. e MENDIVE, D.L. "An application of ladder network theory to the solution of three-phase radial load flow problems". IEEE Winter power meeting, New York, January, 1976.
- LUO, G.X., SEMLYEN, A. "Efficient load flow for large weakly meshed networks", IEEE Transactions on Power Systems, 1990, pp. 1309-1316.
- MINAKAWA, T., ICHIKAWA, Y., KUNUGI, M., SHIMADA, K., WADA, N. e UTSUNOMIYA, M. " Development and Implementation of a Power System Fault Diagnosis Expert System". IEEE Trans. on Power System. Vol. 10, N.º 2, pp. 932-939, May, 1995.
- RAJAGOPALAN, S. "A new computacional algorithm for load flow study of radial distribution systems. Computer and Electr. Eng., vol. 5, pp. 225-231, Pergamon Press, 1978.
- RAJICIC, D. e BOSE, A . "A modification to the fast decoupled power flow for Newtons with high R/X rations". IEEE Transactions on Power Apparatus and systems, vol. PASS-97, pp. 1665-1671, Sep/Oct., 1978.
- REDMON, J. R. e C. H. GENTZ "Effect of Distribution Automation and Control on Future System Configuration". IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-100, N.º 4, pp. 1923-1931, April 1981.
- RENATO, C.G. "New method for the analysis of distribution networks". IEEE Transactions PWRD., vol. 5, N.º 1, pp. 391-396, 1990.
- RIBEIRO, D.L. " Fluxo de Carga em Sistemas de Transmissão e Distribuição: Proposta

de Unificação pela Análise de Malha". Tese de Doutorado, UFPB, Campina Grande, Setembro, 1996.

RIBEIRO, G.F., SILVA, V.N.A .L. e LINDEN, R. "Aplicação da Rede "Neural-GAS" em Previsão de Carga Horária". III CONGRESSO BRASILEIRO DE REDES NEURAI, JULHO, 1997.

RUDNICK, H. and MUNOZ,M. "Three phase load flow analysis in radial power systems". I SIDEE, 1990.

SCHAFFER, G. "Distribution-System Control and Automation". International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 16:(3), pp. 197-205, June, 1994.

SHIRMOHAMMADI, D., HONG, H.W., SEMLYEN, A. e LUO, G. X. "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks". IEEE Transactions, vol. PWRS-3, pp. 753-762, 1988.

_____ *et al.* "A compensation based power flow method for weakly meshed distribution and transmittion network". PCI CONFERENCE, 1987.

SOUZA, B.A. Distribuição de Energia Elétrica, CCT/UFPB-REENGE/PAPE, Campina Grande, 1997.

STEVENSON Jr., W.D., "Elementos de Análises de Sistemas de Potência", 2ª edição, McGraw-Hill, São Paulo, 1978.

TRAJANO Jr., W. " Fluxo de Potência Trifásico Radial para Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica", Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, 1994.

ZIMMERMAN, R., CHIANG,H.D.,"Fast decoupled power flow unbalanced radial distribution systems". IEEE Transactions on Power Systems, 1995, pp. 2045-2052.

WU, F.F., "Theoretical study of the convergence of the fast decoupled load flow".

IEEE Transactions on Power Apparatus and systems, vol. PAS-96,pp. 268-275,

Jan./FEB. 1977.

ANEXOS

As tabelas apresentadas a seguir são referentes aos dados de entrada e aos resultados das simulações, para o alimentador PJA – 04 que está representado na figura 5.8.

Tabela A1 - Dados de entrada do alimentador PJA - 04

| n | ns | Vs,kV | tol | | | iterações | |
|-----|------|-------|----------|-------|-------|-----------|----------|
| 59 | 10 | 13.8 | 1.00E-05 | | | 05/10. | |
| de | para | rp | rm | xp | xm | pl(kw) | ql(kvar) |
| 10 | 20 | 0.108 | 0.026 | 0.383 | 0.213 | 30.375 | 21.99 |
| | | 0.108 | 0.026 | 0.383 | 0.213 | 30.375 | 21.99 |
| | | 0.108 | 0.026 | 0.383 | 0.213 | 30.375 | 21.99 |
| 20 | 30 | 0.033 | 0.008 | 0.116 | 0.065 | 0 | 0 |
| | | 0.033 | 0.008 | 0.116 | 0.065 | 0 | 0 |
| | | 0.033 | 0.008 | 0.116 | 0.065 | 0 | 0 |
| 30 | 31 | 0.209 | 0.012 | 0.205 | 0.102 | 40.5 | 29.32 |
| | | 0.209 | 0.012 | 0.205 | 0.102 | 40.5 | 29.32 |
| | | 0.209 | 0.012 | 0.205 | 0.102 | 40.5 | 29.32 |
| 30 | 40 | 0.028 | 0.007 | 0.098 | 0.055 | 12.15 | 8.8 |
| | | 0.028 | 0.007 | 0.098 | 0.055 | 12.15 | 8.8 |
| | | 0.028 | 0.007 | 0.098 | 0.055 | 12.15 | 8.8 |
| 40 | 50 | 0.063 | 0.015 | 0.223 | 0.124 | 20.25 | 14.66 |
| | | 0.063 | 0.015 | 0.223 | 0.124 | 20.25 | 14.66 |
| | | 0.063 | 0.015 | 0.223 | 0.124 | 20.25 | 14.66 |
| 50 | 51 | 0.083 | 0.019 | 0.294 | 0.164 | 0 | 0 |
| | | 0.083 | 0.019 | 0.294 | 0.164 | 0 | 0 |
| | | 0.083 | 0.019 | 0.294 | 0.164 | 0 | 0 |
| 50 | 60 | 0.01 | 0.002 | 0.036 | 0.019 | 40.5 | 29.32 |
| | | 0.01 | 0.002 | 0.036 | 0.019 | 40.5 | 29.32 |
| | | 0.01 | 0.002 | 0.036 | 0.019 | 40.5 | 29.32 |
| 51 | 52 | 0.13 | 0.007 | 0.119 | 0.059 | 20.25 | 14.66 |
| | | 0.13 | 0.007 | 0.119 | 0.059 | 20.25 | 14.66 |
| | | 0.13 | 0.007 | 0.119 | 0.059 | 20.25 | 14.66 |
| 60 | 70 | 0.02 | 0.005 | 0.071 | 0.039 | 20.25 | 14.66 |
| | | 0.02 | 0.005 | 0.071 | 0.039 | 20.25 | 14.66 |
| | | 0.02 | 0.005 | 0.071 | 0.039 | 20.25 | 14.66 |
| 70 | 80 | 0.015 | 0.004 | 0.053 | 0.029 | 0 | 0 |
| | | 0.015 | 0.004 | 0.053 | 0.029 | 0 | 0 |
| | | 0.015 | 0.004 | 0.053 | 0.029 | 0 | 0 |
| 70 | 370 | 0.04 | 0.009 | 0.142 | 0.079 | 30.375 | 21.99 |
| | | 0.04 | 0.009 | 0.142 | 0.079 | 30.375 | 21.99 |
| | | 0.04 | 0.009 | 0.142 | 0.079 | 30.375 | 21.99 |
| 80 | 81 | 0.159 | 0.014 | 0.225 | 0.119 | 40.5 | 29.32 |
| | | 0.159 | 0.014 | 0.225 | 0.119 | 40.5 | 29.32 |
| | | 0.159 | 0.014 | 0.225 | 0.119 | 40.5 | 29.32 |
| 80 | 90 | 0.092 | 0.022 | 0.329 | 0.184 | 12.15 | 8.8 |
| | | 0.092 | 0.022 | 0.329 | 0.184 | 12.15 | 8.8 |
| | | 0.092 | 0.022 | 0.329 | 0.184 | 12.15 | 8.8 |
| 370 | 380 | 0.01 | 0.002 | 0.035 | 0.019 | 30.375 | 21.99 |
| | | 0.01 | 0.002 | 0.035 | 0.019 | 30.375 | 21.99 |
| | | 0.01 | 0.002 | 0.035 | 0.019 | 30.375 | 21.99 |
| 90 | 100 | 0.015 | 0.004 | 0.053 | 0.029 | 135 | 97.74 |
| | | 0.015 | 0.004 | 0.053 | 0.029 | 135 | 97.74 |
| | | 0.015 | 0.004 | 0.053 | 0.029 | 135 | 97.74 |
| 380 | 390 | 0.103 | 0.024 | 0.366 | 0.203 | 70.875 | 51.31 |
| | | 0.103 | 0.024 | 0.366 | 0.203 | 70.875 | 51.31 |
| | | 0.103 | 0.024 | 0.366 | 0.203 | 70.875 | 51.31 |
| 100 | 110 | 0.118 | 0.029 | 0.419 | 0.233 | 50.625 | 36.65 |
| | | 0.118 | 0.029 | 0.419 | 0.233 | 50.625 | 36.65 |
| | | 0.118 | 0.029 | 0.419 | 0.233 | 50.625 | 36.65 |
| 390 | 400 | 0.038 | 0.009 | 0.134 | 0.074 | 20.25 | 14.66 |
| | | 0.038 | 0.009 | 0.134 | 0.074 | 20.25 | 14.66 |
| | | 0.038 | 0.009 | 0.134 | 0.074 | 20.25 | 14.66 |

