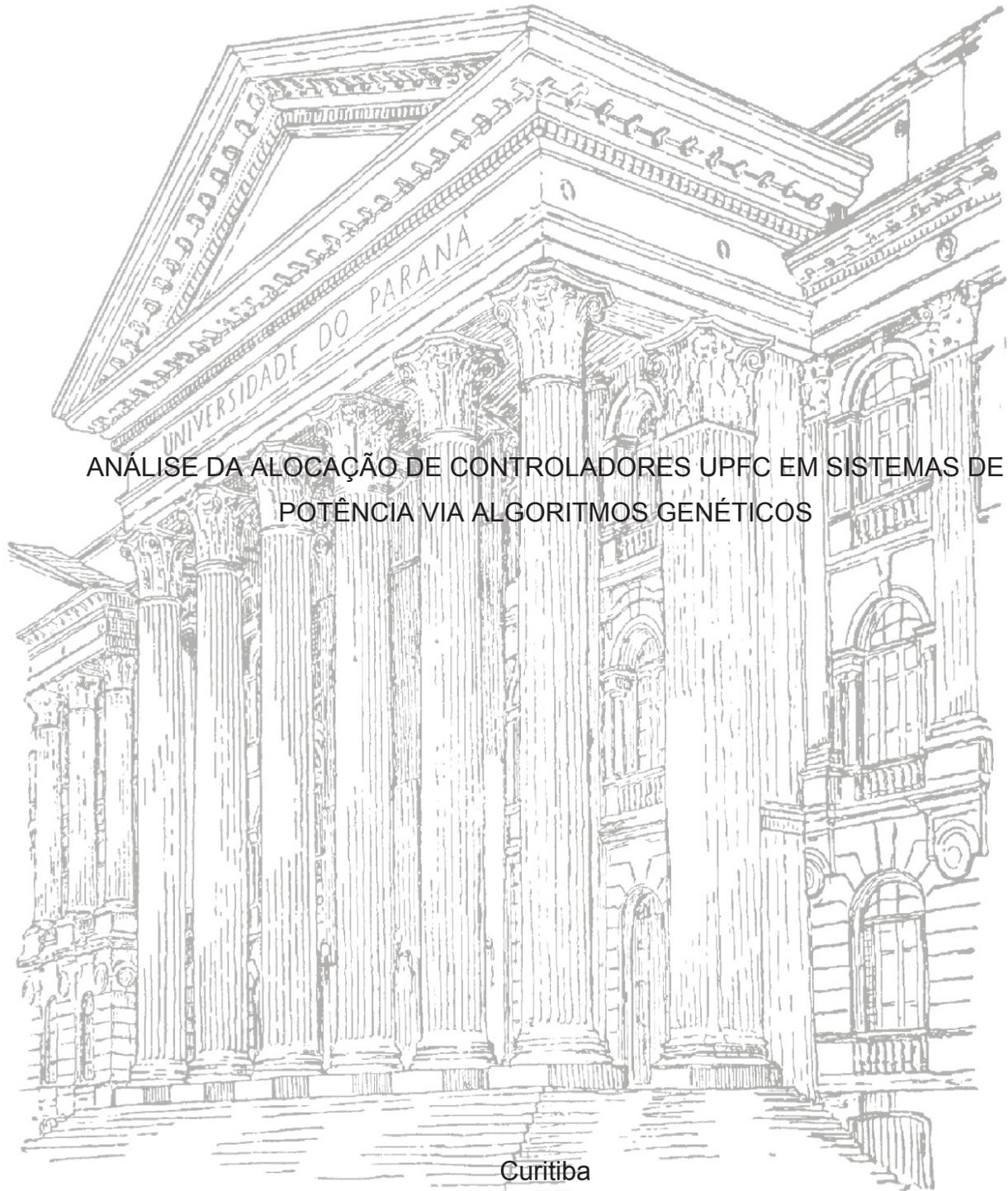


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANA LETÍCIA BORILLE FOGAÇA



ANÁLISE DA ALOCAÇÃO DE CONTROLADORES UPFC EM SISTEMAS DE
POTÊNCIA VIA ALGORITMOS GENÉTICOS

Curitiba

2009

ANA LETÍCIA BORILLE FOGAÇA

ANÁLISE DE ALOCAÇÃO DE CONTROLADORES UPFC EM SISTEMAS DE
POTÊNCIA VIA ALGORITMOS GENÉTICOS

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora:
Profª. Drª Elizete Maria Lourenço
Co-Orientador: Prof. MSc Odilon Luís Tortelli

Curitiba

2009

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

F655a Fogaça, Ana Letícia Borille
Análise de alocação de controladores UPFC em sistemas de
potência via algoritmos genéticos [recurso eletrônico] / Ana
Letícia Borille Fogaça – Curitiba, 2009.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dra. Elizete Maria Lourenço
Coorientador: Prof. MSc Odilon Luís Tortelli

I. Algoritmos Genéticos. I. Universidade Federal do Paraná. II.
Lourenço, Elizete Maria. III.. Tortelli, Odilon Luís. IV. Título.

CDD: 006.3

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

TERMO DE APROVAÇÃO

ANA LETÍCIA BORILLE FOGAÇA

ALOCAÇÃO DE CONTROLADORES UPFC EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **ANA LETÍCIA BORILLE FOGAÇA** intitulada: **Alocação de controladores UPFC em sistemas elétricos de potência**, sob orientação da Prof^a. Dr^a. ELIZETE MARIA LOURENÇO, que após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.



ELIZETE MARIA LOURENÇO

Presidente da Banca Examinadora (Universidade Federal do Paraná)



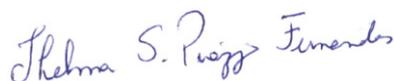
WADAED UTURBEY DA COSTA

Avaliador Externo (Universidade Federal de Minas Gerais)



ALEXANDRE RASI AOKI

Avaliador Interno (Universidade Federal do Paraná)



THELMA SOLANGE PIAZZA FERNANDES

Avaliador Interno (Universidade Federal do Paraná)

Curitiba, 28 de Setembro de 2009.

AGRADECIMENTOS

Meus principais agradecimentos vão para os meus pais, que sempre me deram total apoio e condições para que eu pudesse atingir meus objetivos com sucesso e me incentivaram em todo meu desenvolvimento.

Meus sinceros agradecimentos aos meus verdadeiros amigos que me acompanharam nestes anos de luta, compartilhando bons momentos e acima de tudo me ajudando nas horas difíceis e sempre me reconfortavam e me dando forças para continuar.

Meus agradecimentos especiais ao Professor Odilon Luís Tortelli, meu co-orientador, pela sua orientação e dedicação, pelos seus ensinamentos e que sempre se mostrou disposto a me ouvir e me ajudar nos momentos de dúvidas e nos momentos mais decisivos.

À Professora Doutora Elizete Maria Lourenço, minha Orientadora, pelos seus conselhos e palavras de incentivo durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

À Professora Doutora Thelma Solange Piazza Fernandes e ao Professor Doutor Alexandre Rasi Aoki, que participaram da banca de qualificação e da banca de defesa final dessa dissertação, contribuindo através dos seus conhecimentos e experiência com excelentes observações e complementações para a finalização deste trabalho.

À Professora Doutora Wadaed Uturbey da Costa da Universidade Federal de Minas Gerais, pelas dicas e sugestões e contribuições feitas em relação a este trabalho durante a defesa deste trabalho.

E a todos os outros que não foram mencionados aqui, mas que direta ou indiretamente me ajudaram na conclusão deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma metodologia para alocação de Controladores FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) do tipo UPFC *Unified Power Flow Controller*) baseada na análise de fluxo de potência e empregando a técnica de Algoritmos Genéticos. Os Controladores UPFC podem ser utilizados para aumentar a transferência de potência, atuando no controle tanto do fluxo de potência ativa como reativa, e também na melhoria do perfil de tensão do sistema elétrico. A fim de avaliar aspectos técnicos da operação em regime permanente, como nível de perdas e desvio de tensão, é utilizado um programa computacional para cálculo de fluxo de potência baseado no método Newton-Raphson que incorpora o modelo do Controlador UPFC. O controlador UPFC é representado no programa de fluxo de potência como associação de dois conversores VSC (*Voltage Source Converter*), sendo um deles conectado em série e o outro em conexão shunt. A questão da localização ideal de UPFCs na rede elétrica em estudo é tratada através de um processo de otimização via Algoritmos Genéticos. A comprovação da validade da metodologia desenvolvida é verificada através da análise de dois sistemas teste, um de pequeno e outro de médio porte, considerando diferentes cenários de carga para cada caso. Foram consideradas a alocação de até três Controladores UPFC simultaneamente. A análise dos resultados indica uma melhoria significativa no nível de perdas ativas e no perfil de tensão dos sistemas estudados, a partir da alocação eficiente de Controladores UPFC, obtida pela metodologia desenvolvida.

Palavras-chave: Alocação de FACTS, UPFC, Algoritmos Genéticos.

ABSTRACT

A methodology to allocate UPFC (Unified Power Flow Controller), one of the most powerful FACTS (Flexible AC Transmission System) Controllers, is presented in this work. The methodology is based on power flow analysis and Genetics Algorithms technique. UPFC Controllers can be applied to increase the power transfer capability, managing active and reactive power flows as well as voltage profile of the power system. In order to evaluate steady-state operation aspects, like loss levels and voltage deviations, a model of the UPFC is incorporated at a power flow algorithm, based on Newton-Raphson method. The UPFC is represented at power flow algorithm as an association of two VSC (Voltage Source Converter), one connected as a series device and the other as a shunt device. The issue of UPFC allocation in a certain power network is treated as an optimization process via Genetics Algorithms. The developed methodology is tested by simulation of two, small and medium size, test systems, both in different load scenarios. Up to three UPFCs are considered to be allocated simultaneously. The results presented demonstrate a expressive improvement in the active loss level and voltage profile of the systems tested after the efficient allocation of UPFCs, obtained by the proposed methodology.

Key words: FACTS allocation, UPFC, Genetics Algorithms.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1.1: MAPA DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL | 17 |
| FIGURA 2.1: FACTS – PRIMEIRA GERAÇÃO – PARALELO..... | 26 |
| FIGURA 2.2: FACTS – PRIMEIRA GERAÇÃO – SÉRIE..... | 27 |
| FIGURA 2.3: FACTS – SEGUNDA GERAÇÃO – PARALELO..... | 27 |
| FIGURA 2. 4: FACTS – SEGUNDA GERAÇÃO – SÉRIE..... | 28 |
| FIGURA 2.5: FACTS – TERCEIRA GERAÇÃO – UPFC..... | 28 |
| FIGURA 2.6: FACTS – QUARTA GERAÇÃO – IPFC..... | 29 |
| FIGURA 2.7: ESQUEMA SIMPLIFICADO DO STATCOM E DO SISTEMA ELÉTRICO E DIAGRAMA FASORIAL DAS TENSÕES..... | 34 |
| FIGURA 2.8: DIAGRAMAS FASORIAIS DAS TENSÕES E CORRENTES DO SISTEMA ELÉTRICO E DO STATCOM..... | 35 |
| FIGURA 2.9: ESQUEMA BÁSICO DO STATCOM..... | 36 |
| FIGURA 2.10: TOPOLOGIAS DE CONDENSADORES DO LADO DE CORRENTE CONTÍNUA..... | 37 |
| FIGURA 2.11: TOPOLOGIA COM CONDENSADORES INDIVIDUAIS PARA CADA INVERSOR..... | 37 |
| FIGURA 2.12: DIAGRAMA DE BLOCOS DO SSSC CONECTADO A UMA LINHA DE TRANSMISSÃO..... | 38 |
| FIGURA 2.13: CONFIGURAÇÃO BÁSICA DE UM UPFC | 39 |
| FIGURA 3.1: ESQUEMA REPOSIÇÃO POPULACIONAL EM UM ALGORITMO GENÉTICO | 45 |
| FIGURA 3.2: (A) DOIS INDIVÍDUOS SÃO ESCOLHIDOS; (B) UM PONTO (4) DE CROSSOVER É ESCOLHIDO; (C) SÃO RECOMBINADAS AS CARACTERÍSTICAS, GERANDO DOIS NOVOS INDIVÍDUOS..... | 48 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 3.3:(A) DOIS INDIVÍDUOS SÃO ESCOLHIDOS;(B) DOIS PONTOS DE CROSSOVER SÃO ESCOLHIDOS (2 E 4); (C) SÃO RECOMBINADAS AS CARACTERÍSTICAS, GERANDO DOIS NOVOS INDIVÍDUOS. ... | 49 |
| FIGURA 4.1: REPRESENTAÇÃO EQUIVALENTE DO CONVERSOR UPFC | 51 |
| FIGURA 4.2: REPRESENTAÇÃO BINÁRIA PARA UM UPFC..... | 55 |
| FIGURA 4.3: REPRESENTAÇÃO DE UM INDIVÍDUO RELATIVO A ALOCAÇÃO DE N UPFCS | 55 |
| FIGURA 4.4: ESTRUTURA DO PROCESSO DE SIMULAÇÃO | 58 |
| FIGURA 5.1: DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA TESTE DA IEEE DE 14 BARRAS | 62 |
| FIGURA 5.2: COMPARATIVO DOS NÍVEIS DE PERDAS ATIVAS PARA O SISTEMA DE 14 BARRAS..... | 64 |
| FIGURA 5.3: COMPARATIVO DOS NÍVEIS DE PERDAS NAS LTS DO SISTEMA DE 14 BARRAS ANTES E APÓS A INSTALAÇÃO DO UPFC | 64 |
| FIGURA 5.4: COMPARATIVO DOS NÍVEIS DE DESVIO DE TENSÃO PARA SISTEMA DE 14 BARRAS..... | 65 |
| FIGURA 5.5: COMPARATIVO DO PERFIL DE TENSÃO DO SISTEMA DE 14 BARRAS ANTES E APÓS A INSTALAÇÃO DOS UPFCS | 66 |
| FIGURA 5.6: ÍNDICES NORMALIZADOS DE PERDAS E DESVIOS DE TENSÃO PARA SISTEMA DE 14 BARRAS | 67 |
| FIGURA 5.7: DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA TESTE IEEE 118 BARRAS | 68 |
| FIGURA 5.8: COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS DE PERDAS ATIVAS PARA O SISTEMA DE 118 BARRAS | 71 |
| FIGURA 5.9: ANÁLISE DOS DESVIOS DE TENSÃO PARA SISTEMA DE 118 BARRAS | 72 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 5.10: ANÁLISE DOS ÍNDICES DE PERDAS E DESVIO DE TENSÃO PARA SISTEMA IEEE DE 118 BARRAS..... | 73 |
| FIGURA 5.11: ÍNDICES DE PERDAS ATIVA E DESVIO DE TENSÃO PARA SISTEMAS DE 14 BARRAS. | 75 |
| FIGURA 5.12: ANÁLISE DOS ÍNDICES DE PERDAS E DESVIO DE TENSÃO PARA SISTEMA DE 118 BARRAS..... | 76 |
| FIGURA 5.13: DESENHO ESQUEMÁTICO DAS OPÇÕES DE ALOCAÇÃO DO UPFC PARA O SISTEMA DE 14 BARRAS. | 77 |
| FIGURA 5.14: DESENHO ESQUEMÁTICO DAS OPÇÕES DE ALOCAÇÃO DO UPFC PARA O SISTEMA DE 118 BARRAS. | 78 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 4.1: CONVENÇÃO PARA O FATOR DE COMPENSAÇÃO REATIVA DO UPFC | 55 |
| TABELA 5.1: LISTA DE RAMOS NÃO APTOS À RECEBER O UPFC PARA O SISTEMA DE 14 BARRAS..... | 63 |
| TABELA 5.2: RESULTADOS DOS NÍVEIS DE PERDAS EM P.U. PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS. | 63 |
| TABELA 5.3: RESULTADOS PARA DESVIO DE TENSÃO EM P.U. PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS..... | 65 |
| TABELA 5.4: RESULTADOS PARA PERDAS E DESVIO DE TENSÃO PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS..... | 66 |
| TABELA 5.5: LISTA DE RAMOS NÃO APTOS À RECEBER O UPFC PARA O SISTEMA DE 118 BARRAS..... | 69 |
| TABELA 5.6: NÍVEIS DE PERDAS ATIVAS PARA O SISTEMA IEEE 118 BARRAS. | 70 |
| TABELA 5.7: RESULTADOS PARA DESVIO DE TENSÃO PARA O SISTEMA IEEE 118 BARRAS. | 71 |
| TABELA 5.8: RESULTADOS PARA AS PERDAS E DESVIO DE TENSÃO PARA O SISTEMA IEEE 118 BARRAS..... | 72 |
| TABELA 5.9: RESULTADOS PARA PERDAS E DESVIO DE TENSÃO PARA O SISTEMA IEEE DE 14 BARRAS..... | 74 |
| TABELA 5.10: RESULTADOS PARA PERDAS E DESVIO DE TENSÃO PARA O SISTEMA IEEE 118 BARRAS..... | 75 |
| TABELA 5.11: EFEITO DO EMPREGO DA MEMÓRIA NO TEMPO DE PROCESSAMENTO | 79 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|--------------------|--|
| AGs | <i>Algoritmos Genéticos</i> |
| ASC | <i>Advance Series Compensation</i> |
| ASVC | <i>Advanced Static VAr Compensator</i> |
| ASVG | <i>Advanced Static VAr Generator or Absorber</i> |
| CCAT | <i>Corrente Contínua em Alta Tensão</i> |
| CFT | <i>Conversor tipo Fonte de Tensão</i> |
| D-STATCOM | <i>Distribution Static Synchronous Compensator</i> |
| EPRI | <i>Electric Power Research Institute</i> |
| ESERCO | <i>Empire State Energy Research Corporation</i> |
| FACTS | <i>Flexible AC Transmission Systems</i> |
| FC | <i>Fixed Capacitor</i> |
| FPO | <i>Fluxo de potência ótimo</i> |
| GCT | <i>Gate Commutated Thyristor</i> |
| GTO | <i>Gate turn-off Thyristor</i> |
| HiGT | <i>High-Conductivity IGBT</i> |
| HVDC | <i>High Voltage Direct Current</i> |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> |
| IGBT | <i>Integrated Gate Bipolar Transistor</i> |
| IGCT | <i>Integrated Gate Commutated Thyristor</i> |
| IPFC | <i>Interline Power Flow Controller</i> |
| ONS | <i>Operador Nacional do Sistema Elétrico</i> |
| PFC | <i>Programa de Fluxo de Carga</i> |
| PLL | <i>Phase Locked Loop</i> |
| PST | <i>Phase Shifting Transformer</i> |
| PWM STATCOM | <i>Pulse Width Modulation Static Synchronous Compensator</i> |