Tabela A1 - Dados de entrada do alimentador PJA - 04

| n | ns | Vs,kV | tol | | | iterações | |
|-----|------|-------|----------|-------|-------|-----------|----------|
| 59 | 10 | 13.8 | 1.00E-05 | | | 05/10. | |
| de | para | rp | rm | xp | xm | pl(kw) | ql(kvar) |
| 390 | 420 | 0.065 | 0.015 | 0.232 | 0.129 | 20.25 | 14.66 |
| | | 0.065 | 0.015 | 0.232 | 0.129 | 20.25 | 14.66 |
| | | 0.065 | 0.015 | 0.232 | 0.129 | 20.25 | 14.66 |
| 110 | 120 | 0.025 | 0.006 | 0.089 | 0.049 | 20.25 | 14.66 |
| | | 0.025 | 0.006 | 0.089 | 0.049 | 20.25 | 14.66 |
| | | 0.025 | 0.006 | 0.089 | 0.049 | 20.25 | 14.66 |
| 400 | 410 | 0.032 | 0.008 | 0.116 | 0.064 | 20.25 | 14.66 |
| | | 0.032 | 0.008 | 0.116 | 0.064 | 20.25 | 14.66 |
| | | 0.032 | 0.008 | 0.116 | 0.064 | 20.25 | 14.66 |
| 420 | 430 | 0.01 | 0.002 | 0.036 | 0.019 | 40.5 | 29.32 |
| | | 0.01 | 0.002 | 0.036 | 0.019 | 40.5 | 29.32 |
| | | 0.01 | 0.002 | 0.036 | 0.019 | 40.5 | 29.32 |
| 120 | 130 | 0.01 | 0.002 | 0.036 | 0.019 | 40.5 | 29.32 |
| | | 0.01 | 0.002 | 0.036 | 0.019 | 40.5 | 29.32 |
| | | 0.01 | 0.002 | 0.036 | 0.019 | 40.5 | 29.32 |
| 430 | 440 | 0.04 | 0.009 | 0.143 | 0.079 | 472.5 | 342.08 |
| | | 0.04 | 0.009 | 0.143 | 0.079 | 472.5 | 342.08 |
| | | 0.04 | 0.009 | 0.143 | 0.079 | 472.5 | 342.08 |
| 130 | 140 | 0.032 | 0.008 | 0.115 | 0.065 | 40.5 | 29.32 |
| | | 0.032 | 0.008 | 0.115 | 0.065 | 40.5 | 29.32 |
| | | 0.032 | 0.008 | 0.115 | 0.065 | 40.5 | 29.32 |
| 130 | 290 | 0.05 | 0.012 | 0.178 | 0.099 | 30.375 | 21.99 |
| | | 0.05 | 0.012 | 0.178 | 0.099 | 30.375 | 21.99 |
| | | 0.05 | 0.012 | 0.178 | 0.099 | 30.375 | 21.99 |
| 440 | 450 | 0.028 | 0.007 | 0.098 | 0.055 | 30.375 | 21.99 |
| | | 0.028 | 0.007 | 0.098 | 0.055 | 30.375 | 21.99 |
| | | 0.028 | 0.007 | 0.098 | 0.055 | 30.375 | 21.99 |
| 440 | 441 | 0.17 | 0.007 | 0.109 | 0.055 | 40.5 | 29.32 |
| | | 0.17 | 0.007 | 0.109 | 0.055 | 40.5 | 29.32 |
| | | 0.17 | 0.007 | 0.109 | 0.055 | 0.5 | 0.32 |
| 140 | 150 | 0.01 | 0.002 | 0.036 | 0.019 | 0 | 0 |
| | | 0.01 | 0.002 | 0.036 | 0.019 | 0 | 0 |
| | | 0.01 | 0.002 | 0.036 | 0.019 | 0 | 0 |
| 290 | 300 | 0.014 | 0.002 | 0.037 | 0.019 | 30.375 | 21.99 |
| | | 0.014 | 0.002 | 0.037 | 0.019 | 30.375 | 21.99 |
| | | 0.014 | 0.002 | 0.037 | 0.019 | 30.375 | 21.99 |
| 450 | 460 | 0.028 | 0.007 | 0.098 | 0.055 | 12.15 | 8.8 |
| | | 0.028 | 0.007 | 0.098 | 0.055 | 12.15 | 8.8 |
| | | 0.028 | 0.007 | 0.098 | 0.055 | 12.15 | 8.8 |
| 441 | 442 | 0.17 | 0.007 | 0.109 | 0.055 | 54.675 | 39.58 |
| | | 0.17 | 0.007 | 0.109 | 0.055 | 54.675 | 39.58 |
| | | 0.17 | 0.007 | 0.109 | 0.055 | 54.675 | 39.58 |
| 150 | 151 | 0.02 | 0.005 | 0.071 | 0.039 | 30.375 | 21.99 |
| | | 0.02 | 0.005 | 0.071 | 0.039 | 30.375 | 21.99 |
| | | 0.02 | 0.005 | 0.071 | 0.039 | 30.375 | 21.99 |
| 150 | 160 | 0.003 | 0.007 | 0.107 | 0.059 | 30.375 | 21.99 |
| | | 0.003 | 0.007 | 0.107 | 0.059 | 30.375 | 21.99 |
| | | 0.003 | 0.007 | 0.107 | 0.059 | 30.375 | 21.99 |
| 300 | 310 | 0.029 | 0.005 | 0.074 | 0.039 | 40.5 | 29.32 |
| | | 0.029 | 0.005 | 0.074 | 0.039 | 40.5 | 29.32 |
| | | 0.029 | 0.005 | 0.074 | 0.039 | 40.5 | 29.32 |
| 460 | 470 | 0.01 | 0.002 | 0.036 | 0.019 | 40.5 | 29.32 |
| | | 0.01 | 0.002 | 0.036 | 0.019 | 40.5 | 29.32 |
| | | 0.01 | 0.002 | 0.036 | 0.019 | 40.5 | 29.32 |

Tabela A1 - Dados de entrada do alimentador PJA - 04

| n | ns | Vs,kV | | tol | | | iterações | |
|-----|------|-------|-------|-------|----------|--------|-----------|----------|
| | | 13.8 | rp | rm | xp | xm | pl(kw) | ql(kvar) |
| 59 | 10 | | | | 1.00E-05 | | 05/10. | |
| de | para | | | | | | | |
| 442 | 443 | 0.201 | 0.008 | 0.129 | 0.065 | 44.55 | 32.25 | |
| | | 0.201 | 0.008 | 0.129 | 0.065 | 44.55 | 32.25 | |
| | | 0.201 | 0.008 | 0.129 | 0.065 | 44.55 | 32.25 | |
| 151 | 152 | 0.005 | 0.002 | 0.003 | 0.015 | 30.375 | 21.99 | |
| | | 0.005 | 0.002 | 0.003 | 0.015 | 30.375 | 21.99 | |
| | | 0.005 | 0.002 | 0.003 | 0.015 | 30.375 | 21.99 | |
| 160 | 170 | 0.02 | 0.005 | 0.071 | 0.039 | 60.75 | 43.98 | |
| | | 0.02 | 0.005 | 0.071 | 0.039 | 60.75 | 43.98 | |
| | | 0.02 | 0.005 | 0.071 | 0.039 | 60.75 | 43.98 | |
| 310 | 315 | 0.014 | 0.002 | 0.037 | 0.019 | 20.25 | 14.66 | |
| | | 0.014 | 0.002 | 0.037 | 0.019 | 20.25 | 14.66 | |
| | | 0.014 | 0.002 | 0.037 | 0.019 | 20.25 | 14.66 | |
| 152 | 153 | 0.032 | 0.001 | 0.019 | 0.009 | 40.5 | 29.32 | |
| | | 0.032 | 0.001 | 0.019 | 0.009 | 40.5 | 29.32 | |
| | | 0.032 | 0.001 | 0.019 | 0.009 | 40.5 | 29.32 | |
| 170 | 180 | 0.02 | 0.005 | 0.071 | 0.039 | 40.5 | 29.32 | |
| | | 0.02 | 0.005 | 0.071 | 0.039 | 40.5 | 29.32 | |
| | | 0.02 | 0.005 | 0.071 | 0.039 | 40.5 | 29.32 | |
| 315 | 320 | 0.014 | 0.002 | 0.037 | 0.019 | 30.375 | 21.99 | |
| | | 0.014 | 0.002 | 0.037 | 0.019 | 30.375 | 21.99 | |
| | | 0.014 | 0.002 | 0.037 | 0.019 | 30.375 | 21.99 | |
| 153 | 154 | 0.031 | 0.001 | 0.019 | 0.009 | 20.25 | 14.66 | |
| | | 0.031 | 0.001 | 0.019 | 0.009 | 20.25 | 14.66 | |
| | | 0.031 | 0.001 | 0.019 | 0.009 | 20.25 | 14.66 | |
| 180 | 190 | 0.032 | 0.005 | 0.084 | 0.045 | 20.25 | 14.66 | |
| | | 0.032 | 0.005 | 0.084 | 0.045 | 20.25 | 14.66 | |
| | | 0.032 | 0.005 | 0.084 | 0.045 | 20.25 | 14.66 | |
| 320 | 330 | 0.16 | 0.026 | 0.419 | 0.223 | 351 | 254.12 | |
| | | 0.16 | 0.026 | 0.419 | 0.223 | 351 | 254.12 | |
| | | 0.16 | 0.026 | 0.419 | 0.223 | 351 | 254.12 | |
| 190 | 200 | 0.025 | 0.004 | 0.065 | 0.035 | 20.25 | 14.66 | |
| | | 0.025 | 0.004 | 0.065 | 0.035 | 20.25 | 14.66 | |
| | | 0.025 | 0.004 | 0.065 | 0.035 | 20.25 | 14.66 | |
| 330 | 335 | 0.004 | 0.001 | 0.009 | 0.005 | 135 | 97.74 | |
| | | 0.004 | 0.001 | 0.009 | 0.005 | 135 | 97.74 | |
| | | 0.004 | 0.001 | 0.009 | 0.005 | 135 | 97.74 | |
| 330 | 340 | 0.225 | 0.036 | 0.587 | 0.313 | 0 | 0 | |
| | | 0.225 | 0.036 | 0.587 | 0.313 | 0 | 0 | |
| | | 0.225 | 0.036 | 0.587 | 0.313 | 0 | 0 | |
| 200 | 210 | 0.062 | 0.002 | 0.039 | 0.019 | 20.25 | 14.66 | |
| | | 0.062 | 0.002 | 0.039 | 0.019 | 20.25 | 14.66 | |
| | | 0.062 | 0.002 | 0.039 | 0.019 | 20.25 | 14.66 | |
| 340 | 350 | 0.036 | 0.006 | 0.093 | 0.049 | 540 | 390.95 | |
| | | 0.036 | 0.006 | 0.093 | 0.049 | 540 | 390.95 | |
| | | 0.036 | 0.006 | 0.093 | 0.049 | 540 | 390.95 | |
| 340 | 360 | 0.254 | 0.041 | 0.661 | 0.352 | 81 | 58.64 | |
| | | 0.254 | 0.041 | 0.661 | 0.352 | 81 | 58.64 | |
| | | 0.254 | 0.041 | 0.661 | 0.352 | 81 | 58.64 | |
| 210 | 220 | 0.062 | 0.002 | 0.039 | 0.019 | 20.25 | 14.66 | |
| | | 0.062 | 0.002 | 0.039 | 0.019 | 20.25 | 14.66 | |
| | | 0.062 | 0.002 | 0.039 | 0.019 | 20.25 | 14.66 | |
| 220 | 230 | 0.139 | 0.005 | 0.089 | 0.045 | 32.4 | 23.46 | |
| | | 0.139 | 0.005 | 0.089 | 0.045 | 32.4 | 23.46 | |
| | | 0.139 | 0.005 | 0.089 | 0.045 | 32.4 | 23.46 | |

Tabela A1 - Dados de entrada do alimentador PJA - 04

78

| n | ns | Vs,kV | tol | | iterações | | |
|-----|------|-------|----------|-------|-----------|--------|----------|
| 59 | 10 | 13.8 | 1.00E-05 | | 05/10. | | |
| de | para | rp | rm | xp | xm | pl(kw) | ql(kvar) |
| 230 | 240 | 0.062 | 0.002 | 0.039 | 0.019 | 60.75 | 43.98 |
| | | 0.062 | 0.002 | 0.039 | 0.019 | 60.75 | 43.98 |
| | | 0.062 | 0.002 | 0.039 | 0.019 | 60.75 | 43.98 |
| 240 | 250 | 0.031 | 0.001 | 0.002 | 0.009 | 20.25 | 14.66 |
| | | 0.031 | 0.001 | 0.002 | 0.009 | 20.25 | 14.66 |
| | | 0.031 | 0.001 | 0.002 | 0.009 | 20.25 | 14.66 |
| 250 | 260 | 0.232 | 0.009 | 0.149 | 0.074 | 81 | 58.64 |
| | | 0.232 | 0.009 | 0.149 | 0.074 | 81 | 58.64 |
| | | 0.232 | 0.009 | 0.149 | 0.074 | 81 | 58.64 |
| 260 | 270 | 0.062 | 0.002 | 0.039 | 0.019 | 20.25 | 14.66 |
| | | 0.062 | 0.002 | 0.039 | 0.019 | 20.25 | 14.66 |
| | | 0.062 | 0.002 | 0.039 | 0.019 | 20.25 | 14.66 |
| 270 | 280 | 0.201 | 0.008 | 0.129 | 0.065 | 30.375 | 21.99 |
| | | 0.201 | 0.008 | 0.129 | 0.065 | 30.375 | 21.99 |
| | | 0.201 | 0.008 | 0.129 | 0.065 | 30.375 | 21.99 |

Tabela A2 - Dados de saída do alimentador PJA - 04
para o caso equilibrado

| de | para | tipo | u | dp | dq | p | q |
|-----|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10 | 20 | 1 | 13.61 | 0.015 | 0.078 | 3.335 | 2.605 |
| | | | 13.61 | 0.015 | 0.078 | 3.335 | 2.605 |
| | | | 13.61 | 0.015 | 0.077 | 3.295 | 2.576 |
| 20 | 30 | 2 | 13.55 | 0.005 | 0.023 | 3.3 | 2.56 |
| | | | 13.55 | 0.005 | 0.023 | 3.3 | 2.56 |
| | | | 13.55 | 0.005 | 0.023 | 3.26 | 2.531 |
| 30 | 31 | 0 | 13.55 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.03 |
| | | | 13.55 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.03 |
| | | | 13.55 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.03 |
| 30 | 40 | 1 | 13.50 | 0.00 | 0.02 | 3.26 | 2.51 |
| | | | 13.50 | 0.00 | 0.02 | 3.26 | 2.51 |
| | | | 13.50 | 0.00 | 0.02 | 3.22 | 2.48 |
| 40 | 50 | 2 | 13.39 | 0.01 | 0.04 | 3.24 | 2.46 |
| | | | 13.39 | 0.01 | 0.04 | 3.24 | 2.46 |
| | | | 13.39 | 0.01 | 0.04 | 3.20 | 2.43 |
| 50 | 51 | 1 | 13.39 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.02 |
| | | | 13.39 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.02 |
| | | | 13.39 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.02 |
| 50 | 60 | 1 | 13.37 | 0.00 | 0.01 | 3.19 | 2.42 |
| | | | 13.37 | 0.00 | 0.01 | 3.19 | 2.42 |
| | | | 13.37 | 0.00 | 0.01 | 3.15 | 2.40 |
| 51 | 52 | 0 | 13.39 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.02 |
| | | | 13.39 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.02 |
| | | | 13.39 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.02 |
| 60 | 70 | 2 | 13.34 | 0.00 | 0.01 | 3.15 | 2.38 |
| | | | 13.34 | 0.00 | 0.01 | 3.15 | 2.38 |
| | | | 13.34 | 0.00 | 0.01 | 3.11 | 2.35 |
| 70 | 80 | 2 | 13.32 | 0.00 | 0.01 | 2.20 | 1.68 |
| | | | 13.32 | 0.00 | 0.01 | 2.20 | 1.68 |
| | | | 13.32 | 0.00 | 0.01 | 2.20 | 1.68 |
| 70 | 370 | 1 | 13.32 | 0.00 | 0.00 | 0.93 | 0.68 |
| | | | 13.32 | 0.00 | 0.00 | 0.93 | 0.68 |
| | | | 13.32 | 0.00 | 0.00 | 0.89 | 0.65 |
| 80 | 81 | 0 | 13.32 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.03 |
| | | | 13.32 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.03 |
| | | | 13.32 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.03 |
| 80 | 90 | 1 | 13.21 | 0.01 | 0.03 | 2.15 | 1.62 |
| | | | 13.21 | 0.01 | 0.03 | 2.15 | 1.62 |
| | | | 13.21 | 0.01 | 0.03 | 2.15 | 1.62 |
| 370 | 380 | 1 | 13.32 | 0.00 | 0.00 | 0.90 | 0.66 |
| | | | 13.32 | 0.00 | 0.00 | 0.90 | 0.66 |
| | | | 13.32 | 0.00 | 0.00 | 0.86 | 0.63 |
| 90 | 100 | 1 | 13.20 | 0.00 | 0.01 | 2.14 | 1.61 |
| | | | 13.20 | 0.00 | 0.01 | 2.14 | 1.61 |
| | | | 13.20 | 0.00 | 0.01 | 2.14 | 1.61 |
| 380 | 390 | 2 | 13.27 | 0.00 | 0.01 | 0.87 | 0.63 |
| | | | 13.27 | 0.00 | 0.01 | 0.87 | 0.63 |
| | | | 13.27 | 0.00 | 0.01 | 0.83 | 0.60 |
| 100 | 110 | 1 | 13.07 | 0.01 | 0.03 | 2.00 | 1.48 |
| | | | 13.07 | 0.01 | 0.03 | 2.00 | 1.48 |
| | | | 13.07 | 0.01 | 0.03 | 2.00 | 1.48 |
| 390 | 400 | 1 | 13.27 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.03 |
| | | | 13.27 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.03 |
| | | | 13.27 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.03 |
| 390 | 420 | 1 | 13.24 | 0.00 | 0.00 | 0.76 | 0.55 |
| | | | 13.24 | 0.00 | 0.00 | 0.76 | 0.55 |