| | |
|----------------|---|
| RCT | <i>Reator Controlado a Tiristor</i> |
| SA | <i>Simulated Annealing</i> |
| SEP | <i>Sistemas Elétricos de Potência</i> |
| SIN | <i>Sistema Interligado Nacional</i> |
| SIPCON | <i>Siemens Power Conditioner</i> |
| SSR | <i>Subsynchronous. Resonance</i> |
| SSSC | <i>Static Synchronous Series Compensator</i> |
| STATCOM | <i>Static Synchronous Compensator</i> |
| SVC | <i>Static VAr Compensator</i> |
| SVG | <i>Static VAr Generator or Absorber</i> |
| TCR | <i>Thyristor Controlled Reactor</i> |
| TCPS | <i>Thyristor Controlled Phase Shifter</i> |
| TCSC | <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i> |
| TCVR | <i>Thyristor Controlled Voltage Regulator</i> |
| TS | <i>Tabu Search and</i> |
| TSC | <i>Thyristor Switched Capacitor</i> |
| TSSC | <i>Thyristor Switched Series Capacitor</i> |
| TVA | <i>Tennessee Valley Authority</i> |
| UPFC | <i>Unified Power Flow Controller</i> |
| ZVS | <i>Zero Voltage Switching</i> |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 | INTRODUÇÃO AO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO | 17 |
| 1.2 | MOTIVAÇÃO DO TRABALHO | 18 |
| 1.3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 20 |
| 1.4 | OBJETIVOS | 23 |
| 1.5 | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 23 |
| 2 | CONTROLADORES FACTS | 24 |
| 2.1 | INTRODUÇÃO | 24 |
| 2.2 | CONTROLADORES FACTS | 25 |
| 2.3 | TIPOS DE EQUIPAMENTOS FACTS | 26 |
| 2.3.1 | FACTS Chaveados | 29 |
| 2.3.2 | FACTS Controlados | 30 |
| 2.3.3 | FACTS Avançados | 31 |
| 2.3.3.1 | STATCOM - <i>Static Synchronous Compensator</i> | 31 |
| 2.3.3.2 | SSSC – " <i>Static Synchronous Series Compensator</i> " | 37 |
| 2.3.3.3 | UPFC - " <i>Unified Power Flow Controller</i> " | 39 |
| 2.4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 41 |
| 3 | ALGORITMOS GENÉTICOS | 42 |
| 3.1 | INTRODUÇÃO | 42 |
| 3.2 | REPRESENTAÇÃO DE UMA CONFIGURAÇÃO CANDIDATA..... | 44 |
| 3.3 | FUNÇÃO OBJETIVO..... | 44 |
| 3.4 | POPULAÇÃO INICIAL..... | 45 |
| 3.5 | CICLO GERACIONAL | 45 |
| 3.6 | SELEÇÃO..... | 46 |
| 3.7 | RECOMBINAÇÃO | 47 |
| 3.8 | MUTAÇÃO..... | 49 |
| 3.9 | CRITÉRIO DE PARADA..... | 49 |
| 3.10 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 49 |
| 4 | METODOLOGIA | 51 |
| 4.1 | INTRODUÇÃO | 51 |
| 4.2 | MODELAGEM DO UPFC PARA O FLUXO DE POTÊNCIA..... | 51 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.2.1 | Considerações quanto ao tratamento dos parâmetros de controle do UPFC | 53 |
| 4.3 | CODIFICAÇÃO DOS INDIVÍDUOS DO AG..... | 54 |
| 4.3.1 | Considerações quanto à Pré-Seleção | 55 |
| 4.4 | FUNÇÕES <i>FITNESS</i> DOS AGS..... | 56 |
| 4.5 | SISTEMA DE MEMÓRIA..... | 57 |
| 4.6 | ESTRUTURA DE PROCESSAMENTO | 58 |
| 4.7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 59 |
| 5 | SIMULAÇÕES E RESULTADOS | 60 |
| 5.1 | INTRODUÇÃO | 60 |
| 5.2 | RESULTADO PARA CADA CONDIÇÃO DE CARGA | 61 |
| 5.2.1 | Resultado para o Sistema de 14 Barras | 61 |
| 5.3 | RESULTADOS PARA O SISTEMA DE 118 BARRAS | 68 |
| 5.4 | RESULTADOS PARA O CENÁRIO DE CARGA PONDERADA | 74 |
| 5.4.1 | Resultado para o Sistema de 14 Barras | 74 |
| 5.4.2 | Resultado para o sistema de 118 barras | 75 |
| 5.5 | DESEMPENHO DA MEMÓRIA | 79 |
| 5.6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 79 |
| 6 | CONCLUSÕES | 80 |
| 6.1 | INTRODUÇÃO | 80 |
| 6.2 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 80 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 82 |
| | APÊNDICE A: FLUXO DE POTÊNCIA | 84 |
| | A – 1 FLUXO DE POTÊNCIA – HISTÓRICO DE EVOLUÇÃO | 84 |
| | A – 1.1 HISTÓRICO | 84 |
| | A – 1.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO FLUXO DE POTÊNCIA..... | 84 |
| | A – 1.3 FLUXO DE POTÊNCIA GAUSS-SEIDEL..... | 84 |
| | A – 1.4 FLUXO DE POTÊNCIA NEWTON-RAPHSON | 85 |
| | A – 1.5 FLUXO DE POTÊNCIA DESACOPLADO RÁPIDO | 85 |
| | A – 1.5.1 VARIANTES DO FLUXO DE POTÊNCIA DESACOPLADO RÁPIDO | 86 |
| | A – 1.6 FLUXOS DE POTÊNCIA APROXIMADOS | 87 |
| | A – 2 IMPORTÂNCIA DA POTÊNCIA REATIVA NOS SEP | 88 |
| | A – 2.1 POTÊNCIA REATIVA..... | 88 |

| | |
|---|------------|
| A – 2.1.1 Necessidade de Potência Reativa | 90 |
| A – 2.1.2 Compensadores de Potência Reativa num SEP. | 91 |
| A – 3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DO FLUXO DE POTÊNCIA | 92 |
| A – 3.1 EQUACIONAMENTO DO FLUXO DE POTÊNCIA | 92 |
| A – 3.2 O PROBLEMA DO FLUXO DE POTÊNCIA EM UM SISTEMA REAL | 94 |
| A – 4 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON NO CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA | 95 |
| A – 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 95 |
| A – 4.2 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON..... | 96 |
| A – 4.3 APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES DO FLUXO DE POTÊNCIA..... | 97 |
| ANEXO A | 104 |
| A.1 – INTRODUÇÃO | 104 |
| A 1.1 SISTEMA DE TESTE IEEE 14 BARRAS | 104 |
| A 1.1.1 Dados das Barras | 105 |
| A 1.1.2 Dados das Linhas: | 105 |
| A 1.1.3 Arquivo de Dados para o Matlab: | 106 |
| A 1.2 SISTEMA DE TESTE IEEE 118 BARRAS | 107 |
| A 1.2.1 Dados das Barras | 108 |
| A 1.2.2 Dados das Linhas | 110 |
| A 1.2.3 Arquivo de dados para o matlab: | 114 |

equilibrar crescimento de energia com proteção ambiental, a reestruturação, a desregulamentação e a falta de investimentos (Miazaki, 2006). O aumento dos custos e das restrições ambientais tornou impraticável a estratégia de sobredimensionamento e, dificultou a construção de novas unidades de produção e linhas de transmissão. Esse conjunto de fatores contribui para que o sistema existente apresente dificuldades frente ao aumento contínuo da demanda e, como consequência, surge a necessidade de se adotar novas estratégias para operação e planejamento do sistema.

1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A complexidade da operação e planejamento de um sistema de potência se deve, em grande parte, a problemas relacionados com o sistema de transmissão, que tem como função prover a interligação entre áreas de maneira eficiente e flexível e, fazer com que a potência gerada chegue aos consumidores de forma ininterrupta.

As linhas de transmissão estão sujeitas aos limites térmicos e/ou de estabilidade, que restringem o nível de potência que pode ser transmitido com segurança. Tais limites criam pontos de congestionamento na rede de transmissão. Esses pontos não são fixos; eles se modificam de acordo com as alterações nos fluxos de potência resultantes do despacho de geração, das características da carga e das contingências (WATANABE, et al. 1997). Portanto, torna-se cada vez mais importante controlar o fluxo de potência nas linhas de transmissão, para direcioná-los para regiões que possuam capacidade ociosa de transporte, aliviando, assim, as regiões de sobrecarga.

Os problemas gerados pela presença desses pontos de congestionamento no sistema de transmissão são: baixa capacidade de carregamento, necessidade de re-despacho da geração, capacidade extra de geração ou importação de energia, pontos de operação não-econômicos (MIASAKI, 2006). Além desses problemas, as incertezas e os custos de investimentos no sistema também contribuem para a falta de capacidade de transmissão de energia.

Buscam-se soluções alternativas para o problema de suprimento elétrico, através de inovações tecnológicas na área de transmissão de energia elétrica a fim de aumentar a capacidade de transporte e melhorar o controle do sistema existente

tornando-o mais aproveitável, tendo em vista a necessidade de maior eficiência na gestão dos sistemas elétricos.

Além disso, os planejadores e operadores trabalham com sistemas cada vez mais dinâmicos e com menor margem operacional, conseqüentemente, eles precisam ter uma maior flexibilidade para interagir com a maior diversidade dos padrões de geração e carga.

Embora o conceito de flexibilidade seja bastante geral, no que diz respeito aos sistemas elétricos, ele é definido como: “a habilidade dos sistemas de potência em se adaptarem rapidamente a novas circunstâncias, de modo a operarem permanentemente da melhor forma possível” (CAVALIERE, 2001).

Neste sentido, a aplicação de novos dispositivos desenvolvidos com os avanços da eletrônica de potência, os chamados Controladores FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*) vem ao encontro deste novo cenário que se apresenta para o setor elétrico. A tecnologia de FACTS vem sendo objeto de muita atenção, resultando na concepção de vários novos dispositivos que são desenvolvidos com dois objetivos principais: aumentar a capacidade de transmissão de potência das redes elétricas e controlar diretamente o fluxo de potência em trajetos específicos de transmissão.

Um outro fator que tem evoluído bastante nas últimas décadas na área de sistemas de potência é a aplicação de métodos de otimização. Esses métodos são muito eficientes e poderosos, já que são capazes de contribuir para a obtenção de um melhor desempenho elétrico e econômico do sistema de potência.

Além disso, a evolução observada na área de informática contribui para as simulações computacionais, com modelos que representem o problema de planejamento, possam ser realizadas em máquinas com melhor desempenho. Como conseqüência, existe a expectativa de uma melhoria sensível no processamento de operações para a resolução de modelos matemáticos considerados complexos. Também contribui para a resolução desses modelos o surgimento de novas técnicas de solução e a evolução das existentes.

Baseado nestes aspectos apresenta-se neste trabalho uma metodologia para alocação de um dos controladores FACTS mais promissores, o UPFC (*Unified Power Flow Controller*). Para tanto, será feita a implementação computacional de um programa de fluxo de potência que incorpore tal controlador, e associando-o a uma rotina de otimização via Algoritmos Genéticos.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção tem como objetivo descrever alguns estudos que já foram realizados utilizando Algoritmos Genéticos para análise de alocação ótima de Controladores FACTS.

Os Controladores FACTS podem ser divididos em dois grandes grupos: os compensadores ligados em paralelo à rede e os ligados em série.

Dentre os controladores ligados em série temos o TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*), TSSC (*Thyristor Switched Series Capacitor*), SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*).

Dentre os controladores ligados em paralelo temos o SVC (*Static Var Compensator*), TSC (*Thyristor Switched Capacitor*), STATCOM (*Static Synchronous Compensator*).

Há também controladores constituídos pela associação de um controlador série com um controlador paralelo. Um exemplo disso é o Controlador UPFC (*Unified Power Flow Controller*).

O controlador UPFC, que é constituído, basicamente, do agrupamento do STATCOM com o SSSC num único equipamento, é capaz de controlar simultaneamente o fluxo de potência que passa por uma linha de transmissão, e a magnitude da tensão da barra em que está conectado.

Um grande número de trabalhos tem sido publicados nos últimos anos tratando de diversas técnicas para determinação de locais adequados a implantação de Controladores FACTS numa rede elétrica, mostrando o interesse e a relevância desse tema.

De acordo com Peterni, Vivete Bena (1999), a utilização de Controladores FACTS ligados em série pode ajudar a melhorar a distribuição de carga nas linhas de transmissão aumentando assim a capacidade de carga nas redes e promovendo uma redução nos custos da produção de energia. Neste mesmo trabalho os autores propõem um índice para medir o benefício de um determinado conjunto de controladores FACTS, sendo a alocação ótima do conjunto de controladores determinada pela técnica de Algoritmos Genéticos.

Já em Chung e Li (2001), é proposto um estudo utilizando o Fluxo de Potência Ótimo (FPO) juntamente com os AGs para incorporação de dispositivos FACTS nos sistemas de potência. O FPO é utilizado para selecionar os melhores parâmetros de controle para minimizar o custo total de geração e manter os fluxos de energia dentro dos limites de segurança. A utilização de um AG híbrido foi proposta em função de que os parâmetros controláveis dos dispositivos FACTS não podem ser adicionados diretamente nas técnicas de FPO convencionais por alterarem a matriz admitância. Os autores demonstram a viabilidade do método aplicado a controladores TCPS (*Thyristor Controlled Phase Shifter*) e o TCSC.

Bhasaputra e Ongsakul (2003), propõem o posicionamento de quatro dispositivos FACTS para minimizar o custo total da geração para diversos tipos de cargas, utilizando para isso o sistema de abordagem híbrida – Busca Tabu e Recozimento Simulado – TS/SA (*Tabu Search and Simulated Annealing*). Os autores consideram quatro tipos de dispositivos, sendo eles o TCSC, TCPS, UPFC e o SVC. Os resultados obtidos indicaram que a aproximação TS/SA pode obter melhores resultados que a aproximação por índice de sensibilidade.

Gerbex, Cherkaoui e Germond (2003), fazem a comparação entre três métodos heurísticos (AS, TS, e AG) para alocação ótima de dispositivos FACTS em sistemas de potência. Eles utilizam para isso três tipos de parâmetros (localização, tipo e dimensão). Estes dispositivos são alocados a fim de reforçar a segurança nos sistemas de potência. Para esta análise os autores consideram cinco tipos de dispositivos (TCSC, TCVR (*Thyristor Controlled Voltage Regulator*), TCPST (*Thyristor Controlled Phase-Shifting Transformer*), SVC e o UPFC). Após apresentarem simulações com o sistema teste de 118 barras da IEEE (*Instituto of Electrical and Electronics Engineers*), ficou constatado que os Controladores FACTS podem ser utilizados para aumentar a margem de segurança do sistema, e que esta margem depende do número de dispositivos, sendo este um valor limitado. As análises mostraram que os três métodos convergem a resultados semelhantes, mas geralmente o TS e o AG convergem mais rápido do que o SA para uma solução ideal.

Cai, Erlich e Stamtisis (2004), utilizam os Algoritmos Genéticos para fazer a escolha e alocação ótima de dispositivos FACTS em sistemas multi-máquinas de potência sendo que o objetivo é a alocação e o despacho econômico em sistemas de potência no mercado desregulamentado de eletricidade. As alocações dos dispositivos FACTS, seus tipos e classificações são otimizados simultaneamente. Os

autores consideram para este estudo os seguintes dispositivos FACTS: o UPFC, o TCSC, o TCPST e o SVC. Além disso, os custos de investimentos destes dispositivos também são levados em consideração.

Já Belpiede e Kagan (2005) utilizam os AGs para otimização do fluxo de potência ativa em sistemas de elétricos de subtransmissão. Utilizam para isso uma metodologia de codificação e decodificação dos indivíduos que compõem as populações dos algoritmos e a representação impondo soluções viáveis relacionadas a sistemas elétricos conexos, o que torna mais eficiente a convergência do processo. Os autores consideram que a função objetivo e as restrições do problema, que envolvem níveis de tensão e carregamento do sistema como sendo a função avaliação do algoritmo responsável pela indicação de boas configurações de rede.

A codificação proposta pelos autores para as *strings* é muito eficiente, pois considera a configuração tanto radial quanto em malha das redes elétricas de subtransmissão, permitindo a rápida determinação de soluções para o problema de otimização do fluxo de potência ativa desses sistemas. A metodologia proposta auxilia os estudos pré-operativos e contribui para o planejamento operacional de sistemas elétricos de subtransmissão. Apesar do algoritmo proposto pelos autores ainda precisar de alguns aprimoramentos e novas considerações das funções de avaliação para adequação dos objetivos necessários aos problemas reais e de interesse das empresas concessionárias de energia elétrica, os resultados alcançados no campo da otimização da configuração de redes de subtransmissão de energia elétrica através de AG são muito promissores.

No trabalho de Ippolito, La Cortiglia e Petrocelli (2006) é proposto o estudo da alocação ótima de dispositivos FACTS utilizando para isso o FPO Multi-Objetivo e os AGs. Consideram para alocação do UPFC por ser um dispositivo que tem a capacidade de regula o fluxo de energia e minimizar as perdas nos sistemas de potência simultaneamente. Neste trabalho os autores utilizam os AGs para identificar a quantidade e a localização ideais visando maximizar a capacidade de transmissão de um sistema sem prejudicar a confiabilidade do mesmo. Os resultados apresentados deste artigo mostram os benefícios da aplicação dos FACTS para aumentar a transferência de potência e revelam a viabilidade da abordagem proposta.

Tendo em vista às inúmeras pesquisas e estudos que já foram feitas sobre os controladores FACTS e sobre os AGs, e que ainda é muito vasta e muito promissora

essa linha de pesquisa, neste trabalho será abordada uma nova metodologia de alocação desses controladores como mostrado no item seguinte.

1.4 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver e implementar uma metodologia de alocação de controladores UPFC baseada na técnica de otimização de Algoritmos Genéticos.

Pretende-se também analisar os resultados obtidos com a implementação, a fim de confirmar tal metodologia como uma ferramenta que sirva de auxílio na decisão de incorporar tais controladores à uma determinada rede elétrica.

Além disso, serão avaliados os efeitos da incorporação de técnicas visando tornar mais eficiente o processo de simulação.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além deste capítulo, existem mais cinco capítulos que estão organizados da seguinte forma:

No capítulo 2, é dada uma visão geral sobre os controladores FACTS, sendo apresentados os tipos e as características desses equipamentos. Os controladores Statcom e SSSC serão estudados mais detalhadamente pois fazem parte da estrutura de um controlador UPFC.