Tabela A2 - Dados de saída do alimentador PJA - 04
para o caso equilibrado

| de | para | tipo | u | dp | dq | p | q |
|-----|------|------|-------|------|------|------|------|
| | | | 13.25 | 0.00 | 0.00 | 0.72 | 0.52 |
| 110 | 120 | 1 | 13.04 | 0.00 | 0.01 | 1.95 | 1.43 |
| | | | 13.04 | 0.00 | 0.01 | 1.95 | 1.43 |
| | | | 13.04 | 0.00 | 0.01 | 1.95 | 1.43 |
| 400 | 410 | 0 | 13.27 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.02 |
| | | | 13.27 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.02 |
| | | | 13.27 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.02 |
| 420 | 430 | 1 | 13.24 | 0.00 | 0.00 | 0.74 | 0.53 |
| | | | 13.24 | 0.00 | 0.00 | 0.74 | 0.53 |
| | | | 13.24 | 0.00 | 0.00 | 0.70 | 0.51 |
| 120 | 130 | 2 | 13.03 | 0.00 | 0.00 | 1.93 | 1.42 |
| | | | 13.03 | 0.00 | 0.00 | 1.93 | 1.42 |
| | | | 13.03 | 0.00 | 0.00 | 1.93 | 1.42 |
| 430 | 440 | 2 | 13.23 | 0.00 | 0.00 | 0.70 | 0.50 |
| | | | 13.23 | 0.00 | 0.00 | 0.70 | 0.50 |
| | | | 13.23 | 0.00 | 0.00 | 0.66 | 0.47 |
| 130 | 140 | 1 | 13.02 | 0.00 | 0.00 | 0.62 | 0.45 |
| | | | 13.02 | 0.00 | 0.00 | 0.62 | 0.45 |
| | | | 13.02 | 0.00 | 0.00 | 0.62 | 0.45 |
| 130 | 290 | 1 | 13.00 | 0.00 | 0.01 | 1.26 | 0.93 |
| | | | 13.00 | 0.00 | 0.01 | 1.26 | 0.93 |
| | | | 13.00 | 0.00 | 0.01 | 1.26 | 0.93 |
| 440 | 450 | 1 | 13.22 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.06 |
| | | | 13.22 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.06 |
| | | | 13.23 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.06 |
| 440 | 441 | 1 | 13.22 | 0.00 | 0.00 | 0.14 | 0.10 |
| | | | 13.22 | 0.00 | 0.00 | 0.14 | 0.10 |
| | | | 13.23 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.07 |
| 140 | 150 | 2 | 13.02 | 0.00 | 0.00 | 0.58 | 0.42 |
| | | | 13.02 | 0.00 | 0.00 | 0.58 | 0.42 |
| | | | 13.02 | 0.00 | 0.00 | 0.58 | 0.42 |
| 290 | 300 | 1 | 12.99 | 0.00 | 0.00 | 1.23 | 0.91 |
| | | | 12.99 | 0.00 | 0.00 | 1.23 | 0.91 |
| | | | 12.99 | 0.00 | 0.00 | 1.23 | 0.91 |
| 450 | 460 | 1 | 13.22 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.04 |
| | | | 13.22 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.04 |
| | | | 13.23 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.04 |
| 441 | 442 | 1 | 13.22 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.07 |
| | | | 13.22 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.07 |
| | | | 13.22 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.07 |
| 150 | 151 | 1 | 13.02 | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 0.09 |
| | | | 13.02 | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 0.09 |
| | | | 13.02 | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 0.09 |
| 150 | 160 | 1 | 13.01 | 0.00 | 0.00 | 0.46 | 0.33 |
| | | | 13.01 | 0.00 | 0.00 | 0.46 | 0.33 |
| | | | 13.01 | 0.00 | 0.00 | 0.46 | 0.33 |
| 300 | 310 | 1 | 12.98 | 0.00 | 0.00 | 1.20 | 0.88 |
| | | | 12.98 | 0.00 | 0.00 | 1.20 | 0.88 |
| | | | 12.98 | 0.00 | 0.00 | 1.20 | 0.88 |
| 460 | 470 | 0 | 13.22 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.03 |
| | | | 13.22 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.03 |
| | | | 13.23 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.03 |
| 442 | 443 | 0 | 13.22 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.03 |
| | | | 13.22 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.03 |
| | | | 13.22 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.03 |
| 151 | 152 | 1 | 13.02 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.07 |

Tabela A2 - Dados de saída do alimentador PJA - 04
para o caso equilibrado

| de | para | tipo | u | dp | dq | p | q |
|-----|------|------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | 13.02 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.07 |
| | | | 13.02 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.07 |
| 160 | 170 | 1 | 13.01 | 0.00 | 0.00 | 0.43 | 0.31 |
| | | | 13.01 | 0.00 | 0.00 | 0.43 | 0.31 |
| | | | 13.01 | 0.00 | 0.00 | 0.43 | 0.31 |
| 310 | 315 | 1 | 12.97 | 0.00 | 0.00 | 1.16 | 0.85 |
| | | | 12.97 | 0.00 | 0.00 | 1.16 | 0.85 |
| | | | 12.97 | 0.00 | 0.00 | 1.16 | 0.85 |
| 152 | 153 | 1 | 13.02 | 0.00 | 0.00 | 0.06 | 0.04 |
| | | | 13.02 | 0.00 | 0.00 | 0.06 | 0.04 |
| | | | 13.02 | 0.00 | 0.00 | 0.06 | 0.04 |
| 170 | 180 | 1 | 13.00 | 0.00 | 0.00 | 0.37 | 0.27 |
| | | | 13.00 | 0.00 | 0.00 | 0.37 | 0.27 |
| | | | 13.01 | 0.00 | 0.00 | 0.37 | 0.27 |
| 315 | 320 | 1 | 12.96 | 0.00 | 0.00 | 1.14 | 0.84 |
| | | | 12.96 | 0.00 | 0.00 | 1.14 | 0.84 |
| | | | 12.97 | 0.00 | 0.00 | 1.14 | 0.84 |
| 153 | 154 | 0 | 13.02 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.02 |
| | | | 13.02 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.02 |
| | | | 13.02 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.02 |
| 180 | 190 | 1 | 13.00 | 0.00 | 0.00 | 0.33 | 0.24 |
| | | | 13.00 | 0.00 | 0.00 | 0.33 | 0.24 |
| | | | 13.00 | 0.00 | 0.00 | 0.33 | 0.24 |
| 320 | 330 | 2 | 12.89 | 0.00 | 0.01 | 1.11 | 0.81 |
| | | | 12.89 | 0.00 | 0.01 | 1.11 | 0.81 |
| | | | 12.89 | 0.00 | 0.01 | 1.11 | 0.81 |
| 190 | 200 | 1 | 13.00 | 0.00 | 0.00 | 0.31 | 0.22 |
| | | | 13.00 | 0.00 | 0.00 | 0.31 | 0.22 |
| | | | 13.00 | 0.00 | 0.00 | 0.31 | 0.22 |
| 330 | 335 | 0 | 12.89 | 0.00 | 0.00 | 0.14 | 0.10 |
| | | | 12.89 | 0.00 | 0.00 | 0.14 | 0.10 |
| | | | 12.89 | 0.00 | 0.00 | 0.14 | 0.10 |
| 330 | 340 | 2 | 12.83 | 0.00 | 0.00 | 0.62 | 0.45 |
| | | | 12.83 | 0.00 | 0.00 | 0.62 | 0.45 |
| | | | 12.84 | 0.00 | 0.00 | 0.62 | 0.45 |
| 200 | 210 | 1 | 12.99 | 0.00 | 0.00 | 0.29 | 0.21 |
| | | | 12.99 | 0.00 | 0.00 | 0.29 | 0.21 |
| | | | 13.00 | 0.00 | 0.00 | 0.29 | 0.21 |
| 340 | 350 | 0 | 12.83 | 0.00 | 0.00 | 0.54 | 0.39 |
| | | | 12.83 | 0.00 | 0.00 | 0.54 | 0.39 |
| | | | 12.83 | 0.00 | 0.00 | 0.54 | 0.39 |
| 340 | 360 | 0 | 12.83 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.06 |
| | | | 12.83 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.06 |
| | | | 12.83 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.06 |
| 210 | 220 | 1 | 12.99 | 0.00 | 0.00 | 0.27 | 0.19 |
| | | | 12.99 | 0.00 | 0.00 | 0.27 | 0.19 |
| | | | 12.99 | 0.00 | 0.00 | 0.27 | 0.19 |
| 220 | 230 | 1 | 12.99 | 0.00 | 0.00 | 0.25 | 0.18 |
| | | | 12.99 | 0.00 | 0.00 | 0.25 | 0.18 |
| | | | 12.99 | 0.00 | 0.00 | 0.25 | 0.18 |
| 230 | 240 | 1 | 12.98 | 0.00 | 0.00 | 0.21 | 0.15 |
| | | | 12.98 | 0.00 | 0.00 | 0.21 | 0.15 |
| | | | 12.99 | 0.00 | 0.00 | 0.21 | 0.15 |
| 240 | 250 | 1 | 12.98 | 0.00 | 0.00 | 0.15 | 0.11 |
| | | | 12.98 | 0.00 | 0.00 | 0.15 | 0.11 |
| | | | 12.98 | 0.00 | 0.00 | 0.15 | 0.11 |