No capítulo 3, apresenta-se a teoria sobre Algoritmos Genéticos, que é mostrada de forma mais minuciosa, sendo apresentado um breve histórico; e como devem ser implementados: a codificação, a função objetivo, a população inicial, o ciclo geracional, o critério de parada, até os parâmetros necessários para a sua execução.

No capítulo 4 são descritos os detalhes sobre a formulação matemática, implementação computacional, e a metodologia utilizada para alocação dos dispositivos FACTS.

No capítulo 5 são apresentadas as simulações e os resultados dos testes obtidos com as metodologias propostas. Este capítulo visa mostrar os benefícios da adição de controladores FACTS nos sistemas de potência.

Finalmente, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2 CONTROLADORES FACTS

2.1 INTRODUÇÃO

A necessidade de maior eficiência na operação dos sistemas elétricos tem impulsionado inovações tecnológicas na área de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Mundialmente, os sistemas de transmissão e distribuição são submetidos continuamente a mudanças e reestruturação. Esses sistemas são levados a operar próximo aos seus limites operacionais e devem ser flexíveis para interagir com a maior diversidade dos padrões de geração e carga, sendo que a utilização econômica dos ativos das concessionárias é de vital importância para sobrevivência em um ambiente competitivo.

Investimentos na otimização dos sistemas elétricos configuraram-se em fator importante de suporte às indústrias, criando empregos e utilizando eficientemente os recursos energéticos e financeiros.

Indústrias de componentes semicondutores vêm produzindo chaves que podem operar com limites de tensão de bloqueio e capacidade de corrente de pulso de valores de até 4,5 kV e 150 kA. Isto permite a aplicação da eletrônica de potência em equipamentos industriais e nos sistemas elétricos de maneira geral, auxiliando deste modo, no funcionamento de equipamentos existentes, ou até substituindo métodos convencionais, proporcionando meios mais rápidos de controle e chaveamentos e formas mais eficientes e econômicas de condicionamento e utilização de energia elétrica.

Em sistemas de potência, a utilização de componentes eletrônicos teve seu início nos projetos dos sistemas de transmissão de Corrente Contínua em Alta Tensão (CCAT) ou, em inglês, *High Voltage Direct Current* (HVDC). Estes sistemas utilizam conversores de corrente alternada para corrente contínua, e vice-versa, controlados por chaves tiristorizadas.

O controle das chaves semicondutoras permite o desenvolvimento de equipamentos capazes de realizar rápidas alterações nas características do sistema elétrico. Estes equipamentos operam dentro dos conceitos FACTS, que é a

abreviação da expressão: *Flexible Alternating Current Transmission System*, criado por (HINGORANI e GYUGYI, 2000).

Será descrito a seguir, o estado da arte destes controladores, que é de vital importância para o estudo, pois um destes controladores é utilizado para análise neste trabalho.

2.2 CONTROLADORES FACTS

O conceito de flexibilização de sistemas começou a ser implementado a partir do final da década de 60, mas a sigla FACTS, (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*), só passou a existir a partir de 1988, através de (HINGORANI e GYUGYI, 2000).

O conceito FACTS define o uso de equipamentos que utilizam a eletrônica de potência e que permitem maior flexibilidade de controle dos sistemas elétricos, de modo a obter um sistema mais confiável, flexível e eficaz. Neste caso, entende-se flexibilidade como a capacidade de rápida e contínua alteração dos parâmetros (nível de tensão, impedâncias de transferências e ângulo de transmissão) que controlam a dinâmica de funcionamento de um sistema elétrico.

Inicialmente o transporte de potência AC ao longo de linhas longas foi limitado pela impedância série da linha. A compensação série capacitiva foi introduzida há décadas para cancelar a parte reativa da impedância da linha e por isso aumentar a potência transmitida. Posteriormente, com o advento dos Controladores FACTS, foi demonstrado que a compensação série pode ser aplicada para atingir a total utilização das linhas de transmissão controlando o fluxo de potência das linhas, prevenindo fluxos circulantes e, com o emprego de controles de atuação rápida, minimizar os efeitos das perturbações no sistema.

A seguir são destacadas algumas das principais vantagens do emprego de controladores FACTS em sistemas elétricos de potência:

- Regulação de tensão em sistemas elétricos fracos;
- Redução de perdas na transmissão;
- Aumento da capacidade de transmissão;
- Aumento dos limites de estabilidade transitória;
- Amortecimento de oscilações;

2.3 TIPOS DE EQUIPAMENTOS FACTS

Os equipamentos FACTS são divididos em dois grandes grupos: os compensadores ligados em paralelo à rede e os compensadores ligados em série (HINGORANI e GYUGYI, 2000).

Além desta divisão (CAVALIERE, 2001) classifica os equipamentos FACTS em gerações. Na primeira geração temos os equipamentos FACTS utilizando tiristores, chaves semicondutoras cujas características são apresentadas por (MOHAN, UNDELAND e ROBINS, 1995) e (Bose, 1986).

Exemplos de equipamentos ligados em paralelo à rede e pertencentes à primeira geração são: o TCR (*Thyristor Controlled Reactor*), o TSC (*Thyristor Switched Capacitor*) e o SVC (*Static var Compensator*). Diagramas destes equipamentos são mostrados na Figura 2.1.

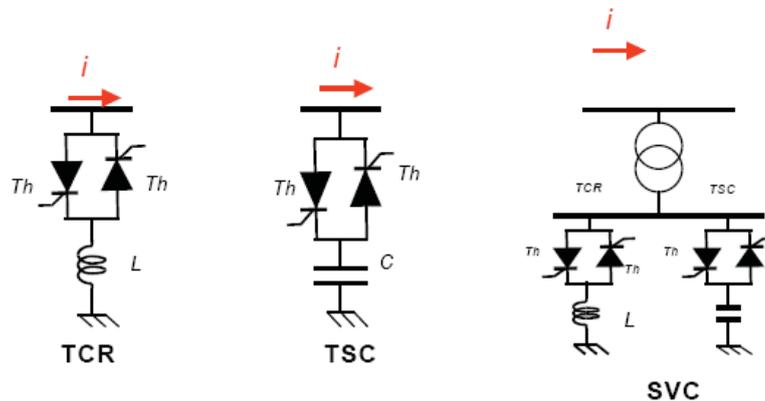


Figura 2.1: FACTS – primeira geração – paralelo.

Exemplos de equipamentos ligados em série à rede e pertencentes à primeira geração são: o TSSC (*Thyristor Switched Series Capacitor*) e o TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*), cujos esquemas estão mostrados na Figura 2.2.

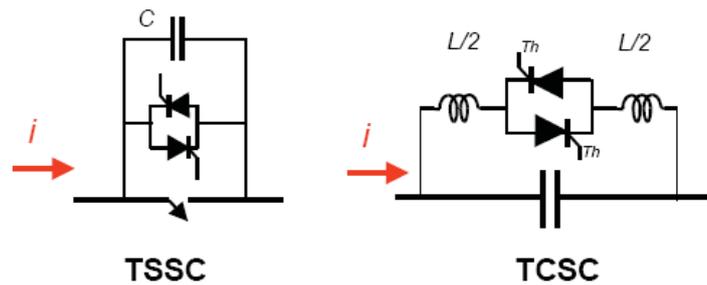


Figura 2.2: FACTS – primeira geração – série.

Exemplo de equipamento da primeira geração que possui as características série e paralelo de forma integrada é o *Phase Shifter* (PS).

A segunda geração é composta por equipamentos que utilizam chaves auto-comutadas tipo IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) ou GTO (*Gate Turn Off Thyristor*).

Utilizando estas chaves temos como exemplo o compensador paralelo, STATCOM (*Static Synchronous Shunt Compensator*), cujo esquema está mostrado na Figura 2.3, e o compensador série, SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*), cujo esquema está mostrado na Figura 2.4.

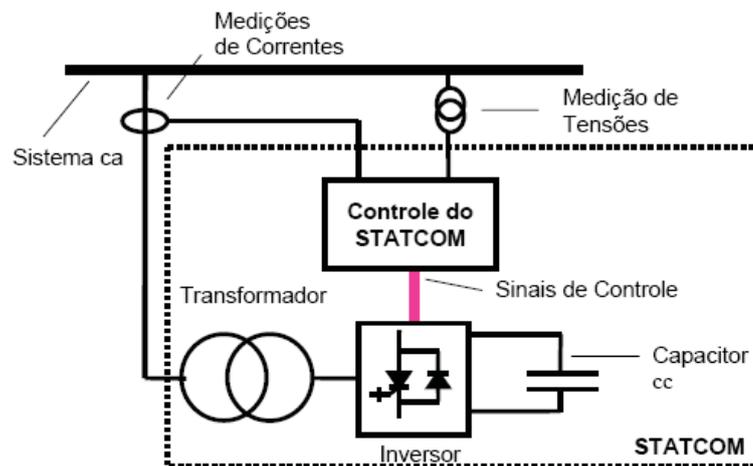


Figura 2.3: FACTS – segunda geração – paralelo.

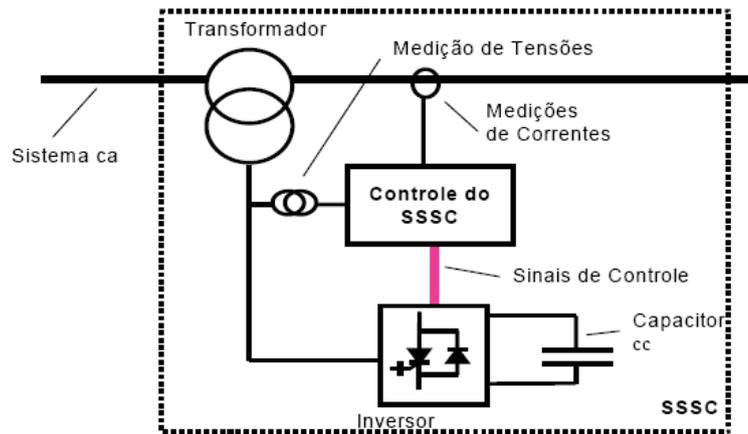


Figura 2.4: FACTS – segunda geração – série.

A terceira geração de equipamentos FACTS é composta pela integração dos equipamentos série e paralelo em uma mesma linha de transmissão. Um resultado disto é o UPFC (*Unified Power Flow Controller*), o qual é um equipamento combinado do SSSC e do STATCOM, conforme é mostrado na Figura 2.5.

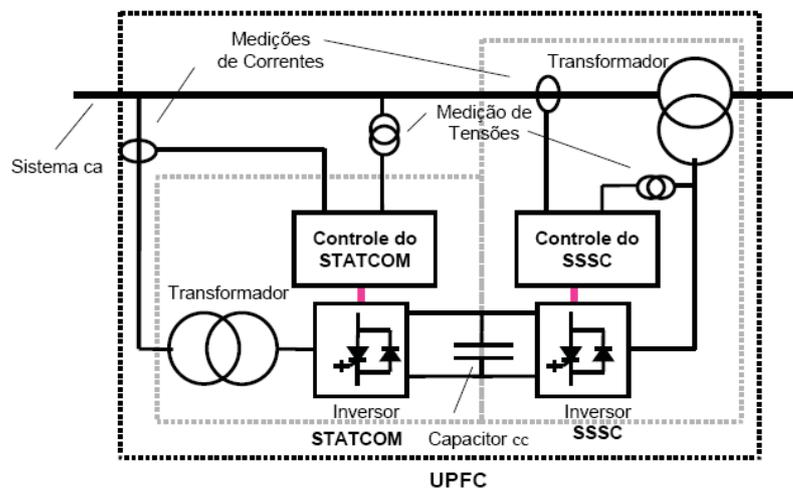


Figura 2.5: FACTS – terceira geração – UPFC.

De acordo com estudiosos, pode-se considerar a existência de uma quarta geração de equipamentos FACTS. Nesta, a integração dos equipamentos série e paralelo é feita em linhas diferentes. Isto resulta em equipamentos com os nomes IPFC (*Interline Power Flow Controller*), mostrado na Figura 2.6, CSC (*Convertible Static Compensator*), e outras possibilidades.

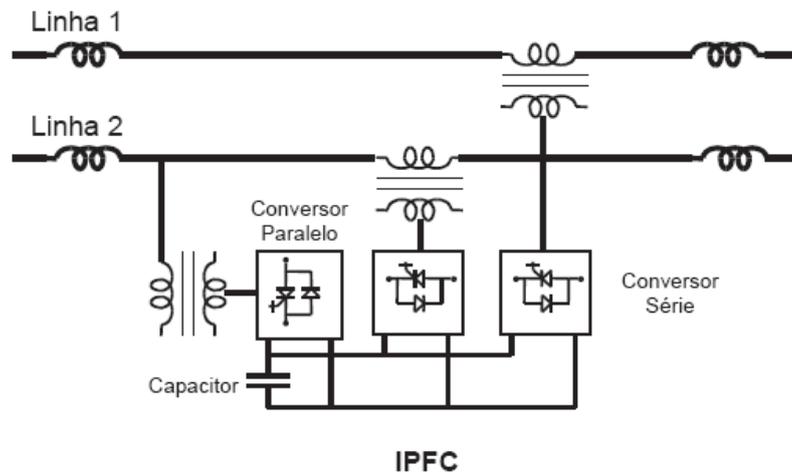


Figura 2.6: FACTS – quarta geração – IPFC.

No que diz respeito à função dos componentes eletrônicos, os controladores FACTS podem ser divididos em três grupos:

- chaveados;
- controlados;
- avançados.

Estes controladores serão detalhados a seguir.

2.3.1 FACTS Chaveados

Os compensadores passivos, tais como os reatores e capacitores, assim como transformadores defasadores foram inicialmente propostos com chaveamento mecânico.

O avanço da eletrônica de potência, a partir da década de 70, permitiu que os capacitores e reatores pudessem ser chaveados eletronicamente utilizando os tiristores.

Neste grupo encontram-se, entre outros:

- TSSC (*Thyristor Switched Series Capacitor*) – Capacitor série chaveado a tiristor.
- TSC (*Thyristor Switched Capacitor*) – Capacitor chaveado a tiristor.
- PST (*Phase Shifting Transformer*) – Transformador defasador com tap chaveado por tiristores.

Estes compensadores podem ser conectados em derivação, para promover compensação de tensão, ou em série com a linha, para controlar o fluxo de potência e/ou ângulo de defasagem.

2.3.2 FACTS Controlados

Neste grupo de controladores, a inserção de potência reativa para compensação se dá de maneira suave, ao contrário dos controladores FACTS chaveados, onde a inserção de reativos se dá em blocos.

Entre os FACTS controlados, podemos destacar:

- SVC (*Static Var Compensator*) – Compensador estático de reativos:

É um controladores FACTS paralelo dos mais importantes e utilizados. Seu uso iniciou-se em meados de 1970, no início do desenvolvimento da eletrônica de potência. Os SVCs utilizam elementos passivos, como reatores e capacitores, que são devidamente ajustados de modo a realizar a compensação reativa desejada. Para isto, dispositivos eletrônicos de potência, baseados em tiristores, são utilizados para efetuar o controle da corrente que flui pelo reator/capacitor, controlando assim, de forma contínua, a potência reativa injetada. Os SVCs são caracterizados por uma rápida resposta, alta confiabilidade, flexibilidade e baixo custo de operação.

- TCSC (*Thyristor Controlled Series Compensator*) – Compensador série controlado por tiristor.

É outro membro importante da família FACTS. Seu funcionamento é bem semelhante ao do SVC, embora seja conectado em série com a linha de transmissão. Dessa forma, o valor de sua reatância série equivalente pode ser variada continuamente através da atuação no ângulo de disparo dos tiristores, implicando assim no controle da potência ativa que flui na linha em que está conectado. Outros benefícios técnicos deste controlador incluem a redução de curto-circuito, estabilidade em regime transitório e a mitigação de ressonância subsíncrona (SSR). No Brasil, dois TCSCs já se encontram em operação, em cada uma das extremidades da linha de transmissão que interliga o sistema sul-sudeste ao sistema norte-nordeste, e tem

provado ser uma importante alternativa para reduzir oscilações dinâmicas entre os sistemas.

2.3.3 FACTS Avançados

São controladores baseados na utilização de conversores como fonte de tensão VSC (*Voltage Source Converter*) para realizar a compensação de potência reativa, ao invés dos tradicionais elementos passivos (reatores e capacitores).

Possuem também a habilidade de compensar potência ativa.

Entre os FACTS avançados, pode-se destacar:

- STATCOM (*Static Synchronous Compensator*)—Compensador Estático Síncrono.
- SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*)—Compensador Estático Síncrono Série.
- UPFC (*Unified Power Flow Controller*)—Controlador Unificado de Fluxo de Potência.

2.3.3.1 STATCOM - *Static Synchronous Compensator*

O desenvolvimento do STATCOM visava a redução do tamanho dos compensadores, eliminando os grandes capacitores e reatores dos SVCs.

Em 1980, o primeiro protótipo de STATCOM (na época, este nome ainda não era utilizado) foi construído e testado. Foi dimensionado para a potência de 20 MVA e tensão de 77 kV e utilizava tiristores com circuitos auxiliares de comutação forçada.

Nesta época, mesmo sendo relatada a construção de um protótipo de 20 MVA no Japão, a implementação do STATCOM utilizando tiristores não era uma solução atrativa. Isto ocorria por causa dos problemas de complexidade e de confiabilidade dos circuitos de comutação forçada, e dos baixos limites de tensão e corrente das chaves auto comutadas, tipo GTO.

Os limites existentes para as chaves auto comutadas, nos anos 70, atrasaram o desenvolvimento de um “*all solid-state var compensator*” em quase uma década.

Somente com o rápido desenvolvimento de chaves auto comutadas, com maiores capacidades de tensões e correntes, ocorridos na década de 80, é que foi

possível realizar o desenvolvimento do STATCOM. Em 1990, haviam chaves GTO com valores de 4,5 kV para tensão de bloqueio e 2,5 kA para corrente de interrupção.

A partir do ano 2000, são citadas novas chaves com tensões de bloqueio de 6,5 kV e correntes de interrupção de 6 kA, além das vantagens de não precisarem de circuitos retentores e podem ser utilizadas em paralelo, sem os problemas de equalização de tensão antes existentes. Exemplos destas novas chaves são os transistores de potência tais como os pacotes compactos de IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), 4.5 kV/ 2 kA, o IEGT (*Injection Enhancement IGBT*), 2.5-6.5 kV/2 kA, HiGT (*High-Conductivity IGBT*), 3.3 kV/ 5 kA, e os tiristores de potência GCT (*Gate Commutated Thyristor*) e IGCT (*Integrated Gate Commutated Thyristor*).

Os testes com o protótipo de 20 MVA mostraram resultados muito bons e a etapa seguinte seria a obtenção de um compensador com maior potência, só obtido com o desenvolvimento das chaves auto comutadas de alta potência.