Tabela A2 - Dados de saída do alimentador PJA - 04
para o caso equilibrado

| de | para | tipo | u | dp | dq | p | q |
|-------------------|------|------|-------|----------|-------|--------|--------|
| 250 | 260 | 1 | 12.98 | 0.00 | 0.00 | 0.13 | 0.10 |
| | | | 12.98 | 0.00 | 0.00 | 0.13 | 0.10 |
| | | | 12.98 | 0.00 | 0.00 | 0.13 | 0.10 |
| 260 | 270 | 1 | 12.98 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.04 |
| | | | 12.98 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.04 |
| | | | 12.98 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.04 |
| 270 | 280 | 0 | 12.98 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.02 |
| | | | 12.98 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.02 |
| | | | 12.98 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.02 |
| totais (MW,MVA) : | | | | 0.182 | 0.903 | 10.012 | 8.02 |
| totais (%) : | | | | 100 | 100 | 1.82 | 11.261 |
| Elapsed time: | | | | 1.70E-01 | | | |

Tabela A3 - Dados de saída do alimentador PJA - 04
para o caso desequilibrado considerando as mútuas

| de | para | tipo | u | dp | dq | p | q |
|-----|------|------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 10 | 20 | 1 | 13.595 | 0.017 | 0.088 | 3.559 | 2.791 |
| | | | 13.586 | 0.021 | 0.094 | 4.137 | 3.221 |
| | | | 13.609 | 0.014 | 0.08 | 2.677 | 2.137 |
| 20 | 30 | 2 | 13.534 | 0.005 | 0.026 | 3.522 | 2.742 |
| | | | 13.522 | 0.006 | 0.028 | 4.093 | 3.166 |
| | | | 13.551 | 0.004 | 0.024 | 2.648 | 2.096 |
| 30 | 31 | 0 | 13.532 | 0.000 | 0.000 | 0.043 | 0.031 |
| | | | 13.52 | 0.000 | 0.000 | 0.05 | 0.036 |
| | | | 13.55 | 0.000 | 0.000 | 0.033 | 0.024 |
| 30 | 40 | 1 | 13.482 | 0.004 | 0.022 | 3.474 | 2.689 |
| | | | 13.468 | 0.005 | 0.023 | 4.037 | 3.107 |
| | | | 13.504 | 0.003 | 0.02 | 2.612 | 2.052 |
| 40 | 50 | 2 | 13.367 | 0.01 | 0.049 | 3.451 | 2.631 |
| | | | 13.348 | 0.011 | 0.052 | 4.011 | 3.043 |
| | | | 13.397 | 0.007 | 0.044 | 2.594 | 2.001 |
| 50 | 51 | 1 | 13.367 | 0.000 | 0.000 | 0.022 | 0.016 |
| | | | 13.347 | 0.000 | 0.000 | 0.025 | 0.018 |
| | | | 13.396 | 0.000 | 0.000 | 0.016 | 0.012 |
| 50 | 60 | 1 | 13.35 | 0.001 | 0.007 | 3.407 | 2.592 |
| | | | 13.33 | 0.002 | 0.008 | 3.959 | 2.999 |
| | | | 13.381 | 0.001 | 0.007 | 2.56 | 1.971 |
| 51 | 52 | 0 | 13.366 | 0.000 | 0.000 | 0.022 | 0.016 |
| | | | 13.347 | 0.000 | 0.000 | 0.025 | 0.018 |
| | | | 13.396 | 0.000 | 0.000 | 0.016 | 0.012 |
| 60 | 70 | 2 | 13.315 | 0.003 | 0.015 | 3.361 | 2.546 |
| | | | 13.293 | 0.003 | 0.016 | 3.905 | 2.947 |
| | | | 13.348 | 0.002 | 0.013 | 2.525 | 1.934 |
| 70 | 80 | 2 | 13.296 | 0.001 | 0.005 | 2.346 | 1.796 |
| | | | 13.273 | 0.001 | 0.006 | 2.726 | 2.076 |
| | | | 13.33 | 0.001 | 0.005 | 1.785 | 1.383 |
| 70 | 370 | 1 | 13.294 | 0.000 | 0.002 | 0.992 | 0.727 |
| | | | 13.272 | 0.001 | 0.003 | 1.152 | 0.844 |
| | | | 13.329 | 0.000 | 0.002 | 0.722 | 0.531 |
| 80 | 81 | 0 | 13.294 | 0.000 | 0.000 | 0.043 | 0.031 |
| | | | 13.271 | 0.000 | 0.000 | 0.05 | 0.036 |
| | | | 13.329 | 0.000 | 0.000 | 0.033 | 0.024 |
| 80 | 90 | 1 | 13.182 | 0.006 | 0.033 | 2.296 | 1.732 |
| | | | 13.154 | 0.008 | 0.035 | 2.668 | 2.005 |
| | | | 13.224 | 0.005 | 0.03 | 1.747 | 1.33 |
| 370 | 380 | 1 | 13.29 | 0.000 | 0.001 | 0.959 | 0.703 |
| | | | 13.267 | 0.000 | 0.001 | 1.115 | 0.816 |
| | | | 13.325 | 0.000 | 0.001 | 0.697 | 0.513 |
| 90 | 100 | 1 | 13.164 | 0.001 | 0.005 | 2.282 | 1.717 |
| | | | 13.135 | 0.001 | 0.006 | 2.652 | 1.989 |
| | | | 13.208 | 0.001 | 0.005 | 1.737 | 1.318 |
| 380 | 390 | 2 | 13.241 | 0.001 | 0.006 | 0.926 | 0.674 |
| | | | 13.216 | 0.001 | 0.006 | 1.076 | 0.783 |
| | | | 13.28 | 0.001 | 0.005 | 0.672 | 0.49 |
| 100 | 110 | 1 | 13.03 | 0.007 | 0.036 | 2.131 | 1.577 |
| | | | 12.995 | 0.009 | 0.039 | 2.476 | 1.829 |
| | | | 13.083 | 0.006 | 0.033 | 1.622 | 1.206 |

Tabela A3 - Dados de saída do alimentador PJA - 04
para o caso desequilibrado considerando as mútuas