Em 1990, um grupo de pesquisas do Japão anunciava estar bastante avançado no desenvolvimento do STATCOM de 80 MVA e tensão de 154 kV.

Através de testes com um modelo reduzido de 2 kVA, 200 V, 48-pulsos, foram verificados os sistemas de controle e os princípios de funcionamento. Com um modelo parcial de 12 pulsos, com a potência de 8 MVA e 51 kV, foram certificados e testados os circuitos retentores e as chaves semicondutoras que seriam utilizadas no STATCOM de 80MVA.

Ao mesmo tempo, nos Estados Unidos, o grupo de pesquisas ligado ao EPRI (*Electric Power Research Institute*) e a ESERCO (*Empire State Energy Research Corporation*) apresentava seus resultados obtidos do estudo de topologias propostas por Gyugyi de um modelo de 1 MVA testado em campo.

Em 1992, o primeiro STATCOM entrou em operação na subestação de Inuyama, pertencente à Kansay Electric Co. Ltda. Este STATCOM de 48-pulsos possui a potência de 80MVA, a tensão de 154kV e utiliza transformadores especiais ligados em zigue-zague. Foram utilizados GTOs de 4,5 kV / 3 kA nos inversores.

Em 1995, o STATCOM americano de ± 100 MVA, foi comissionado na subestação de Sullivan, pertencente à TVA (*Tennessee Valley Authority*). Este STATCOM foi implementado com uma estrutura de 48-pulsos para neutralizar harmônicos. Esta estrutura utilizava GTOs de 4.4 kV / 4 kA. Cinco unidades destes GTOs foram colocadas em série e associadas com diodos em anti-paralelo. No lado

de corrente contínua foi utilizado um capacitor de 65 kJ, 2984 mF, e tensão nominal de 6.6 kV. Este STATCOM está ligado a uma linha de 161 kV.

Outro exemplo é o projeto de desenvolvimento do UPFC de ± 320 Mvar da AEP (*American Electric Power*), instalado na subestação de Inez, Kentucky. Neste projeto, numa fase inicial, um STATCOM de ± 160 MVA foi comissionado e ligado a uma linha de 138 kV. Numa segunda etapa, outro STATCOM de mesma capacidade foi inserido, permitindo um controle de ± 320 MVA. Porém, após testes, o último STATCOM foi modificado para um SSSC para compor o UPFC, compensadores avançados que serão apresentados nos próximos itens.

Nas referências do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineer*), o nome STATCOM já se estabeleceu. Porém, os nomes SVG (*Static Var Generator*), ASVC (*Advanced Static Var Compensator*), HVDC light e ASVG (*Advanced Static Var Generator*) continuam sendo usados, especialmente no Japão e na Europa, dependendo das empresas que desenvolvem o STATCOM.

Além destes nomes, existem outras variações como STATCON, (*static condenser*), o SIPCON (*Siemens Power Conditioner*), o D-STATCOM (*Distribution-STATCOM*), voltado para sistemas de distribuição, o PWM STATCOM (*Pulse Width Modulation STATCOM*), com os inversores acionados em altas frequências de chaveamento e comportamento similar ao de um filtro ativo.

Com o sucesso do desenvolvimento do STATCOM, incentivado pelas constantes melhorias nas capacidades de tensão e corrente das chaves auto comutadas, houve um maior interesse da comunidade científica pelo equipamento.

Princípio de funcionamento:

O princípio de funcionamento do STATCOM pode ser descrito através do diagrama representado na Figura 2.7. No diagrama, o sistema elétrico e o STATCOM são representados respectivamente pelas fontes de tensão V_s e V_i . A fonte de tensão V_i , de forma a simplificar as análises, é representada sem os componentes harmônicos presentes na saída do conversor. A reatância indicada por X_L representa as reatâncias dos equivalentes de Thévenin do sistema e do transformador de acoplamento do STATCOM.

Encontra-se também representado na Figura 2.7 o diagrama fasorial das tensões, onde δ é o ângulo de defasamento entre as tensões do sistema e do STATCOM.

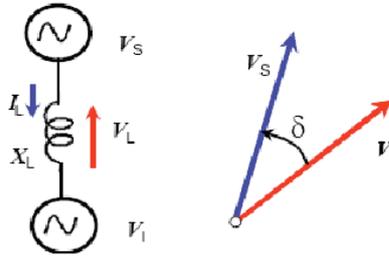


Figura 2.7: Esquema simplificado do STATCOM e do sistema elétrico e diagrama fasorial das tensões.

Os fluxos de potência ativa e reativa entre as duas fontes de tensão, em regime permanente, podem ser descritos através de equações como se segue:

$$P_s = \frac{V_s \times V_i}{X_L} \text{sen}(\delta) \quad (2.1)$$

$$Q_s = \frac{V_s^2}{X_L} - \frac{V_s \times V_i}{X_L} \text{cos}(\delta) \quad (2.9)$$

Onde,

P_s é o fluxo de potência ativa entre as duas fontes de tensão

V_s e V_i são fontes de tensão sem os componentes harmônicos presentes na saída do conversor.

X_L representa as reatâncias dos equivalentes Thévenin do sistema e do transformador de acoplamento do STATCOM.

δ é o ângulo de defasamento entre as tensões do sistema e do STATCOM.

Q_s é o fluxo de potência reativa entre as duas fontes de tensão

Considerando as equações (2.1) e (2.2) anteriores e os diagramas fasoriais representados na Figura 2.8 tem-se cinco situações possíveis:

1. Tensão V_s adiantada em relação a V_i , Figura 2.8(a), $90^\circ < \delta < 0^\circ$, existe um fluxo transitório de potência ativa na direção da fonte "I" (compensador).
2. Tensão V_s atrasada em relação a V_i , Figura 2.8(b), $-90^\circ < \delta < 0^\circ$, existe um fluxo transitório de potência ativa na direção da fonte "S" (sistema).
3. Tensão V_s em fase com V_i , Figura 2.8(c), $\delta = 0$, e se $|V_s| = |V_i|$, não existe corrente no circuito e, portanto não existe fluxo de potência ativa, nem reativa, entre as fontes "S" e "I".

4. Tensão V_s em fase com V_i , Figura 2.8(d), $\delta = 0$, e se $|V_s| > |V_i|$, não existe fluxo de potência ativa entre as fontes “S” e “I”, mas existe potência reativa indutiva ($Q_s > 0$).
5. Tensão V_s em fase com V_i , Figura 2.8(e), $\delta = 0$, e se $|V_s| < |V_i|$, não existe fluxo de potência ativa entre as fontes “S” e “I”, mas existe potência reativa capacitiva ($Q_s < 0$).

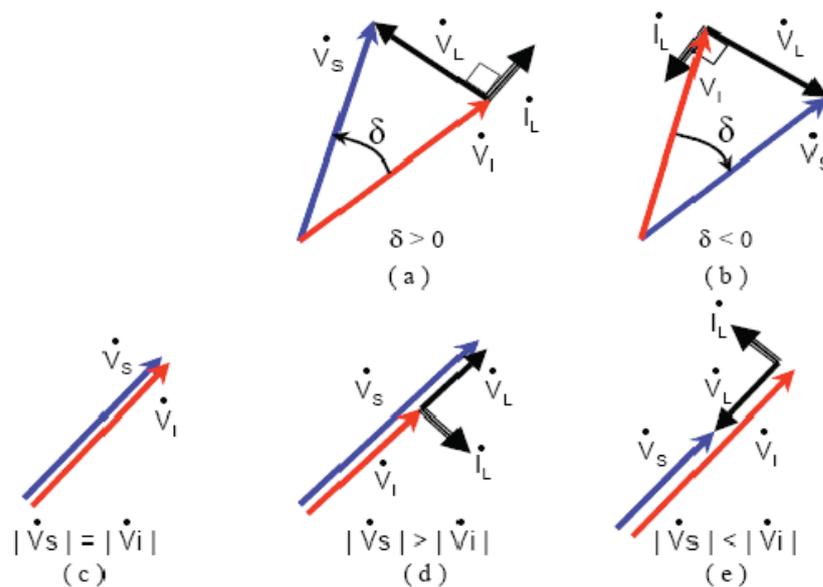


Figura 2.8: Diagramas fasoriais das tensões e correntes do sistema elétrico e do STATCOM.

Verifica-se assim que uma fonte de tensão com capacidade de controle de fase pode direcionar o fluxo de potência ativa, e com o controle de amplitude, pode-se controlar a potência reativa naquele ponto do circuito.

As situações descritas anteriormente mostram como o STATCOM opera em relação ao sistema elétrico ao qual está conectada. Desta forma, caso as tensões do sistema e do STATCOM estejam sincronizadas e em fase ($\delta = 0^\circ$), não há fluxo de potência ativa em nenhum sentido. Porém, se as amplitudes das tensões forem diferentes, observa-se um fluxo de potência reativa entre os dois sistemas. Assim, considerando que a tensão do sistema elétrico é constante, se a tensão do STATCOM puder ser variada continuamente, porém com amplitude menor que a tensão da rede, este passa a operar como um banco trifásico de indutores variáveis, gerando correntes atrasadas de 90° em relação à tensão do sistema elétrico. Por outro lado, se a tensão for variada continuamente, porém com amplitude maior que a da rede,

pode-se obter potência reativa capacitiva e o STATCOM passa a operar como um banco de condensadores trifásicos variáveis, gerando correntes adiantadas de 90° .

Estrutura do STATCOM

O STATCOM é composto por quatro estruturas básicas: inversores, transformadores, condensadores do lado de corrente contínua e um sistema de controle, como se encontra representado na Figura 2.9.

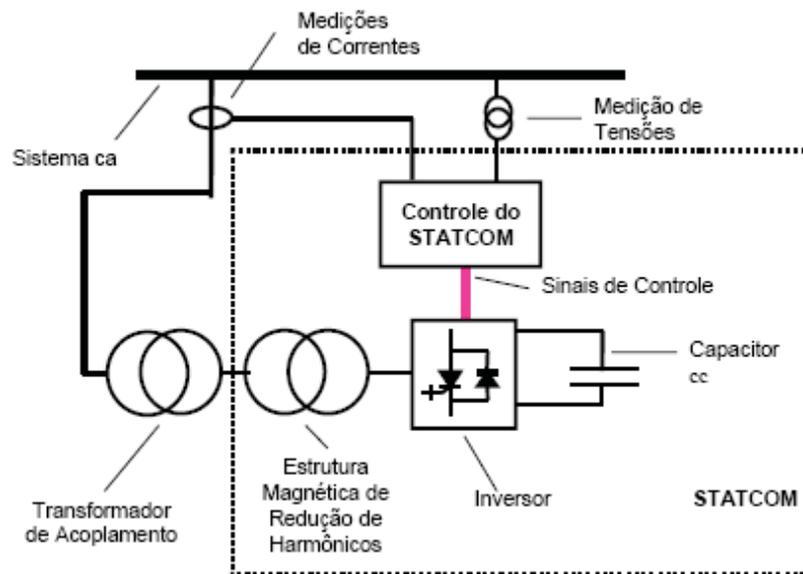


Figura 2.9: Esquema básico do STATCOM.

A fonte de tensão controlada em amplitude e fase é implementada através de inversores. Estes inversores possuem, no lado de cc, condensadores de forma a simular uma fonte de tensão cc. Este condensador funciona também como sistema de armazenamento de energia. Os transformadores são utilizados para compatibilizar os níveis de impedância do compensador e do sistema CA. Na maioria dos casos o transformador é utilizado também para minimizar o conteúdo dos harmônicos da tensão do inversor.

Num caso ideal, o STATCOM está ligado a uma fonte de tensão cc com tensão variável. A fonte de tensão ideal permite ao STATCOM compensar potência ativa e reativa. Porém, no caso real, o STATCOM controla apenas potência reativa, e a fonte de tensão é substituída por um condensador.

A forma de ligação de condensadores mais utilizada no STATCOM está representada na Figura 2.10, onde apenas um condensador é conectado a um ou

mais conversores. Existem outros exemplos, como o representado na Figura 2.11, onde para cada conversor há um condensador independente.

Idealmente, cada conversor utilizado deve ter um condensador no seu lado cc. No entanto, para se obterem maiores níveis de tensão, os condensadores são colocados em série ou em paralelo.

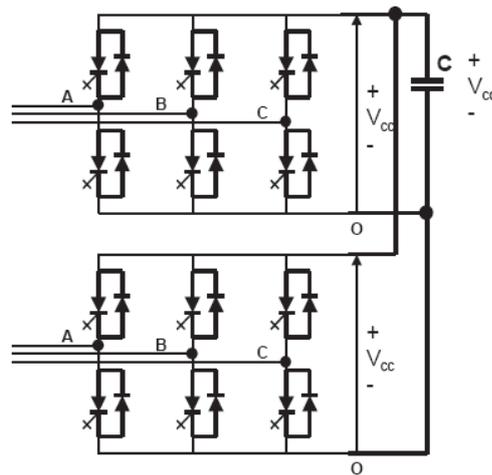


Figura 2.10 - Topologias de condensadores do lado de corrente contínua.

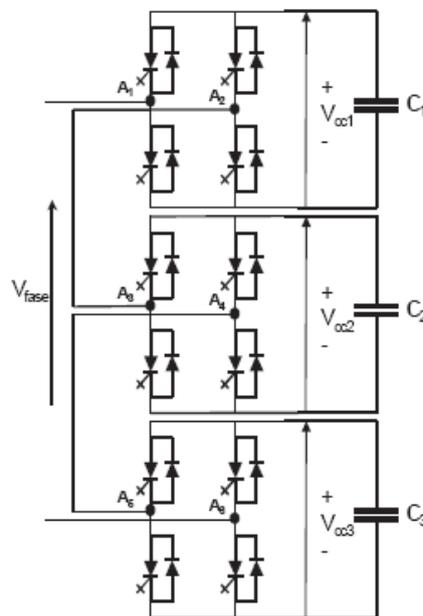


Figura 2.11: Topologia com condensadores individuais para cada inversor.

2.3.3.2 SSSC – “Static Synchronous Series Compensator”

O Compensador Estático Síncrono Série (SSSC) é um compensador FACTS similar ao STATCOM. Utiliza o conversor como fonte de tensão síncrona, que gera

uma tensão de compensação a ser inserida em série com a linha de transmissão, independentemente da corrente de linha. Este compensador oferece uma alternativa à compensação série convencional de linhas de transmissão.

A tensão gerada pelo conversor deve estar em quadratura e atrasada em relação à corrente, de forma que apresente a mesma característica de um condensador, proporcionando um efeito capacitivo sobre o Sistema Elétrico de Potência. A característica indutiva também pode ser sintetizada e pode ser útil nos casos em que se deseja diminuir o fluxo de potência transmitida.

O SSSC pode ser considerado, funcionalmente, como um gerador ideal, que pode produzir um conjunto de tensões alternadas, trifásicas e equilibradas, à frequência fundamental, com amplitude e ângulo de fase controlável. Desta forma, o SSSC pode gerar ou absorver potências ativa e reativa, dependendo da relação angular entre a tensão inserida em série com a linha de transmissão e a corrente através desta linha. Assim, o SSSC pode interferir nas potências ativa e reativa do sistema c.a., a partir do controle da magnitude e da posição angular da tensão injetada com relação a corrente na linha (CIGRÉ, 2000).

O diagrama de blocos simplificado do SSSC conectado a uma linha de transmissão está representado na Figura 2.12. Onde temos a representação da fonte CA trifásica (produção), a impedância é representada apenas por uma indutância L e a carga (sistema R) é composta apenas por um conjunto trifásico de resistências da linha.

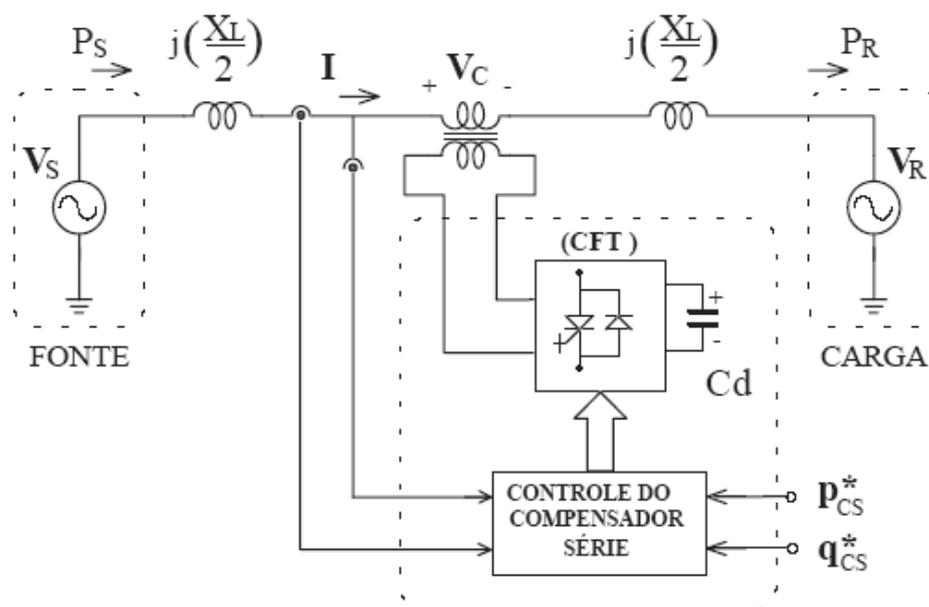


Figura 2.12: Diagrama de blocos do SSSC conectado a uma linha de transmissão

O compensador deve gerar tensões em quadratura, em avanço ou atraso, em relação à corrente da linha, correspondendo, com isto, à síntese de um condensador ou indutância, respectivamente. Para gerar estas tensões a corrente de linha é medida e o bloco do controlador do SSSC calcula a tensão de compensação. A amplitude desta tensão está relacionada com o nível de potência reativa Q_{ref} que se deseja gerar ou absorver. O Controlador dos Conversores controla o *gate* dos IGBTs do CFT (conversor fonte de tensão) que, então, gera as tensões que serão entregues ao sistema de transmissão através de transformadores.

Assim o SSSC proporciona o controle de fluxo de potência de forma rápida e precisa de uma linha de transmissão através da alteração de forma eletrônica da sua impedância.

2.3.3.3 UPFC - "*Unified Power Flow Controller*"

O UPFC ("*Unified Power Flow Controller*") foi originalmente proposto por L. Gyugyi, em 1992. O UPFC é constituído, basicamente, do agrupamento do STATCOM com o SSSC, apresentados, anteriormente, num único equipamento. Ou seja, é formado por dois conversores ligados "*back-to-back*", pelo lado dc, sendo que um deles é ligado em série com a linha de transmissão e o outro, em derivação, pelo lado CA, conforme mostra a Figura 2.13.