| de | para | tipo | u | dp | dq | p | q |
|-----|------|------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 390 | 400 | 1 | 13.24 | 0.000 | 0.000 | 0.043 | 0.031 |
| | | | 13.215 | 0.000 | 0.000 | 0.05 | 0.036 |
| | | | 13.279 | 0.000 | 0.000 | 0.033 | 0.024 |
| 390 | 420 | 1 | 13.214 | 0.001 | 0.003 | 0.806 | 0.585 |
| | | | 13.188 | 0.001 | 0.003 | 0.937 | 0.68 |
| | | | 13.256 | 0.000 | 0.002 | 0.581 | 0.422 |
| 110 | 120 | 1 | 13.003 | 0.001 | 0.007 | 2.076 | 1.531 |
| | | | 12.966 | 0.002 | 0.008 | 2.412 | 1.776 |
| | | | 13.057 | 0.001 | 0.007 | 1.579 | 1.17 |
| 400 | 410 | 0 | 13.24 | 0.000 | 0.000 | 0.022 | 0.016 |
| | | | 13.214 | 0.000 | 0.000 | 0.025 | 0.018 |
| | | | 13.279 | 0.000 | 0.000 | 0.016 | 0.012 |
| 420 | 430 | 1 | 13.21 | 0.000 | 0.000 | 0.785 | 0.569 |
| | | | 13.183 | 0.000 | 0.000 | 0.912 | 0.661 |
| | | | 13.252 | 0.000 | 0.000 | 0.565 | 0.41 |
| 120 | 130 | 2 | 12.992 | 0.001 | 0.003 | 2.053 | 1.512 |
| | | | 12.955 | 0.001 | 0.003 | 2.386 | 1.755 |
| | | | 13.048 | 0.000 | 0.003 | 1.563 | 1.155 |
| 430 | 440 | 2 | 13.195 | 0.000 | 0.001 | 0.741 | 0.537 |
| | | | 13.168 | 0.000 | 0.002 | 0.861 | 0.624 |
| | | | 13.238 | 0.000 | 0.001 | 0.532 | 0.385 |
| 130 | 140 | 1 | 12.981 | 0.000 | 0.001 | 0.661 | 0.48 |
| | | | 12.943 | 0.000 | 0.001 | 0.768 | 0.558 |
| | | | 13.037 | 0.000 | 0.001 | 0.503 | 0.366 |
| 130 | 290 | 1 | 12.956 | 0.001 | 0.006 | 1.348 | 0.994 |
| | | | 12.917 | 0.001 | 0.007 | 1.566 | 1.153 |
| | | | 13.014 | 0.001 | 0.006 | 1.025 | 0.759 |
| 440 | 450 | 1 | 13.194 | 0.000 | 0.000 | 0.089 | 0.064 |
| | | | 13.166 | 0.000 | 0.000 | 0.103 | 0.074 |
| | | | 13.237 | 0.000 | 0.000 | 0.067 | 0.049 |
| 440 | 441 | 1 | 13.192 | 0.000 | 0.000 | 0.149 | 0.108 |
| | | | 13.164 | 0.000 | 0.000 | 0.173 | 0.125 |
| | | | 13.236 | 0.000 | 0.000 | 0.081 | 0.059 |
| 140 | 150 | 2 | 12.978 | 0.000 | 0.000 | 0.618 | 0.449 |
| | | | 12.94 | 0.000 | 0.000 | 0.718 | 0.521 |
| | | | 13.034 | 0.000 | 0.000 | 0.47 | 0.342 |
| 290 | 300 | 1 | 12.949 | 0.000 | 0.001 | 1.315 | 0.969 |
| | | | 12.91 | 0.000 | 0.001 | 1.528 | 1.124 |
| | | | 13.008 | 0.000 | 0.001 | 1.001 | 0.74 |
| 450 | 460 | 1 | 13.193 | 0.000 | 0.000 | 0.056 | 0.041 |
| | | | 13.165 | 0.000 | 0.000 | 0.065 | 0.047 |
| | | | 13.236 | 0.000 | 0.000 | 0.043 | 0.031 |
| 441 | 442 | 1 | 13.189 | 0.000 | 0.000 | 0.106 | 0.077 |
| | | | 13.161 | 0.000 | 0.000 | 0.123 | 0.089 |
| | | | 13.233 | 0.000 | 0.000 | 0.081 | 0.058 |
| 150 | 151 | 1 | 12.976 | 0.000 | 0.000 | 0.13 | 0.094 |
| | | | 12.938 | 0.000 | 0.000 | 0.151 | 0.109 |
| | | | 13.033 | 0.000 | 0.000 | 0.099 | 0.071 |
| 150 | 160 | 1 | 12.971 | 0.000 | 0.000 | 0.488 | 0.354 |
| | | | 12.933 | 0.000 | 0.001 | 0.567 | 0.412 |
| | | | 13.028 | 0.000 | 0.000 | 0.372 | 0.27 |

Tabela A3 - Dados de saída do alimentador PJA - 04
para o caso desequilibrado considerando as mútuas

| de | para | tipo | u | dp | dq | p | q |
|-----|------|------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 300 | 310 | 1 | 12.934 | 0.001 | 0.002 | 1.282 | 0.943 |
| | | | 12.894 | 0.001 | 0.002 | 1.49 | 1.095 |
| | | | 12.994 | 0.000 | 0.002 | 0.975 | 0.721 |
| 460 | 470 | 0 | 13.193 | 0.000 | 0.000 | 0.043 | 0.031 |
| | | | 13.165 | 0.000 | 0.000 | 0.05 | 0.036 |
| | | | 13.236 | 0.000 | 0.000 | 0.033 | 0.024 |
| 442 | 443 | 0 | 13.187 | 0.000 | 0.000 | 0.047 | 0.034 |
| | | | 13.159 | 0.000 | 0.000 | 0.055 | 0.04 |
| | | | 13.232 | 0.000 | 0.000 | 0.036 | 0.026 |
| 151 | 152 | 1 | 12.976 | 0.000 | 0.000 | 0.097 | 0.07 |
| | | | 12.938 | 0.000 | 0.000 | 0.113 | 0.082 |
| | | | 13.033 | 0.000 | 0.000 | 0.074 | 0.054 |
| 160 | 170 | 1 | 12.966 | 0.000 | 0.000 | 0.456 | 0.331 |
| | | | 12.928 | 0.000 | 0.000 | 0.53 | 0.384 |
| | | | 13.023 | 0.000 | 0.000 | 0.347 | 0.252 |
| 310 | 315 | 1 | 12.927 | 0.000 | 0.001 | 1.239 | 0.911 |
| | | | 12.887 | 0.000 | 0.001 | 1.439 | 1.057 |
| | | | 12.988 | 0.000 | 0.001 | 0.942 | 0.696 |
| 152 | 153 | 1 | 12.976 | 0.000 | 0.000 | 0.065 | 0.047 |
| | | | 12.938 | 0.000 | 0.000 | 0.075 | 0.054 |
| | | | 13.032 | 0.000 | 0.000 | 0.049 | 0.036 |
| 170 | 180 | 1 | 12.962 | 0.000 | 0.000 | 0.391 | 0.284 |
| | | | 12.924 | 0.000 | 0.000 | 0.454 | 0.329 |
| | | | 13.02 | 0.000 | 0.000 | 0.298 | 0.216 |
| 315 | 320 | 1 | 12.92 | 0.000 | 0.001 | 1.217 | 0.894 |
| | | | 12.88 | 0.000 | 0.001 | 1.414 | 1.038 |
| | | | 12.982 | 0.000 | 0.001 | 0.926 | 0.683 |
| 153 | 154 | 0 | 12.976 | 0.000 | 0.000 | 0.022 | 0.016 |
| | | | 12.938 | 0.000 | 0.000 | 0.025 | 0.018 |
| | | | 13.032 | 0.000 | 0.000 | 0.016 | 0.012 |
| 180 | 190 | 1 | 12.958 | 0.000 | 0.000 | 0.348 | 0.252 |
| | | | 12.919 | 0.000 | 0.000 | 0.404 | 0.293 |
| | | | 13.016 | 0.000 | 0.000 | 0.265 | 0.192 |
| 320 | 330 | 2 | 12.844 | 0.003 | 0.011 | 1.182 | 0.86 |
| | | | 12.799 | 0.003 | 0.012 | 1.373 | 0.999 |
| | | | 12.912 | 0.002 | 0.01 | 0.899 | 0.655 |
| 190 | 200 | 1 | 12.954 | 0.000 | 0.000 | 0.326 | 0.236 |
| | | | 12.916 | 0.000 | 0.000 | 0.379 | 0.275 |
| | | | 13.013 | 0.000 | 0.000 | 0.248 | 0.18 |
| 330 | 335 | 0 | 12.844 | 0.000 | 0.000 | 0.144 | 0.104 |
| | | | 12.799 | 0.000 | 0.000 | 0.167 | 0.121 |
| | | | 12.912 | 0.000 | 0.000 | 0.11 | 0.079 |
| 330 | 340 | 2 | 12.784 | 0.001 | 0.005 | 0.662 | 0.48 |
| | | | 12.735 | 0.001 | 0.005 | 0.769 | 0.558 |
| | | | 12.857 | 0.001 | 0.004 | 0.504 | 0.365 |
| 200 | 210 | 1 | 12.952 | 0.000 | 0.000 | 0.305 | 0.221 |
| | | | 12.913 | 0.000 | 0.000 | 0.354 | 0.256 |
| | | | 13.01 | 0.000 | 0.000 | 0.232 | 0.168 |
| 340 | 350 | 0 | 12.776 | 0.000 | 0.001 | 0.576 | 0.417 |
| | | | 12.727 | 0.000 | 0.001 | 0.669 | 0.484 |
| | | | 12.849 | 0.000 | 0.001 | 0.438 | 0.317 |