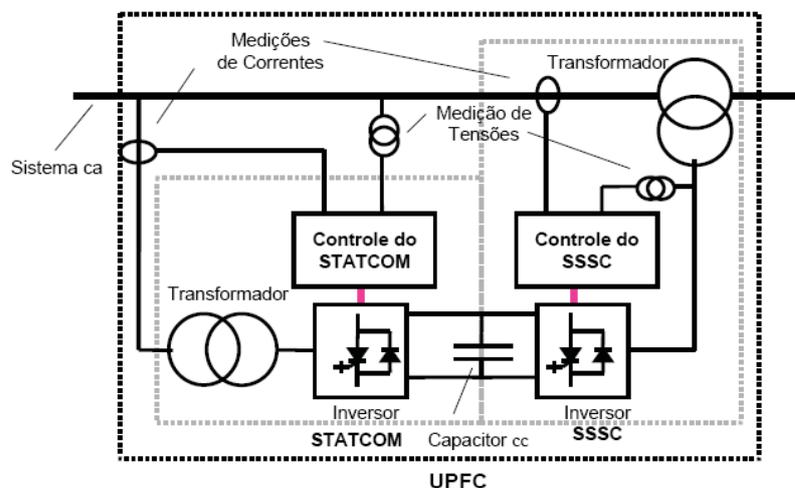


Figura 2.13: Configuração básica de um UPFC

O UPFC é um compensador universal, capaz de controlar simultaneamente o fluxo de potência que passa por uma linha de transmissão, e a tensão CA de um barramento controlada. Ele tem resposta muito rápida e não existe nenhum substituto, convencional ou de eletrônica de potência, que possa realizar todas suas funções de compensação, com o mesmo desempenho. Ou seja, o UPFC é um equipamento revolucionário, capaz de realizar funções de compensação, dentro da nova concepção de sistemas FACTS, que oferece alternativas para o controle de sistemas de potência até então impossíveis com o uso de equipamentos tradicionais.

Princípio de funcionamento:

O conversor em derivação injeta corrente reativa controlada na barra onde está conectado, garantindo uma regulação de tensão nesta barra, em torno de um valor de referência. Essa função de regulação de tensão é idêntica à realizada por um STATCOM. A conexão em derivação é estabelecida por intermédio de um transformador que, além de levar a tensão a valores compatíveis com a operação do conversor, serve como filtro para as harmônicas de ordens elevadas geradas pelo chaveamento do conversor. Porém, a principal utilidade do transformador é manter a ortogonalidade entre a corrente de compensação e a tensão do sistema, dada a predominância da reatância de dispersão do transformador em relação à sua resistência, imprimindo a característica reativa necessária para a ortogonalidade da corrente, quando ambas as tensões, do barramento c.a. e da saída do conversor em derivação, estão em fase.

O segundo conversor, ligado em série com a linha a ser controlada, atua como um SSSC. A conexão é realizada através de um transformador que insere uma tensão em série com a linha. Esta tensão série, combinada com a corrente que flui na linha controlada, resulta em uma troca de potência ativa e reativa entre o SSSC e o sistema c.a. Conforme discutido na apresentação do SSSC, se a tensão inserida estiver ortogonal em relação à tensão da linha, o SSSC atuará como um compensador de reativos série convencional. Neste caso, não há troca de potência ativa entre o SSSC e o sistema c.a. Entretanto, para qualquer relação angular entre a tensão inserida e a corrente da linha, diferente de 90° , há troca de potência ativa entre o SSSC e o sistema c.a. e, conseqüentemente, há a necessidade de compensar esta potência ativa

através do compensador em derivação. Assim, é possível determinar, a partir da tensão inserida, qual a potência ativa e reativa controlada pelo SSSC.

Outros benefícios da utilização de controladores UPFCs, podem ser citados:

- Aumento da confiabilidade e disponibilidade do sistema;
- Aumento da estabilidade;
- Melhoria da qualidade de fornecimento de energia;
- Benefícios ambientais, devido a não desapropriação de áreas para alagamentos, bem como desmatamentos para construção de novas linhas de transmissão, em função do melhor aproveitamento da rede de transmissão.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada uma ampla descrição dos diversos tipos de Controladores FACTS buscando mostrar suas características e ressaltando a evolução tecnológica.

Além disso, procurou-se dar maior destaque, detalhando aspectos estruturais e operativos, aos controladores que serviram de base para a implementação proposta neste trabalho.

3 ALGORITMOS GENÉTICOS

3.1 INTRODUÇÃO

Os Algoritmos Genéticos são uma classe de algoritmos evolutivos que tiveram sua origem no início da década de 70, através dos trabalhos desenvolvidos na universidade de Michigan pelo professor John Holland e seus alunos (Holland, 1975).

O professor Holland tinha duas metas: apresentar uma teoria capaz de abstrair e explicar os processos adaptativos que ocorrem nos sistemas naturais; desenvolver simulações computacionais capazes de imitar o mecanismo de evolução das espécies através da seleção natural proposto por Charles Darwin e o mecanismo de transferência de fatores hereditários dos ancestrais para seus descendentes, proposto por Gregor Mendel. Neste processo evolutivo, os indivíduos geneticamente melhores adaptados ao ambiente terão maior chance de sobreviver e de se reproduzir e, como consequência, transmitir suas características para as próximas gerações.

Os trabalhos desenvolvidos por Holland deram origem a publicação em 1975 ao livro "*Adaptation in Natural and Artificial Systems*", considerado por muitos pesquisadores como a bíblia de algoritmos genéticos. Depois da publicação deste livro, a evolução pode ser encarada como um processo de otimização e os Algoritmos Genéticos foram utilizados com sucesso em diversos problemas de otimização (Fonseca, 2002).

O comportamento dos algoritmos genéticos é controlado de maneira adequada através de um conjunto de parâmetros. Este é um algoritmo robusto, eficiente e eficaz para vários tipos de problemas.

Toda tarefa de busca e otimização possui vários componentes, entre eles: o espaço de busca, onde são consideradas todas as possibilidades de solução de um determinado problema e a função de avaliação (ou função de custo) que é uma maneira de avaliar os membros do espaço de busca. Existem muitos métodos de busca e funções de avaliação.

As técnicas de busca e otimização tradicionais iniciam-se com um único candidato que, iterativamente, é manipulado utilizando algumas heurísticas (estáticas) diretamente associadas ao problema a ser solucionado. Geralmente, estes processos heurísticos não são algorítmicos e sua simulação em computadores pode ser muito complexa. Apesar destes métodos não serem suficientemente robustos, isto não

implica que eles sejam inúteis. Na prática, eles são amplamente utilizados, com sucesso, em inúmeras aplicações.

Por outro lado, as técnicas de computação evolucionária operam sobre uma população de candidatos em paralelo. Assim, elas podem fazer a busca em diferentes áreas do espaço de solução, alocando um número de membros apropriado para a busca em várias regiões.

Os Algoritmos Genéticos (AG) diferem dos métodos tradicionais de busca e otimização, principalmente em quatro aspectos:

- trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros.
- trabalham com uma população e não com um único ponto.
- utilizam informações de custo ou recompensa e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar.
- utilizam regras de transição probabilísticas e não determinísticas.

Algoritmos Genéticos são muito eficientes para busca de soluções ótimas, ou aproximadamente ótimas em uma grande variedade de problemas, pois não impõem muitas das limitações encontradas nos métodos de busca tradicionais.

Além de ser uma estratégia de gerar-e-testar muito elegante, por serem baseados na evolução biológica, são capazes de identificar e explorar fatores ambientais e convergir para soluções ótimas, ou aproximadamente ótimas em níveis globais.

"Quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes": este é o conceito básico da evolução genética biológica. A área biológica mais proximamente ligada aos Algoritmos Genéticos é a Genética Populacional.

Os pesquisadores referem-se a "Algoritmos Genéticos" ou a "um Algoritmo Genético" e não "ao Algoritmo Genético", pois AGs são uma classe de procedimentos com muitos passos separados, e cada um destes passos possui muitas variações possíveis.

Antes de prosseguir com a análise das características destes algoritmos, alguns conceitos básicos são necessários; estes conceitos podem ser naturalmente expostos explicando o funcionamento básico destes algoritmos.

Inicialmente, é gerada uma população formada por um conjunto aleatório de indivíduos que podem ser vistos como possíveis soluções do problema. Durante o processo evolutivo, esta população é avaliada: para cada indivíduo é dada uma nota, ou índice, refletindo sua habilidade de adaptação a determinado ambiente. Uma porcentagem dos mais adaptados é mantida, enquanto os outros são descartados (darwinismo). Os membros mantidos pela seleção podem sofrer modificações em suas características fundamentais através de mutações e cruzamento (*crossover*) ou recombinação genética gerando descendentes para a próxima geração. Este processo, chamado de reprodução, é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada.

Embora possam parecer simplistas do ponto de vista biológico, estes algoritmos são suficientemente complexos para fornecer mecanismos de busca adaptativos poderosos e robustos.

3.2 REPRESENTAÇÃO DE UMA CONFIGURAÇÃO CANDIDATA

Nos Algoritmos Genéticos é necessário codificar uma configuração candidata, isto é, deve-se fazer a representação de uma configuração candidata através de uma cadeia cromossômica.

Existem três formas de representar a cadeia cromossômica (binária, inteira ou real). A codificação mais popular é a representação binária. Recomenda-se que a codificação seja feita de acordo com as características específicas de cada problema, já que o tipo de representação de uma solução candidata afeta o desempenho computacional dos Algoritmos Genéticos (Romero e Mantovani, 2004).

3.3 FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo mede a qualidade dos indivíduos de uma população. Esta deve ter a capacidade de identificar as configurações de melhor qualidade, sendo seu valor utilizado para implementar o operador de seleção.

3.4 POPULAÇÃO INICIAL

A escolha da população inicial afeta a qualidade da solução e o número de gerações necessárias para encontrar uma boa solução. Isto ocorre porque as características das soluções candidatas que pertencem a população inicial são transferidas para seus descendentes nas gerações subsequentes (MIASAKI, 2006).

Para alguns problemas reais, a população inicial pode ser gerada de forma aleatória e encontrar soluções ótimas ou quase ótimas. Mas para outros problemas convém utilizar propostas alternativas como gerar uma população inicial utilizando um processo aleatório controlado ou um algoritmo heurístico construtivo rápido e eficiente. Sendo que para este estudo específico a população inicial foi gerada de forma aleatória.

3.5 CICLO GERACIONAL

É o mecanismo cíclico composto pelos operadores de seleção, recombinação e mutação que permitem encontrar as configurações da nova geração a partir da população corrente, conforme o esquema mostrado na Figura 3.1.

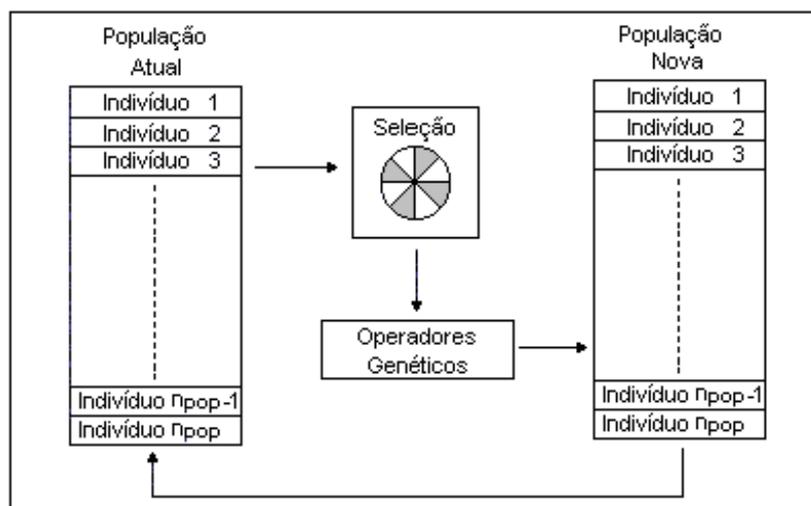


Figura 3.1: Esquema Reposição Populacional em um Algoritmo Genético

3.6 SELEÇÃO

A seleção é o operador genético que permite comparar e selecionar dentro da população corrente as soluções candidatas que participarão da formação da nova geração. O processo de seleção tem como objetivo destacar os melhores indivíduos de uma população na esperança de obter descendentes mais bem adaptados que seus antecedentes.

Na literatura existem diversos tipos de seleção, dentre os quais se destacam: seleção proporcional, seleção determinística, seleção estocástica de resíduo, seleção usando ordenamento e seleção por torneio. No *toolbox* do *Matlab*, utilizado neste trabalho, são considerados alguns destes tipos e que serão explicados a seguir:

- Método Uniforme: A nova população é obtida por N tiragens com reposição considerando que os indivíduos são equiprováveis.
- Método *Roulette* (Roleta): A nova população é obtida por N tiragens com reposição considerando que a probabilidade de cada indivíduo é proporcional ao seu valor da função objetivo. Não é justa para pequenas populações, pois a população assim obtida tem uma distribuição de aptidão que pode diferir em muito da distribuição original.
- Método *Stochastic Uniform* (Estocástico Uniforme): É a função padrão de seleção, o qual coloca para fora uma linha em que cada pai corresponde a uma seção da linha do comprimento proporcional ao seu valor atribuído. O algoritmo move-se uniformemente ao longo desta linha no decorrer das etapas que são distribuídas de tamanho igual. Em cada etapa, o algoritmo aloca um pai da seção anterior. A primeira etapa é um número aleatório uniforme menor do que o tamanho desta etapa.
- Método *Remainder* (restante): A seleção *Remainder* atribui pais deterministicamente do número inteiro do valor atribuído de cada indivíduo e usa então a seleção de *roulette* na divisória fracionária restante, por exemplo, se o valor atribuído de um indivíduo for 2.3, o indivíduo será alistado duas vezes como um pai porque o valor inteiro é 2. Depois que os pais foram atribuídos de acordo com os valores inteiros, o restante dos pais será escolhido pelo método

estocástico. A probabilidade de um pai ser escolhido nesta etapa é proporcional à parte fracionária de seu valor atribuído.

- Método *Tournament* (torneio): São escolhidos k indivíduos aleatoriamente e passa o melhor deles em termos dos valores da função objetivo. É muito freqüente a sua utilização com $k = 2$, sendo este o mínimo recomendado, mas o melhor seria $k = 4$, que apresenta em geral bons resultados.

A seleção por torneio é uma das formas mais utilizadas devido a sua eficiência e simplicidade na implementação de problemas de maximização ou minimização. Essa seleção preserva melhor a diversidade da população porque a escolha é realizada apenas comparando o valor da função objetivo. Embora seja muito simples, a seleção por torneio é muito atrativa devido ao fato de ser computacionalmente muito rápida e eficiente.

É importante salientar que quanto maior for esta taxa de cruzamento mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população. Mas se esta for muito alta, estruturas com boas aptidões poderão ser retiradas mais rapidamente, também em um valor alto a maior parte da população será substituída e isso pode levar a ocorrer perda de estruturas de alta aptidão. E com um valor baixo, o algoritmo pode tornar-se muito lento, já que os cruzamentos são realizados na esperança de que novos cromossomos contêm partes boas dos cromossomos antigos, e que, portanto, os novos cromossomos sejam melhores, não esquecendo que é bom deixar uma parte da antiga população sobreviver para a próxima geração.

Para o estudo foi utilizado o ajuste padrão do *Matlab* que é o método Estocástico Uniforme.

3.7 RECOMBINAÇÃO

Após serem escolhidas pelo mecanismo de seleção, as configurações devem ser submetidas à recombinação.

A recombinação é considerada o principal operador de um algoritmo genético, pois procura simular, através de algumas regras, o processo de troca de material genético entre seus cromossomos (diversidade genética), gerando um novo indivíduo

na população. Em outras palavras, busca simular o fenômeno genético do *crossing over*.

Existem diversos tipos de recombinação, sendo os mais conhecidos: a recombinação de um ponto, de dois pontos, multipontos e uniformes. Na recombinação de um ponto, escolhe-se, de forma aleatória, um ponto de recombinação que servirá de elo de duas novas soluções candidatas, cada qual contendo uma parcela de cada uma das topologias geradoras. Alguns tipos de recombinação serão descritos a seguir:

Scattered (disperso): Este método cria um vetor binário aleatório e seleciona os genes, onde o vetor é um, o filho recebe os genes do primeiro pai, e os genes onde o vetor são 0, o filho recebe os genes do segundo pai, e combina os genes para dar forma ao filho. Como mostrado no exemplo abaixo:

Pai 1 = [a b c d e f g h]
Pai 2 = [1 2 3 4 5 6 7 8]
vetor binário = [1 1 0 0 1 0 0 0]
Filho = [a b 3 4 e 6 7 8]

Single Point (um ponto): Seleciona-se aleatoriamente um ponto de corte do cromossomo. Cada um dos dois descendentes recebe informação genética de cada um dos pais. Como mostrado na Figura 3.2:

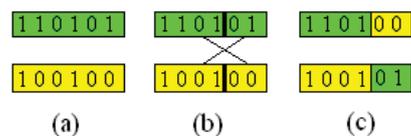


Figura 3.2: (a) dois indivíduos são escolhidos; (b) um ponto (4) de crossover é escolhido; (c) são re combinadas as características, gerando dois novos indivíduos.

Two Points (dois pontos): Semelhante ao anterior só que agora com a escolha de dois pontos de corte, onde um dos descendentes fica com a parte central de um dos pais e as partes extremas do outro pai, e o outro fica com o contrário. Como mostrado na Figura 3.3.

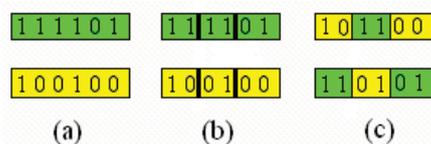


Figura 3.3:(a) dois indivíduos são escolhidos;(b) dois pontos de crossover são escolhidos (2 e 4); (c) são recombinadas as características, gerando dois novos indivíduos.

Um número gerado aleatoriamente, comparado com uma taxa de recombinação, determina se duas configurações selecionadas serão submetidas à recombinação.

O método considerado para o estudo em questão foi o *Scattered* por ser o ajuste padrão do Matlab.

3.8 MUTAÇÃO

O operador de mutação busca restituir a perda de material genético ou inserir material genético inexplorado com o intuito de evitar a convergência prematura do algoritmo.

Na implementação da mutação também existe a necessidade de gerar números aleatórios introduzindo, novamente, um componente aleatório na implementação dos Algoritmos Genéticos. Uma taxa de mutação indica se uma determinada posição no cromossomo irá se modificar.

3.9 CRITÉRIO DE PARADA

Há diversos tipos de critérios de parada que podem ser utilizados para finalizar um algoritmo genético, dentre eles podem ser citados:

- Quando for executado um número especificado de gerações;
- O resultado não melhora durante um número especificado de gerações;
- O resultado assume um valor pelo menos de igual qualidade que um valor previamente especificado;
- As configurações da população ficam muito homogêneas, isto é, as configurações são muito parecidas e praticamente já não existe evolução;
- Usando um critério que depende do tipo de problema analisado.

3.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi feita uma abordagem geral do que são os Algoritmos Genéticos, de como surgiram e como são utilizados para realização de estudos de otimização.

Fez-se também um breve descritivo dos parâmetros encontrados no *Toolbox* do Matlab que trata de AGs, já que esta foi a plataforma utilizada para a realização das simulações.

4 METODOLOGIA

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo trata dos diversos aspectos envolvidos na definição e implementação da estrutura de processamento da alocação de Controladores UPFC em sistemas de potência via técnica de Algoritmos Genéticos.

A estrutura central do processamento baseia-se na avaliação de cada indivíduo gerado pelo AG feita por uma rotina de cálculo de fluxo de potência baseada no método de *Newton-Raphson*, que é explicado no Apêndice A.

Assim, será apresentada neste capítulo a modelagem do UPFC incluída na rotina de cálculo de fluxo de potência, a forma como foi definida a codificação dos indivíduos do AG, as funções de avaliação (*fitness function*) a serem tratadas neste estudo, bem como aspectos relativos à melhoria do processo de convergência, como o emprego de memória e de pré-processamento.

4.2 MODELAGEM DO UPFC PARA O FLUXO DE POTÊNCIA

De acordo com o exposto na seção 2.3.3.3 o Controlador UPFC pode ser representado como a associação de dois conversores do tipo fonte de tensão, (VSC – *Voltage Source Converter*), sendo um ligado em série e o outro ligado em paralelo (ou *shunt*), como ilustrado na Figura 4.1.

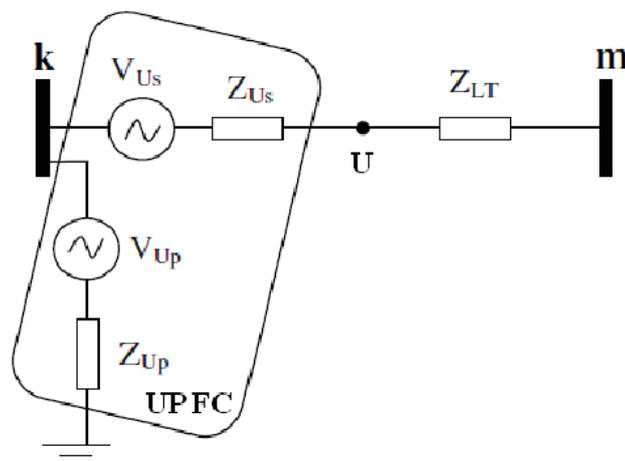


Figura 4.1: Representação equivalente do Conversor UPFC

Dessa forma, a inclusão desse controlador na rotina de cálculo de fluxo de potência convencional, baseado no método de *Newton-Raphson*, cujas equações para os fluxos ativos e reativos são apresentados pelas expressões (4.1) e (4.2), implica basicamente na modificação dessas equações, como mostrado nas equações (4.3) e (4.4). (Tortelli, 2003).

$$P_{km} = g_{LT}V_k^2 - V_kV_m(g_{LT}\cos\theta_{km} + b_{LT}\text{sen}\theta_{km}) \quad (4.1)$$

$$Q_{km} = -b_{LT}V_k^2 - V_kV_m(g_{LT}\text{sen}\theta_{km} - b_{LT}\cos\theta_{km}) \quad (4.2)$$

$$P_{kmU} = P_{km} + V_kV_{US}(g_U\cos\theta_{kUS} + b_U\text{sen}\theta_{kUS}) \quad (4.3)$$

$$Q_{kmU} = Q_{km} + V_kV_{US}(g_U\text{sen}\theta_{kUS} - b_U\cos\theta_{kUS}) \quad (4.4)$$

onde:

- P_{km} = fluxo de potência ativa no ramo k-m;
- Q_{km} = fluxo de potência reativa no ramo k-m;
- V_k e V_m = magnitudes das tensões das barras k e m;
- θ_{km} = diferença angular entre as tensões das barras k e m;
- g_{LT} = condutância série da linha k-m;
- b_{LT} = susceptância série da linha k-m;
- P_{kmU} = fluxo de Potência Ativa no ramo com Controlador UPFC;
- Q_{kmU} = fluxo de Potência Reativa no ramo com Controlador UPFC;
- V_U = magnitude da tensão equivalente do Controlador UPFC;
- g_U = condutância equivalente do Controlador UPFC;
- b_U = susceptância equivalente do Controlador UPFC.

Nesse caso, as variáveis de controle dos fluxos ativos e reativos são a magnitude e a fase do conversor série, ou seja, V_{Us} e θ_{Us}

Além do controle dos fluxos, o UPFC permite também o controle da tensão de barra. Para representar esse controle, a barra em que o conversor *shunt* está associado passa a ser representada na rotina de cálculo de fluxo de potência como uma barra controlada do tipo PV, sendo a variável de controle a magnitude da tensão do conversor shunt, ou seja, V_{Up} .

4.2.1 Considerações quanto ao tratamento dos parâmetros de controle do UPFC

Como visto na seção anterior, existem três variáveis de controle (as variáveis de estado V_{Us} , θ_{Us} e V_{Up}) a serem consideradas na atuação do UPFC para o controle dos fluxos de potência ativa e reativa ($P_{UPFCesp}$ e $Q_{UPFCesp}$) e da magnitude de tensão de barra ($V_{UPFCesp}$). Dessa forma, a solução do problema de cálculo de fluxo de potência irá determinar o valor das variáveis de controle do UPFC (assim como o de todas as outras variáveis de estado do problema convencional) para atender as especificações de fluxos de potência e da magnitude de tensão do UPFC (assim como das cargas e gerações especificadas).

No presente estudo, definiu-se como condição de controle dos fluxos de potência do ramo onde o UPFC for aplicado, que este proporcione uma variação determinada, definida em relação ao fluxo de potência no mesmo ramo, quando o sistema opera sem nenhum controlador (Caso Base). Quanto à magnitude de tensão, definiu-se que o UPFC deva proporcionar um incremento em relação ao Caso Base. Tais considerações são definidas pelas seguintes expressões:

$$P_{UPFCesp} = k_P P_{km0} \quad (4.5)$$

$$Q_{UPFCesp} = k_Q Q_{km0} \quad (4.6)$$

$$V_{UPFCesp} = k_V V_{k0} \quad (4.7)$$

onde:

$P_{UPFCesp}$: fluxo de potência ativa especificado com o controlador UPFC;

$Q_{UPFCesp}$: fluxo de potência reativa especificado com o controlador UPFC;

$V_{UPFCesp}$: magnitude de tensão da barra k especificado pelo controlador UPFC;

k_P : fator de compensação do fluxo de potência ativa;

k_Q : fator de compensação do fluxo de potência reativa;

k_V : fator de compensação da magnitude de tensão;

P_{km0} : fluxo de potência ativa do Caso Base;

Q_{km0} : fluxo de potência reativa do Caso Base;

V_{k0} : Magnitude de tensão da barra k do Caso Base;

k, m : barras terminais do ramo considerado para implantação do UPFC.

Os fatores de compensação podem ser definidos como valores fixos ou então incluídos como variáveis a serem tratadas no processo de otimização.

No presente estudo, a fim de reduzir a complexidade do processamento, apenas o fator de compensação reativa (k_Q) foi definido como variável de otimização. Os fatores k_P e k_V foram mantidos constantes.

4.3 CODIFICAÇÃO DOS INDIVÍDUOS DO AG

Neste trabalho foi adotada a notação binária para a representação dos indivíduos tratados pelos Algoritmos Genéticos.

A decisão de quais variáveis serão codificadas é uma etapa importante, pois está diretamente relacionada ao processo de convergência, já que, quanto maior o número de bits na composição de cada indivíduo, mais lento tende a ser o processo de convergência.

Em função disso, neste trabalho foram definidas como variáveis do processo de otimização apenas a posição do UPFC (número do ramo do sistema elétrico) e, como definido na seção 4.2, o fator de compensação reativa (k_Q).

Como a posição do UPFC é uma variável inteira, ela pode ser determinada por um conjunto de bits, através de uma simples associação binário-decimal.

Porém, em função da adoção da codificação binária, o número de posições que podem ser ocupadas pelo UPFC fica dependente do número de bits associado a essa variável, ou seja, o número de posições possíveis é dado por: $N_{posições} = 2^{N_{bits}}$, onde N_{bits} é o número de bits de cada variável.

Dessa forma, o número de bits é escolhido de maneira a proporcionar um conjunto com número de elementos ligeiramente inferior ao número de ramos do sistema. Por exemplo, num sistema cujo número de ramos é igual a 20, o número de bits a ser adotado deve ser 4, gerando 16 possibilidades de alocação.

Em função disso, é aplicado um procedimento de pré-seleção, a ser descrito na seção 4.3, que serve para eliminar os ramos considerados menos aptos a receber um UPFC, até que se atinja um número de elementos (ramos) igual ao definido pelo número de bits adotado.

Com relação à representação do fator de compensação reativa série do UPFC (k_Q), definiu-se por destinar-lhe apenas um bit, de acordo com a seguinte convenção,

mostrada na Tabela 4.1, onde c é uma constante relacionada ao índice de compensação.

Tabela 4.1: Convenção para o fator de compensação reativa do UPFC

| Número Binário | k_Q |
|----------------|---------|
| 0 | $1 - c$ |
| 1 | $1 + c$ |

Dessa forma, a composição de cada gene está apresentada na Figura 4.2 a seguir:

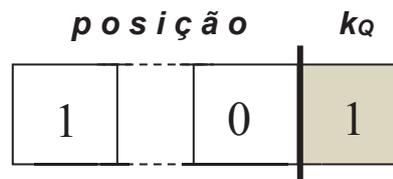


Figura 4.2: Representação binária para um UPFC

Como um gene representa a alocação de um UPFC, cada indivíduo é composto pela quantidade de genes relativa ao número de UPFCs a ser alocado, como mostrado na Figura 4.3.

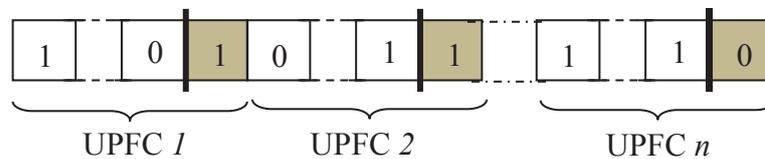


Figura 4.3: Representação de um indivíduo relativo à alocação de n UPFCs

4.3.1 Considerações quanto à Pré-Seleção

Como mencionado anteriormente, o procedimento de pré-seleção visa basicamente alinhar o conjunto dos ramos candidatos a receber um UPFC à codificação binária da variável posição. Além disso, com a redução do campo de busca, esse procedimento acaba proporcionando também uma redução no tempo de processamento.

Os critérios adotados no processo de pré-seleção resumem-se a:

- i. Eliminação dos ramos não aptos a receber um UPFC:

Através da verificação do número de conexões de cada barra (grau da barra), pode-se definir que ramos conectados a barras de grau 1 não são aptos a receber um controlador de fluxo, já que nesses casos, o fluxo é determinado exclusivamente pela carga (ou gerador) conectado à barra de grau 1, onde a barra de grau 1 é aquela

aonde chega apenas uma linha de transmissão. Esses ramos são então eliminados do conjunto de busca.

ii. Classificação por aptidão

A partir do resultado do cálculo do fluxo de potência do sistema operando sem controlador, os ramos não eliminados na etapa anterior são classificados tendo como base a capacidade de transmissão de potência e o nível de perdas, estabelecendo-se assim um ranking de preferência. Assim constitui o conjunto de ramos candidatos, os de maior ranking, até que se atinja o número de elementos (ramos) determinado pelo número de bits associado à variável posição.

4.4 FUNÇÕES *FITNESS* DOS AGS

Como o Controlador UPFC permite o controle tanto do fluxo de potência como da magnitude da tensão de barra, foram considerados para sua alocação os seguintes critérios, baseados apenas em aspectos técnicos, que definem as funções *fitness* aplicadas nas análises:

i. Nível de Perdas Ativas:

$$f_{PERDAS} = \sum_{k=1}^{nB} P_k \quad (4.8)$$

onde:

P_k : potência ativa injetada em cada barra;

nB : número de barras do sistema.

ii. Nível de Desvio de Tensão;

$$f_{DESVIO} = 100 \sum_{k=1}^{nB} (|V_k - V_{ref}|) \quad (4.9)$$

onde:

V_k : Magnitude de tensão de cada barra;

V_{ref} : Magnitude de tensão de referência.

iii. Índice Normalizado de Perdas Ativas e Desvio de Tensão

$$f_{NORM} = \frac{f_{PERDAS}}{PA_0} + \frac{f_{DESvio}}{DT_0} \quad (4.10)$$

Onde:

$$PA_0 = \sum_{k=1}^{nB} P_{k0} \quad (4.11)$$

$$DT_0 = 100 \sum_{k=1}^{nB} (|V_{k0} - V_{ref}|) \quad (4.12)$$

onde:

P_{k0} : Potência ativa injetada em cada barra do sistema operando sem UPFC

V_{k0} : Magnitude de tensão de cada barra do sistema operando sem UPFC

4.5 SISTEMA DE MEMÓRIA

Durante a fase de testes foi evidenciada uma característica marcante da técnica de otimização via Algoritmos Genéticos. Foi observado que, a medida que o processamento avança no sentido da seleção dos indivíduos mais aptos, os mesmos repetem com cada vez maior frequência de uma geração para outra, mesmo dentro de uma mesma geração, o que, em termos práticos se reflete em ciclos de operação desnecessários, aumentando assim o tempo de processamento. Cabe lembrar que, no estudo em questão, a verificação do *fitness* de cada indivíduo significa a avaliação de um fluxo de carga contendo um (ou mais) Controladores UPFC.

De forma a corrigir este comportamento foi aplicado um sistema de memória que retém a informação do valor da função *fitness* de cada indivíduo analisado. Assim, antes que o processo de cálculo do fluxo de potência seja disparado, verifica-se na posição de memória relativa ao indivíduo se já consta um resultado, indicando que o mesmo já tenha sido avaliado anteriormente, e dispensando assim uma reavaliação redundante e, portanto, desnecessária.

4.6 ESTRUTURA DE PROCESSAMENTO

Na Figura 4.4 encontra-se o fluxograma do processamento computacional integrado com o AG, evidenciando a distribuição do pré-processamento e da construção da memória.

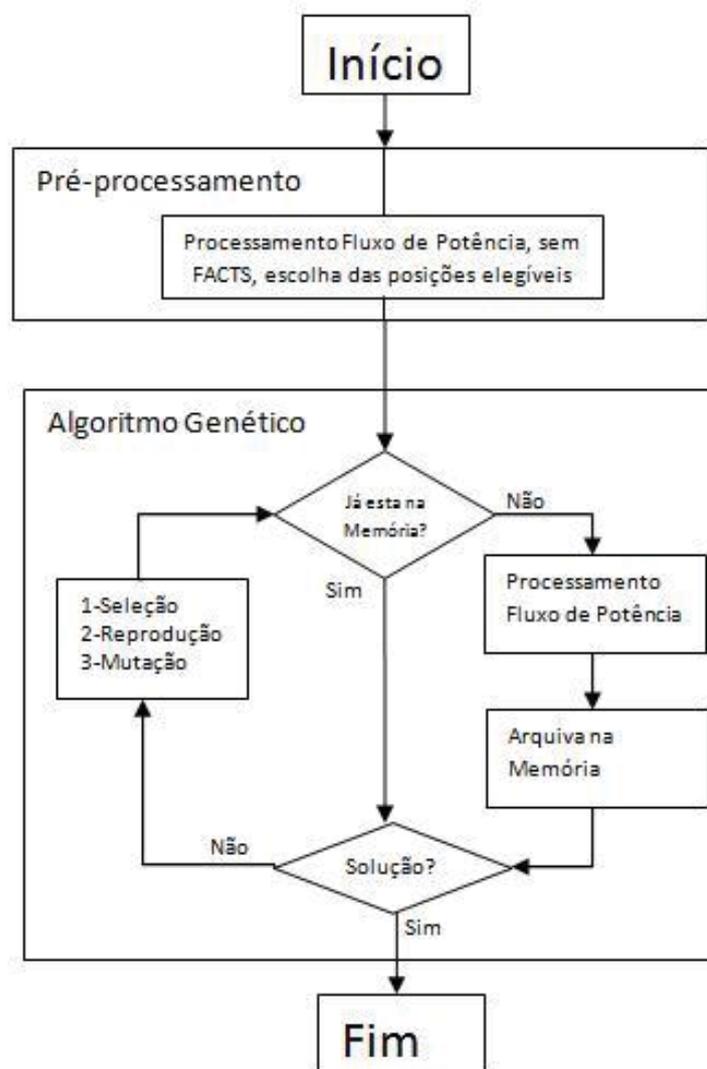


Figura 4.4: Estrutura do processo de simulação

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada a metodologia desenvolvida para realização do estudo proposto.

Foram abordados aspectos relativos à modelagem do Controlador e sua incorporação na rotina de cálculo de fluxo de potência, definição de funções de avaliação do efeito da aplicação dos controladores, bem como foram descritas algumas técnicas associadas à melhoria do processo de otimização via AGs.

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo estão apresentados os resultados das simulações, utilizando a metodologia descrita nos capítulos anteriores, para dois diferentes sistemas, o sistema de 14 barras e o de 118 barras do IEEE.

As simulações com o sistema de 14 barras, por ser este um sistema de pequeno porte, com apenas 20 ramos candidatos a receber um controlador, tiveram o propósito principal de testar e validar a metodologia proposta.

Os dois sistemas considerados foram analisados para quatro cenários de carregamento: Carga Leve, Carga Nominal, Carga Pesada e Carga Ponderada. Esta última foi definida como uma composição de 55% da Carga Nominal, 35% da Carga Leve e 10% da Carga Pesada, visando simular uma situação semelhante à curva de carga típica.

Para a simulação com o sistema de 14 barras, a situação de Carga Leve foi definida como sendo composta pelo decréscimo uniforme de 50% de cada carga e de cada geração do caso Carga Nominal. Para a Carga Pesada, definiu-se um acréscimo uniforme de 130% em relação a potência especificada para cada barra da Carga Nominal. Em todos os cenários o fator de potência de cada barra individual foi mantido constante.

Já para o sistema de 118 barras foi definida uma distribuição não uniforme para as cargas nos casos de Carga Leve e Pesada em relação à Carga Nominal, mantendo o mesmo fator de potência para cada carga individual, visando simular uma distribuição de carregamento mais setorizado, ou seja, prevendo aumentos de carga maiores em determinadas áreas do sistema do que em outras, o mesmo valendo para a consideração de redução de carga.