Tabela A3 - Dados de saída do alimentador PJA - 04
para o caso desequilibrado considerando as mútuas

| de | para | tipo | u | dp | dq | p | q |
|-------------------|------|------|----------|-------|--------|--------|-------|
| 340 | 360 | 0 | 12.775 | 0.000 | 0.000 | 0.086 | 0.063 |
| | | | 12.726 | 0.000 | 0.000 | 0.1 | 0.073 |
| | | | 12.849 | 0.000 | 0.000 | 0.066 | 0.048 |
| 210 | 220 | 1 | 12.949 | 0.000 | 0.000 | 0.283 | 0.205 |
| | | | 12.91 | 0.000 | 0.000 | 0.329 | 0.238 |
| | | | 13.008 | 0.000 | 0.000 | 0.215 | 0.156 |
| 220 | 230 | 1 | 12.943 | 0.000 | 0.000 | 0.261 | 0.189 |
| | | | 12.903 | 0.000 | 0.000 | 0.304 | 0.22 |
| | | | 13.003 | 0.000 | 0.000 | 0.199 | 0.144 |
| 230 | 240 | 1 | 12.941 | 0.000 | 0.000 | 0.227 | 0.164 |
| | | | 12.901 | 0.000 | 0.000 | 0.263 | 0.191 |
| | | | 13.001 | 0.000 | 0.000 | 0.173 | 0.125 |
| 240 | 250 | 1 | 12.941 | 0.000 | 0.000 | 0.162 | 0.117 |
| | | | 12.9 | 0.000 | 0.000 | 0.188 | 0.136 |
| | | | 13.001 | 0.000 | 0.000 | 0.123 | 0.089 |
| 250 | 260 | 1 | 12.936 | 0.000 | 0.000 | 0.14 | 0.102 |
| | | | 12.895 | 0.000 | 0.000 | 0.163 | 0.118 |
| | | | 12.997 | 0.000 | 0.000 | 0.107 | 0.077 |
| 260 | 270 | 1 | 12.935 | 0.000 | 0.000 | 0.054 | 0.039 |
| | | | 12.894 | 0.000 | 0.000 | 0.063 | 0.045 |
| | | | 12.996 | 0.000 | 0.000 | 0.041 | 0.03 |
| 270 | 280 | 0 | 12.954 | 0.000 | 0.000 | 0.032 | 0.023 |
| | | | 12.893 | 0.000 | 0.000 | 0.038 | 0.027 |
| | | | 12.995 | 0.000 | 0.000 | 0.025 | 0.018 |
| totais (MW Mvar): | | | 0.204 | 1.012 | 10.424 | 8.411 | |
| totais (%): | | | 100 | 100 | 1.959 | 12.036 | |
| Elapsed time: | | | 1.70E-01 | | | | |

Tabela A4 - Dados de saída do alimentador PJA - 04
para o caso desequilibrado sem considerar as mútuas

| de | para | u | dp | dq | p | q |
|-----|------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 10 | 20 | 13.714 | 0.008 | 0.028 | 2.992 | 2.230 |
| | | 13.694 | 0.012 | 0.043 | 3.670 | 2.754 |
| | | 13.726 | 0.006 | 0.021 | 2.594 | 1.926 |
| 20 | 30 | 13.688 | 0.002 | 0.008 | 2.962 | 2.201 |
| | | 13.662 | 0.004 | 0.013 | 3.633 | 2.717 |
| | | 13.703 | 0.002 | 0.006 | 2.569 | 1.903 |
| 30 | 31 | 13.687 | 0.000 | 0.000 | 0.037 | 0.026 |
| | | 13.661 | 0.000 | 0.000 | 0.045 | 0.032 |
| | | 13.703 | 0.000 | 0.000 | 0.032 | 0.023 |
| 30 | 40 | 13.667 | 0.002 | 0.007 | 2.923 | 2.168 |
| | | 13.635 | 0.003 | 0.011 | 3.585 | 2.674 |
| | | 13.685 | 0.001 | 0.005 | 2.535 | 1.874 |
| 40 | 50 | 13.618 | 0.004 | 0.016 | 2.908 | 2.144 |
| | | 13.575 | 0.007 | 0.024 | 3.565 | 2.641 |
| | | 13.643 | 0.003 | 0.012 | 2.522 | 1.856 |
| 50 | 51 | 13.618 | 0.000 | 0.000 | 0.018 | 0.013 |
| | | 13.575 | 0.000 | 0.000 | 0.022 | 0.016 |
| | | 13.642 | 0.000 | 0.000 | 0.016 | 0.012 |
| 50 | 60 | 13.610 | 0.001 | 0.002 | 2.871 | 2.115 |
| | | 13.566 | 0.001 | 0.004 | 3.519 | 2.604 |
| | | 13.636 | 0.001 | 0.002 | 2.489 | 1.830 |
| 51 | 52 | 13.617 | 0.000 | 0.000 | 0.018 | 0.013 |
| | | 13.574 | 0.000 | 0.000 | 0.022 | 0.016 |
| | | 13.642 | 0.000 | 0.000 | 0.016 | 0.012 |
| 60 | 70 | 13.595 | 0.001 | 0.005 | 2.833 | 2.084 |
| | | 13.547 | 0.002 | 0.007 | 3.472 | 2.565 |
| | | 13.623 | 0.001 | 0.004 | 2.456 | 1.804 |
| 70 | 80 | 13.587 | 0.000 | 0.002 | 1.975 | 1.459 |
| | | 13.538 | 0.001 | 0.003 | 2.422 | 1.797 |
| | | 13.616 | 0.000 | 0.001 | 1.735 | 1.278 |
| 70 | 370 | 13.586 | 0.000 | 0.001 | 0.838 | 0.610 |
| | | 13.536 | 0.000 | 0.001 | 1.027 | 0.748 |
| | | 13.616 | 0.000 | 0.001 | 0.705 | 0.512 |
| 80 | 81 | 13.587 | 0.000 | 0.000 | 0.037 | 0.026 |
| | | 13.536 | 0.000 | 0.000 | 0.045 | 0.032 |
| | | 13.615 | 0.000 | 0.000 | 0.032 | 0.023 |
| 80 | 90 | 13.540 | 0.003 | 0.010 | 1.936 | 1.422 |
| | | 13.479 | 0.004 | 0.016 | 2.373 | 1.749 |
| | | 13.574 | 0.002 | 0.008 | 1.701 | 1.247 |
| 370 | 380 | 13.584 | 0.000 | 0.000 | 0.811 | 0.590 |
| | | 13.534 | 0.000 | 0.000 | 0.993 | 0.723 |
| | | 13.614 | 0.000 | 0.000 | 0.681 | 0.495 |
| 90 | 100 | 13.532 | 0.000 | 0.002 | 1.925 | 1.412 |
| | | 13.469 | 0.001 | 0.003 | 2.359 | 1.737 |
| | | 13.568 | 0.000 | 0.001 | 1.691 | 1.239 |
| 380 | 390 | 13.563 | 0.001 | 0.002 | 0.783 | 0.568 |
| | | 13.508 | 0.001 | 0.003 | 0.959 | 0.696 |
| | | 13.596 | 0.000 | 0.001 | 0.656 | 0.476 |
| 100 | 110 | 13.475 | 0.003 | 0.011 | 1.800 | 1.313 |

Tabela A4 - Dados de saída do alimentador PJA - 04
para o caso desequilibrado sem considerar as mútuas

| de | para | u | dp | dq | p | q |
|-----|------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | 13.399 | 0.005 | 0.017 | 2.205 | 1.611 |
| | | 13.518 | 0.002 | 0.009 | 1.581 | 1.152 |
| 390 | 400 | 13.563 | 0.000 | 0.000 | 0.037 | 0.026 |
| | | 13.507 | 0.000 | 0.000 | 0.045 | 0.032 |
| | | 13.596 | 0.000 | 0.000 | 0.032 | 0.023 |
| 390 | 420 | 13.551 | 0.000 | 0.001 | 0.682 | 0.494 |
| | | 13.493 | 0.000 | 0.001 | 0.835 | 0.606 |
| | | 13.586 | 0.000 | 0.001 | 0.568 | 0.411 |
| 110 | 120 | 13.464 | 0.001 | 0.002 | 1.753 | 1.277 |
| | | 13.385 | 0.001 | 0.004 | 2.148 | 1.567 |
| | | 13.508 | 0.000 | 0.002 | 1.540 | 1.121 |
| 400 | 410 | 13.563 | 0.000 | 0.000 | 0.018 | 0.013 |
| | | 13.507 | 0.000 | 0.000 | 0.022 | 0.016 |
| | | 13.596 | 0.000 | 0.000 | 0.016 | 0.012 |
| 420 | 430 | 13.550 | 0.000 | 0.000 | 0.664 | 0.481 |
| | | 13.491 | 0.000 | 0.000 | 0.813 | 0.589 |
| | | 13.585 | 0.000 | 0.000 | 0.552 | 0.400 |
| 120 | 130 | 13.459 | 0.000 | 0.001 | 1.735 | 1.263 |
| | | 13.379 | 0.000 | 0.001 | 2.125 | 1.550 |
| | | 13.504 | 0.000 | 0.001 | 1.524 | 1.109 |
| 430 | 440 | 13.543 | 0.000 | 0.000 | 0.627 | 0.454 |
| | | 13.483 | 0.000 | 0.001 | 0.768 | 0.556 |
| | | 13.579 | 0.000 | 0.000 | 0.519 | 0.376 |
| 130 | 140 | 13.454 | 0.000 | 0.000 | 0.559 | 0.405 |
| | | 13.373 | 0.000 | 0.000 | 0.685 | 0.496 |
| | | 13.500 | 0.000 | 0.000 | 0.491 | 0.356 |
| 130 | 290 | 13.444 | 0.001 | 0.002 | 1.138 | 0.829 |
| | | 13.360 | 0.001 | 0.003 | 1.395 | 1.018 |
| | | 13.491 | 0.000 | 0.001 | 1.000 | 0.728 |
| 440 | 450 | 13.542 | 0.000 | 0.000 | 0.075 | 0.054 |
| | | 13.482 | 0.000 | 0.000 | 0.092 | 0.066 |
| | | 13.579 | 0.000 | 0.000 | 0.066 | 0.048 |
| 440 | 441 | 13.541 | 0.000 | 0.000 | 0.126 | 0.091 |
| | | 13.480 | 0.000 | 0.000 | 0.154 | 0.112 |
| | | 13.578 | 0.000 | 0.000 | 0.079 | 0.057 |
| 140 | 150 | 13.453 | 0.000 | 0.000 | 0.523 | 0.379 |
| | | 13.371 | 0.000 | 0.000 | 0.640 | 0.464 |
| | | 13.498 | 0.000 | 0.000 | 0.459 | 0.333 |
| 290 | 300 | 13.440 | 0.000 | 0.000 | 1.111 | 0.809 |
| | | 13.356 | 0.000 | 0.001 | 1.361 | 0.993 |
| | | 13.488 | 0.000 | 0.000 | 0.976 | 0.710 |
| 450 | 460 | 13.542 | 0.000 | 0.000 | 0.047 | 0.034 |
| | | 13.482 | 0.000 | 0.000 | 0.058 | 0.042 |
| | | 13.579 | 0.000 | 0.000 | 0.042 | 0.030 |
| 441 | 442 | 13.539 | 0.000 | 0.000 | 0.090 | 0.065 |
| | | 13.478 | 0.000 | 0.000 | 0.110 | 0.079 |
| | | 13.577 | 0.000 | 0.000 | 0.079 | 0.057 |
| 150 | 151 | 13.452 | 0.000 | 0.000 | 0.110 | 0.079 |
| | | 13.371 | 0.000 | 0.000 | 0.134 | 0.097 |