No Anexo 1, são apresentados os dados de barras e ramos dos sistemas utilizados pela simulação.

A apresentação e análise dos resultados está dividida em duas partes. A primeira, descrita na Seção 5.2, considera as simulações feitas para cada caso de carregamento individualmente (leve, médio e pesado) a fim de observar possíveis variações na escolha do local adequado à instalação do controlador em função do nível de carregamento do sistema, não servindo, portanto, como definidora da

alocação mais adequada para o controlador UPFC. Outro propósito desta etapa é o de servir como referência para a etapa seguinte, que trata da Carga Ponderada, considerada naturalmente mais relevante para o processo de alocação.

Na segunda parte, Seção 5.3, são analisados os resultados obtidos num cenário mais próximo de situações reais, em que o nível de carregamento varia ao longo do tempo, e que neste trabalho está sendo representado pela condição dita de Carga Ponderada, detalhada anteriormente.

Como os controladores FACTS, como o UPFC, são instalações não móveis, abordagens como a apresentada nesta segunda parte são de fato mais apropriadas para fornecerem resultados que sirvam de apoio a decisão do local de instalação do controlador, já que o mesmo não pode ser deslocado ao sabor das mudanças de carga.

5.2 RESULTADO PARA CADA CONDIÇÃO DE CARGA

Para os dois sistemas analisados foram consideradas simulações para os três tipos de carregamento (leve, nominal e pesada) descritos anteriormente na introdução deste capítulo.

Foram analisados, para o sistema de 14 barras, a alocação de um ou dois controladores UPFCs, e para o sistema de 118 barras, até três UPFCs.

5.2.1 Resultado para o Sistema de 14 Barras

A Figura 5.1 abaixo mostra o diagrama unifilar do sistema teste de 14 barras da IEEE.

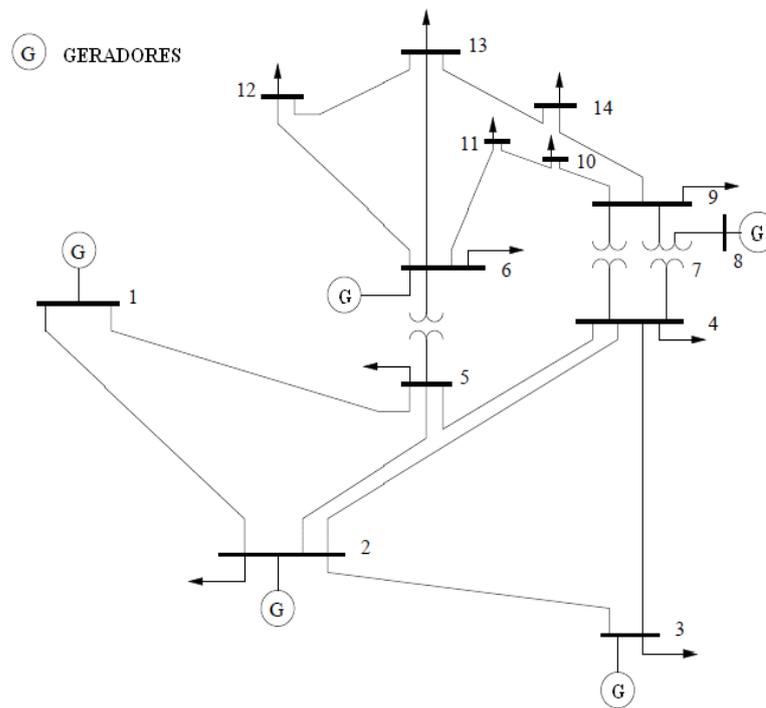


Figura 5.1 Diagrama Unifilar do Sistema Teste da IEEE de 14 Barras

Na simulação para o sistema de 14 barras foram utilizados os seguintes valores para os parâmetros dos Algoritmos Genéticos:

- População inicial = 10 indivíduos;
- Limite de gerações = 1000;
- Limite de “*Stall*” de gerações = 100
- Tempo limite = 100000 segundos;

A definição destes valores foi baseada na dimensão do sistema a ser simulado, sendo que os limites de tempo, gerações e “*stall*” foram estabelecidos a fim de assegurar que a parada da simulação não ocorresse nem pelo tempo máximo, nem fosse atingido o número máximo de gerações. Dessa forma, o critério de parada predominante fica sendo a estabilidade da solução, definida pelo parâmetro “*stall*”. Assim, nesse caso, considera-se que a solução é obtida e o processo de simulação finalizado, após cem gerações seguidas (ou seja, 10% do máximo de gerações admitido) apresentarem o mesmo resultado final.

A Tabela 5.1 mostra quais são os ramos não aptos a receber o UPFC para o sistema de 14 barras de acordo com o primeiro critério descrito no item 4.3.1 Considerações quanto à pré-Seleção.

Tabela 5.1: Lista de ramos não aptos à receber o UPFC para o sistema de 14 barras

| N° de Ramo | N° da Barra | |
|------------|-------------|------|
| | De | Para |
| 1 | 1 | 2 |
| 3 | 2 | 3 |
| 14 | 7 | 8 |

Os resultados referentes aos níveis de perdas ativas estão descritos na Tabela 5.2 abaixo.

Tabela 5.2: Resultados dos níveis de perdas em p.u. para o sistema IEEE 14 barras.

| 14 BARRAS | PERDAS ATIVAS sem UPFC | PERDAS PÓS OTIMIZAÇÃO | | FATOR DE COMP. REATIVA | | ALOCAÇÃO (LINHA) | | |
|-----------|------------------------|-----------------------|--------|------------------------|--------|------------------|--------|-----|
| | | 1 UPFC | 2 UPFC | 1 UPFC | 2 UPFC | 1 UPFC | 2 UPFC | |
| LEVE | 0,0378 | 0,0236 | 0,0046 | 0,9 | 0,9 | 1-5 | 1-5 | 2-4 |
| NOMINAL | 0,1591 | 0,1097 | 0,0681 | 0,9 | 0,9 | 1-5 | 1-5 | 4-9 |
| PESADA | 0,2786 | 0,2027 | 0,1453 | 1,1 | 1,1 | 1-5 | 1-5 | 4-9 |

Na Figura 5. 2 abaixo, são mostrados, graficamente, os resultados obtidos para análise dos níveis de perdas para cada tipo de carga.

Da análise do resultado destas simulações, pode-se perceber que independente da situação de carga, a linha 1-5 representa a melhor posição para implantação do UPFC. Quando é considerada a instalação de um segundo UPFC, percebe-se que o melhor resultado é verificado quando este segundo controlador é instalado na linha 4-9, a não ser para a condição de carga leve, onde a linha 2-4 é selecionada como a melhor alternativa.

Quanto ao nível de compensação reativa, pode-se observar que, para carga leve e nominal, o melhor resultado foi obtido com a redução do fluxo de potência reativa e para a situação de carga pesada, um incremento do fluxo reativo proporcionou melhor resultado.

A redução dos níveis de perdas para o sistema de 14 barras foi em torno de 30%, sendo esta redução considerada bem significativa para sistemas de potência.

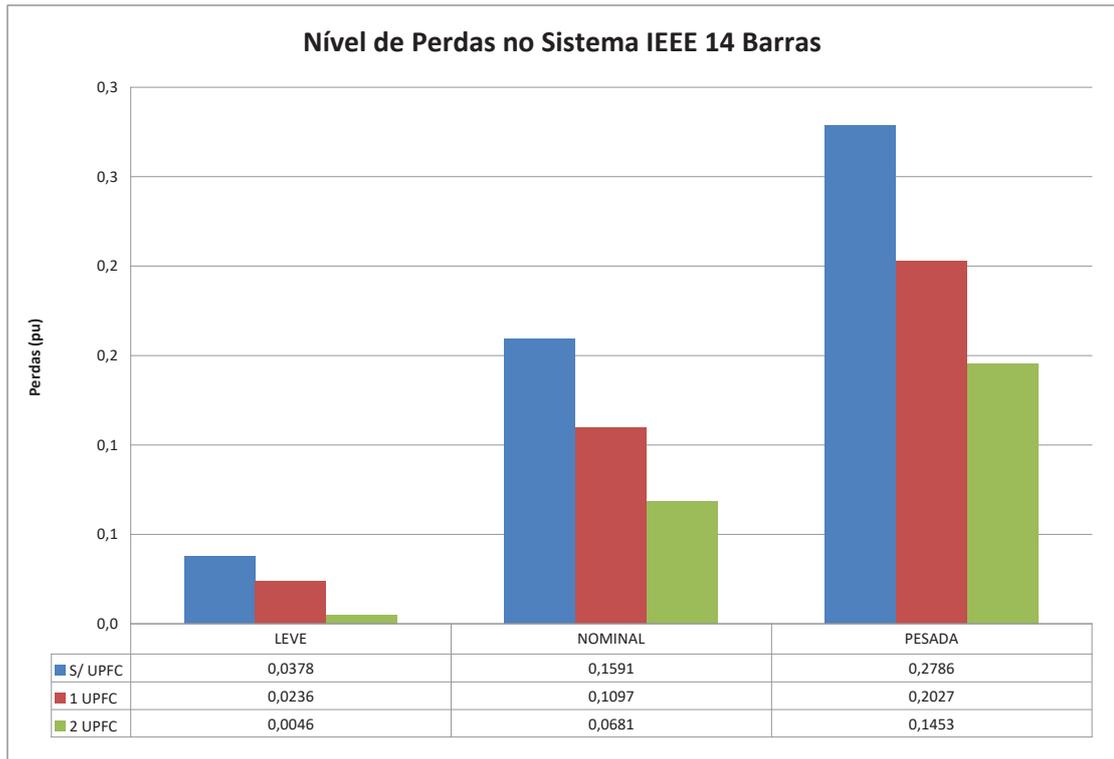


Figura 5. 2: Comparativo dos Níveis de Perdas Ativas para o Sistema de 14 Barras

No gráfico da Figura 5.3 são apresentados os níveis de perda ativa de cada linha de transmissão do sistema antes e após a instalação do UPFC para o caso de carga pesada.

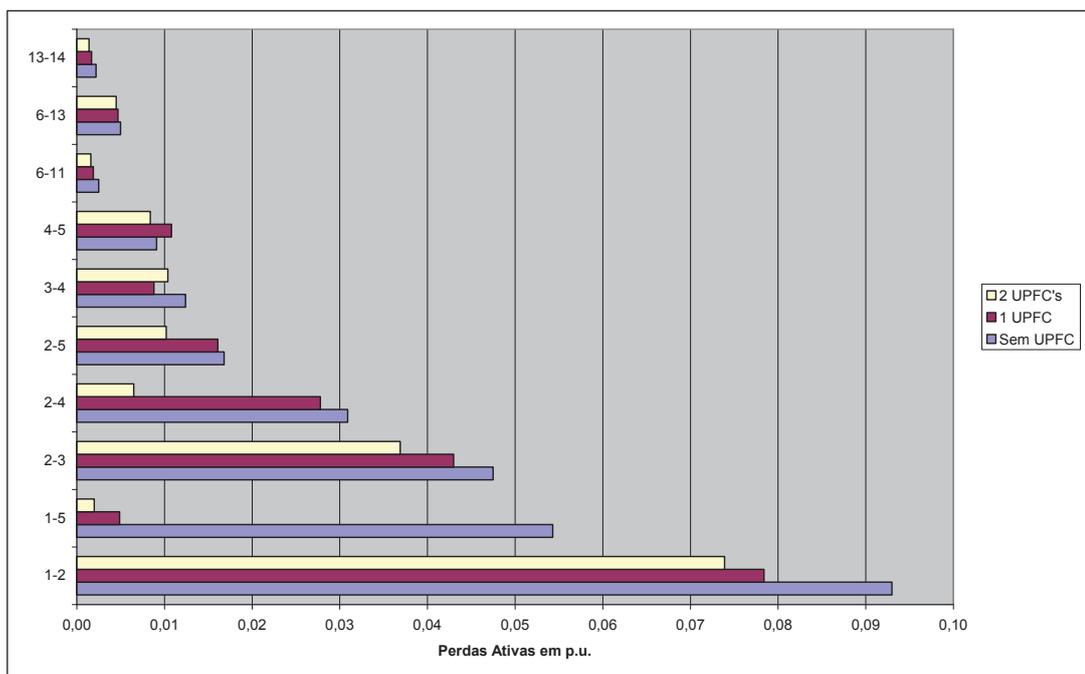


Figura 5.3: Comparativo dos níveis de perdas nas LTs do sistema de 14 barras antes e após a instalação do UPFC

Considerando agora como objetivo a minimização dos desvios de tensão de barra, foram obtidos os resultados descritos na Tabela 5.3 abaixo.

TABELA 5.3: RESULTADOS PARA DESVIO DE TENSÃO EM P.U. PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS.

| 14 BARRAS | DESVIO DE TENSÃO sem UPFC | DESVIO PÓS OTIMIZAÇÃO | | FATOR DE COMP. REATIVA | | ALOCAÇÃO (LINHA) | | |
|-----------|---------------------------|-----------------------|--------|------------------------|--------|------------------|--------|-------|
| | | 1 UPFC | 2 UPFC | 1 UPFC | 2 UPFC | 1 UPFC | 2 UPFC | |
| LEVE | 0,2159 | 0,1309 | 0,1309 | 1,1 | 1,1 | 10-11 | 10-11 | 10-11 |
| NOMINAL | 1,0099 | 0,3589 | 0,1285 | 0,9 | 1,1 | 10-11 | 13-14 | 6-13 |
| PESADA | 1,8834 | 0,8563 | 0,3047 | 0,9 | 1,1 | 10-11 | 13-14 | 6-13 |

Na Figura 5. 4 abaixo é feita uma comparação gráfica dos resultados da Tabela 5.3, para cada condição de carregamento.

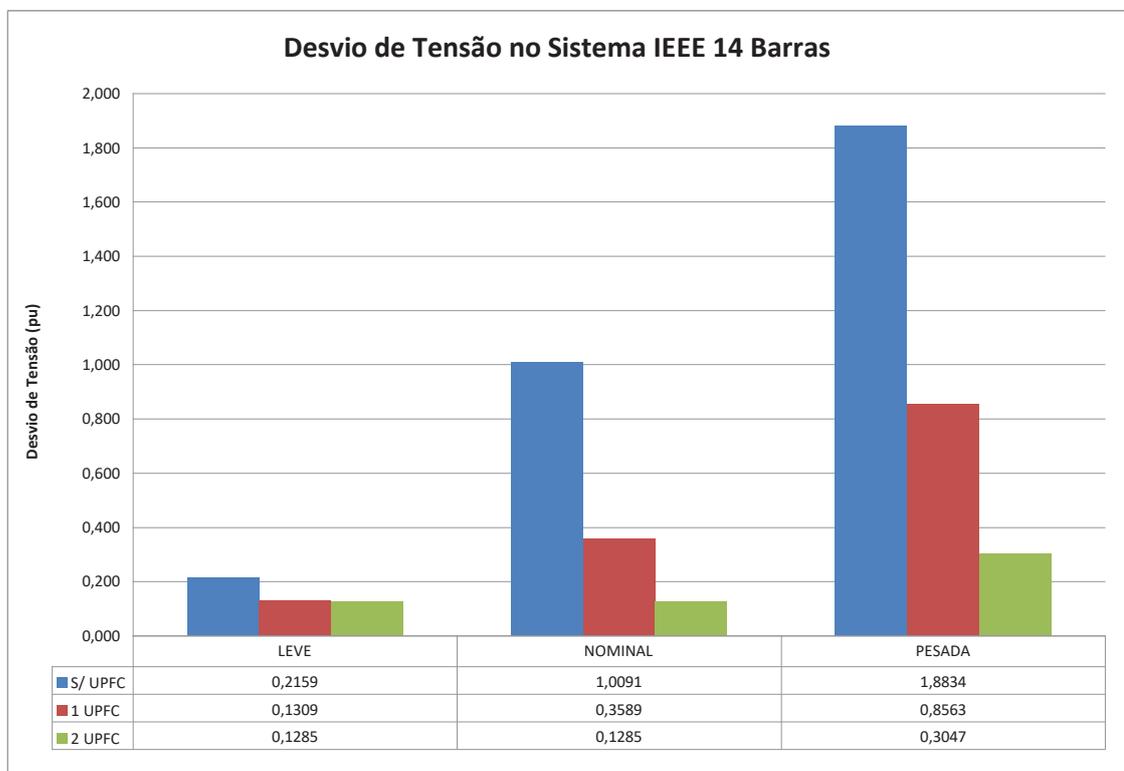


Figura 5. 4: Comparativo dos níveis de desvio de tensão para sistema de 14 barras

Como resultado das simulações, a melhor alocação indicada tendo como objetivo a minimização dos desvios de tensão do sistema de 14 barras, considerando apenas um controlador, é entre as barras 10 e 11, para todas as condições de carregamento estudadas. Para dois controladores a melhor alocação foi entre as barras 6 e 13 e entre as barras 13 e 14, a não ser para a situação de carga leve, em que a simulação indicou que a introdução de mais um controlador não melhoraria o

perfil de tensão, tendo indicado a alocação de apenas um controlador entre as barras 10 e 11.

O nível de compensação reativa, na maioria dos casos, indicou melhor resultado para uma compensação de 110%.

A Figura 5.5 abaixo apresenta a variação observada no perfil de tensão do sistema de 14 barras, na condição de carga pesada, a partir da instalação dos Controladores UPFC.