Tabela A4 - Dados de saída do alimentador PJA - 04
para o caso desequilibrado sem considerar as mútuas

| de | para | u | dp | dq | p | q |
|-----|------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | 13.498 | 0.000 | 0.000 | 0.096 | 0.070 |
| 150 | 160 | 13.450 | 0.000 | 0.000 | 0.413 | 0.299 |
| | | 13.368 | 0.000 | 0.000 | 0.506 | 0.367 |
| | | 13.496 | 0.000 | 0.000 | 0.363 | 0.263 |
| 300 | 310 | 13.434 | 0.000 | 0.001 | 1.083 | 0.788 |
| | | 13.348 | 0.000 | 0.001 | 1.327 | 0.967 |
| | | 13.482 | 0.000 | 0.001 | 0.952 | 0.692 |
| 460 | 470 | 13.542 | 0.000 | 0.000 | 0.037 | 0.026 |
| | | 13.482 | 0.000 | 0.000 | 0.045 | 0.032 |
| | | 13.579 | 0.000 | 0.000 | 0.032 | 0.023 |
| 442 | 443 | 13.538 | 0.000 | 0.000 | 0.040 | 0.029 |
| | | 13.477 | 0.000 | 0.000 | 0.049 | 0.036 |
| | | 13.576 | 0.000 | 0.000 | 0.035 | 0.026 |
| 151 | 152 | 13.452 | 0.000 | 0.000 | 0.082 | 0.060 |
| | | 13.371 | 0.000 | 0.000 | 0.101 | 0.073 |
| | | 13.498 | 0.000 | 0.000 | 0.072 | 0.052 |
| 160 | 170 | 13.448 | 0.000 | 0.000 | 0.386 | 0.279 |
| | | 13.366 | 0.000 | 0.000 | 0.472 | 0.342 |
| | | 13.494 | 0.000 | 0.000 | 0.339 | 0.245 |
| 310 | 315 | 13.430 | 0.000 | 0.000 | 1.046 | 0.762 |
| | | 13.344 | 0.000 | 0.001 | 1.282 | 0.934 |
| | | 13.479 | 0.000 | 0.000 | 0.919 | 0.669 |
| 152 | 153 | 13.452 | 0.000 | 0.000 | 0.055 | 0.040 |
| | | 13.370 | 0.000 | 0.000 | 0.067 | 0.049 |
| | | 13.498 | 0.000 | 0.000 | 0.048 | 0.035 |
| 170 | 180 | 13.446 | 0.000 | 0.000 | 0.331 | 0.240 |
| | | 13.364 | 0.000 | 0.000 | 0.405 | 0.293 |
| | | 13.493 | 0.000 | 0.000 | 0.291 | 0.211 |
| 315 | 320 | 13.427 | 0.000 | 0.000 | 1.028 | 0.748 |
| | | 13.340 | 0.000 | 0.001 | 1.259 | 0.918 |
| | | 13.476 | 0.000 | 0.000 | 0.903 | 0.657 |
| 153 | 154 | 13.452 | 0.000 | 0.000 | 0.018 | 0.013 |
| | | 13.370 | 0.000 | 0.000 | 0.022 | 0.016 |
| | | 13.498 | 0.000 | 0.000 | 0.016 | 0.012 |
| 180 | 190 | 13.444 | 0.000 | 0.000 | 0.294 | 0.213 |
| | | 13.361 | 0.000 | 0.000 | 0.360 | 0.261 |
| | | 13.491 | 0.000 | 0.000 | 0.259 | 0.187 |
| 320 | 330 | 13.393 | 0.001 | 0.004 | 0.999 | 0.725 |
| | | 13.297 | 0.002 | 0.005 | 1.224 | 0.888 |
| | | 13.446 | 0.001 | 0.003 | 0.878 | 0.637 |
| 190 | 200 | 13.443 | 0.000 | 0.000 | 0.276 | 0.200 |
| | | 13.359 | 0.000 | 0.000 | 0.338 | 0.245 |
| | | 13.490 | 0.000 | 0.000 | 0.243 | 0.176 |
| 330 | 335 | 13.393 | 0.000 | 0.000 | 0.122 | 0.088 |
| | | 13.297 | 0.000 | 0.000 | 0.149 | 0.108 |
| | | 13.446 | 0.000 | 0.000 | 0.107 | 0.077 |
| 330 | 340 | 13.365 | 0.001 | 0.002 | 0.560 | 0.406 |
| | | 13.264 | 0.001 | 0.002 | 0.686 | 0.497 |
| | | 13.422 | 0.000 | 0.001 | 0.492 | 0.357 |

Tabela A4 - Dados de saída do alimentador PJA - 04
para o caso desequilibrado sem considerar as mútuas

| de | para | u | dp | dq | p | q |
|---------------------|------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 200 | 210 | 13.441 | 0.000 | 0.000 | 0.258 | 0.187 |
| | | 13.357 | 0.000 | 0.000 | 0.316 | 0.228 |
| | | 13.488 | 0.000 | 0.000 | 0.226 | 0.164 |
| 340 | 350 | 13.362 | 0.000 | 0.000 | 0.487 | 0.353 |
| | | 13.259 | 0.000 | 0.000 | 0.596 | 0.432 |
| | | 13.419 | 0.000 | 0.000 | 0.428 | 0.310 |
| 340 | 360 | 13.361 | 0.000 | 0.000 | 0.073 | 0.053 |
| | | 13.259 | 0.000 | 0.000 | 0.089 | 0.065 |
| | | 13.419 | 0.000 | 0.000 | 0.064 | 0.046 |
| 210 | 220 | 13.440 | 0.000 | 0.000 | 0.239 | 0.173 |
| | | 13.355 | 0.000 | 0.000 | 0.293 | 0.212 |
| | | 13.487 | 0.000 | 0.000 | 0.210 | 0.152 |
| 220 | 230 | 13.436 | 0.000 | 0.000 | 0.221 | 0.160 |
| | | 13.351 | 0.000 | 0.000 | 0.271 | 0.196 |
| | | 13.484 | 0.000 | 0.000 | 0.194 | 0.141 |
| 230 | 240 | 13.435 | 0.000 | 0.000 | 0.192 | 0.139 |
| | | 13.349 | 0.000 | 0.000 | 0.235 | 0.170 |
| | | 13.483 | 0.000 | 0.000 | 0.169 | 0.122 |
| 240 | 250 | 13.435 | 0.000 | 0.000 | 0.137 | 0.099 |
| | | 13.349 | 0.000 | 0.000 | 0.168 | 0.121 |
| | | 13.483 | 0.000 | 0.000 | 0.120 | 0.087 |
| 250 | 260 | 13.432 | 0.000 | 0.000 | 0.119 | 0.086 |
| | | 13.345 | 0.000 | 0.000 | 0.145 | 0.105 |
| | | 13.480 | 0.000 | 0.000 | 0.104 | 0.076 |
| 260 | 270 | 13.431 | 0.000 | 0.000 | 0.046 | 0.033 |
| | | 13.345 | 0.000 | 0.000 | 0.056 | 0.040 |
| | | 13.480 | 0.000 | 0.000 | 0.040 | 0.029 |
| 270 | 280 | 13.431 | 0.000 | 0.000 | 0.027 | 0.020 |
| | | 13.344 | 0.000 | 0.000 | 0.034 | 0.024 |
| | | 13.479 | 0.000 | 0.000 | 0.024 | 0.017 |
| Mvar): | | | 0.104 | 0.358 | 9.282 | 7.003 |
| | | | 100 | 100 | 1.119 | 5.114 |
| Elapsed ti 1.10E-01 | | | | | | |