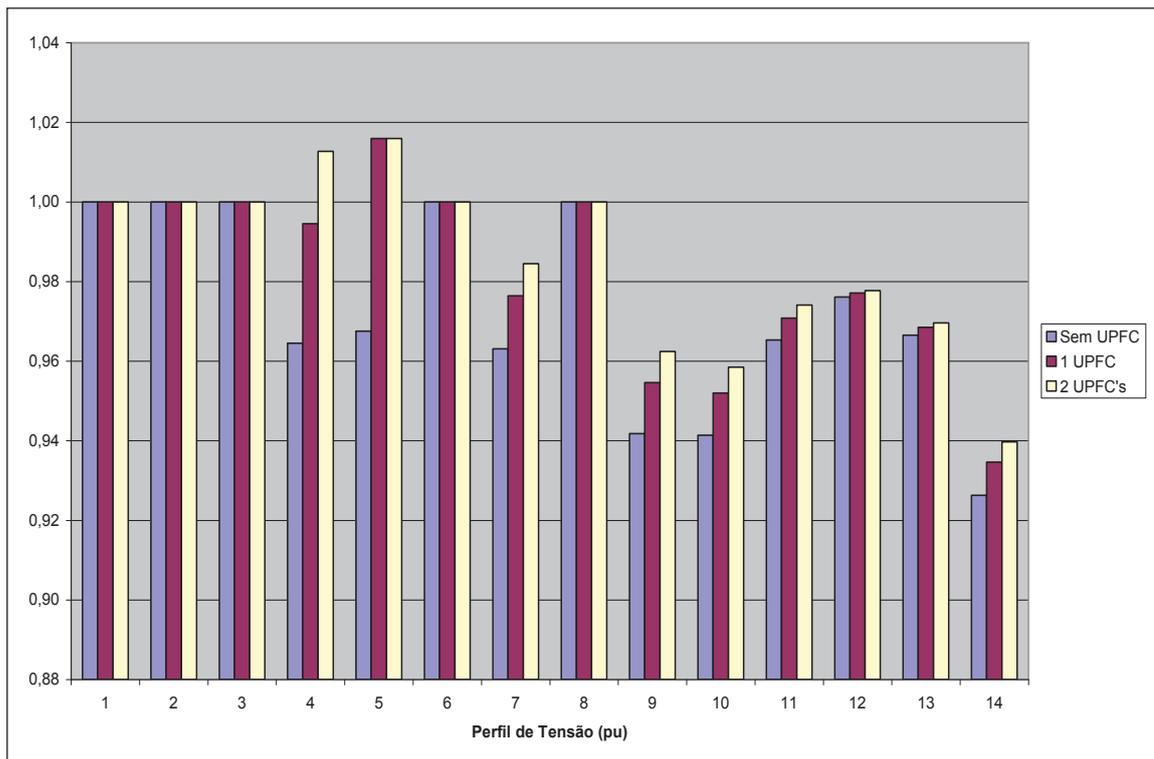


Figura 5.5: Comparativo do perfil de tensão do sistema de 14 barras antes e após a instalação dos UPFCs

Quando as perdas ativas e o desvio de tensão são considerados simultaneamente na determinação da alocação do UPFC, através do índice normalizado definido pela equação (4.10), os resultados encontrados são os apresentados na Tabela 5.4 abaixo:

Tabela 5.4: Resultados para Perdas e Desvio de Tensão para o Sistema IEEE 14 Barras.

| 14 BARRAS | PERDAS PÓS OTIMIZAÇÃO | | FATOR DE COMP. REATIVA | | ALOCÇÃO (LINHA) | | |
|-----------|-----------------------|--------|------------------------|--------|-----------------|--------|------|
| | 1 UPFC | 2 UPFC | 1 UPFC | 2 UPFC | 1 UPFC | 2 UPFC | |
| LEVE | 1,6085 | 1,0841 | 0,9 | 0,9 | 10-11 | 4-5 | 2-4 |
| NOMINAL | 1,2472 | 0,9511 | 0,9 | 1,1 | 4-9 | 1-5 | 4-9 |
| PESADA | 1,3066 | 1,0067 | 1,1 | 0,9 | 4-9 | 4-9 | 6-13 |

Na Figura 5.6 abaixo, esses resultados são apresentados graficamente.

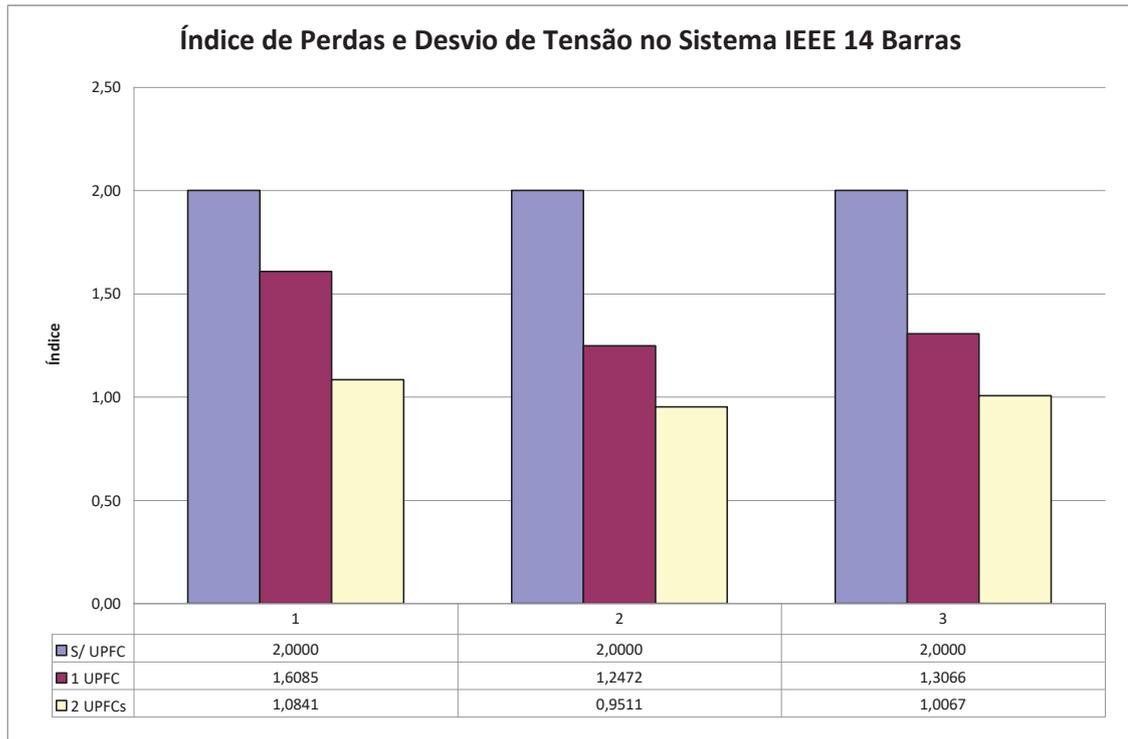


Figura 5.6: Índices normalizados de perdas e desvios de tensão para sistema de 14 barras

Pode-se perceber que com esta condição de otimização, em que o desvio de tensão e as perdas ativas são tratados simultaneamente e com pesos equivalentes, a linha 4 – 9 aparecem como as mais indicadas a receber um UPFC, a não ser na situação de carga leve, onde os resultados diferem tanto para a instalação de um único UPFC, como para dois deles.

A redução do índice ponderado foi bem significativa, levando-se em consideração que o valor deste índice é 2,0 para o sistema sem compensadores.

5.3 RESULTADOS PARA O SISTEMA DE 118 BARRAS

A Figura 5. 7 mostra o diagrama unifilar do sistema teste de 118 barras da IEEE.

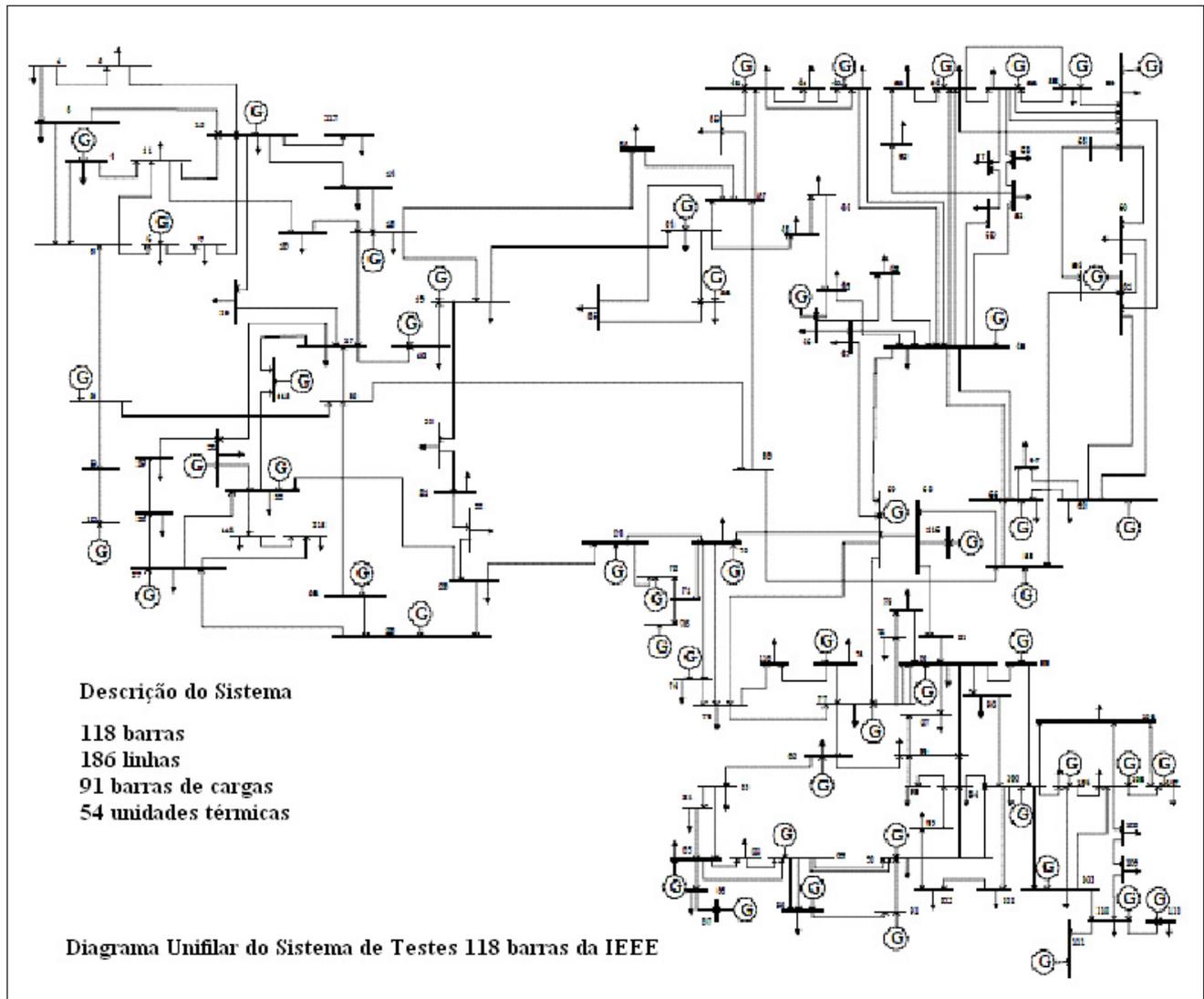


Figura 5. 7: Diagrama unifilar do sistema teste IEEE 118 barras

Para a simulação com o sistema de 118 barras foram adotados os seguintes valores para os parâmetros do AG, que seguiram as mesmas premissas definidas para simulação do sistema de 14 barras:

- População inicial = 30 indivíduos;
- Limite de gerações = 1000;
- Limite de “*Stall*” de gerações = 100;
- Tempo limite = 100000 segundos.

A Tabela 5.5 mostra quais são os ramos não aptos a receber o UPFC para o sistema de 118 barras de acordo com o primeiro critério descrito no item 4.3.1 Considerações quanto à pré-Seleção.

Tabela 5.5: Lista de ramos não aptos à receber o UPFC para o sistema de 118 barras

| N° de Ramo | N° da Barra | |
|------------|-------------|------|
| | De | Para |
| 9 | 9 | 10 |
| 24 | 18 | 19 |
| 26 | 15 | 19 |
| 32 | 26 | 25 |
| 33 | 25 | 27 |
| 42 | 31 | 32 |
| 43 | 27 | 32 |
| 45 | 19 | 34 |
| 49 | 34 | 36 |
| 57 | 40 | 42 |
| 66 | 42 | 49 |
| 67 | 42 | 49 |
| 75 | 49 | 54 |
| 76 | 49 | 54 |
| 77 | 54 | 55 |
| 78 | 54 | 56 |
| 79 | 55 | 56 |
| 84 | 54 | 59 |
| 85 | 56 | 59 |
| 86 | 56 | 59 |
| 87 | 55 | 59 |
| 89 | 59 | 61 |
| 92 | 61 | 62 |
| 98 | 49 | 66 |
| 99 | 49 | 66 |
| 100 | 62 | 66 |
| 102 | 65 | 66 |
| 106 | 49 | 69 |
| 108 | 69 | 70 |
| 109 | 24 | 70 |
| 111 | 24 | 72 |
| 113 | 71 | 73 |
| 114 | 70 | 74 |
| 118 | 76 | 77 |
| 119 | 69 | 77 |
| 123 | 77 | 80 |
| 124 | 77 | 80 |
| 134 | 86 | 87 |
| 136 | 85 | 89 |
| 138 | 89 | 90 |
| 139 | 89 | 90 |
| 140 | 90 | 91 |

| | | |
|-----|-----|-----|
| 141 | 89 | 92 |
| 142 | 89 | 92 |
| 143 | 91 | 92 |
| 153 | 80 | 99 |
| 154 | 92 | 100 |
| 159 | 99 | 100 |
| 163 | 100 | 103 |
| 164 | 100 | 104 |
| 165 | 103 | 104 |
| 166 | 103 | 105 |
| 168 | 104 | 105 |
| 170 | 105 | 107 |
| 174 | 103 | 110 |
| 176 | 110 | 111 |
| 177 | 110 | 112 |
| 179 | 32 | 113 |
| 183 | 68 | 116 |

Os resultados referentes aos níveis de perdas para o sistema da IEEE 118 barras estão descritos na Tabela 5.6 abaixo.

Tabela 5.6: Níveis de perdas ativas para o sistema IEEE 118 Barras.

| 118 BARRAS | PERDAS ATIVAS sem UPFC | PERDAS ATIVAS PÓS OTIMIZAÇÃO | | | ALOCAÇÃO (LINHA) | | | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------------|--------|--------|------------------|--------|-------|--------|-------|-------|
| | | 1 UPFC | 2 UPFC | 3 UPFC | 1 UPFC | 2 UPFC | | 3 UPFC | | |
| LEVE | 0,9419 | 0,6636 | 0,5615 | 0,4653 | 8-9 | 8-9 | 26-30 | 8-9 | 38-65 | 26-30 |
| NOMINAL | 1,6310 | 1,1603 | 1,0116 | 0,5968 | 48-49 | 48-49 | 50-57 | 5-11 | 4-11 | 80-96 |
| PESADA | 2,7222 | 1,9980 | 1,7611 | 1,5600 | 5-11 | 5-11 | 69-75 | 5-11 | 94-95 | 69-75 |

Na Figura 5.8 abaixo, são mostrados os resultados obtidos para análise dos níveis de perdas para cada tipo de carregamento.

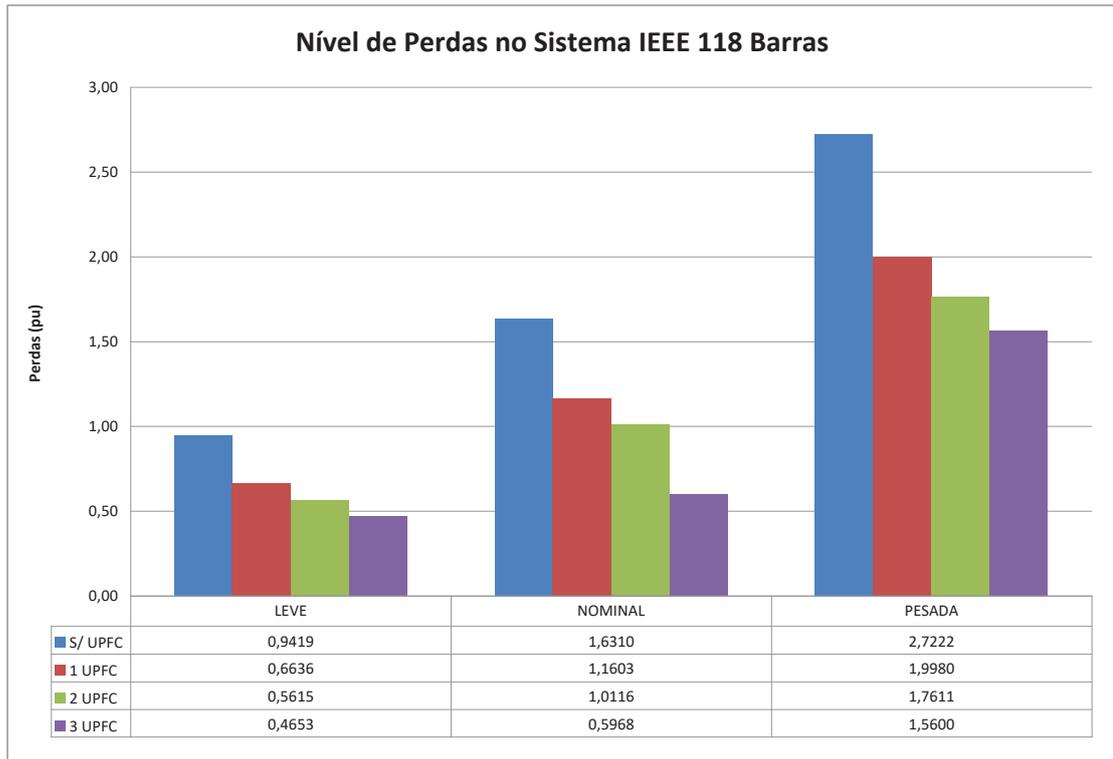


Figura 5.8: Comparação dos níveis de perdas ativas para o sistema de 118 barras

Como para este sistema de 118 barras as variações de carga não foram definidas de maneira uniforme, os resultados obtidos a partir das simulações tendo como função objetivo a minimização das perdas ativas, indicam várias possíveis alocações para os controladores.

Para a análise dos níveis de desvio de tensão os resultados obtidos para o sistema da IEEE 118 barras estão apresentados na Tabela 5.7.

Na Figura 5.9 abaixo, são mostrados, graficamente, os resultados obtidos para análise dos desvios de tensão para cada tipo de carregamento.

Tabela 5.7: Resultados para desvio de tensão para o sistema IEEE 118 barras.

| 118 BARRAS | DESVIO DE TENSÃO sem UPFC | DESVIO DE TENSÃO PÓS OTIMIZAÇÃO | | | ALOCAÇÃO (LINHA) | | | | | |
|------------|---------------------------|---------------------------------|--------|--------|------------------|--------|---------|--------|---------|-------|
| | | 1 UPFC | 2 UPFC | 3 UPFC | 1 UPFC | 2 UPFC | | 3 UPFC | | |
| LEVE | 8,4199 | 7,7284 | 7,3978 | 7,1097 | 49-51 | 22-23 | 49-51 | 22-23 | 49-51 | 45-46 |
| NOMINAL | 9,4414 | 8,7271 | 8,2090 | 7,9029 | 83-85 | 83-85 | 23-25 | 83-85 | 23-25 | 92-94 |
| PESADA | 11,1896 | 10,3701 | 9,6066 | 9,0435 | 100-101 | 39-40 | 100-101 | 39-40 | 100-101 | 45-49 |

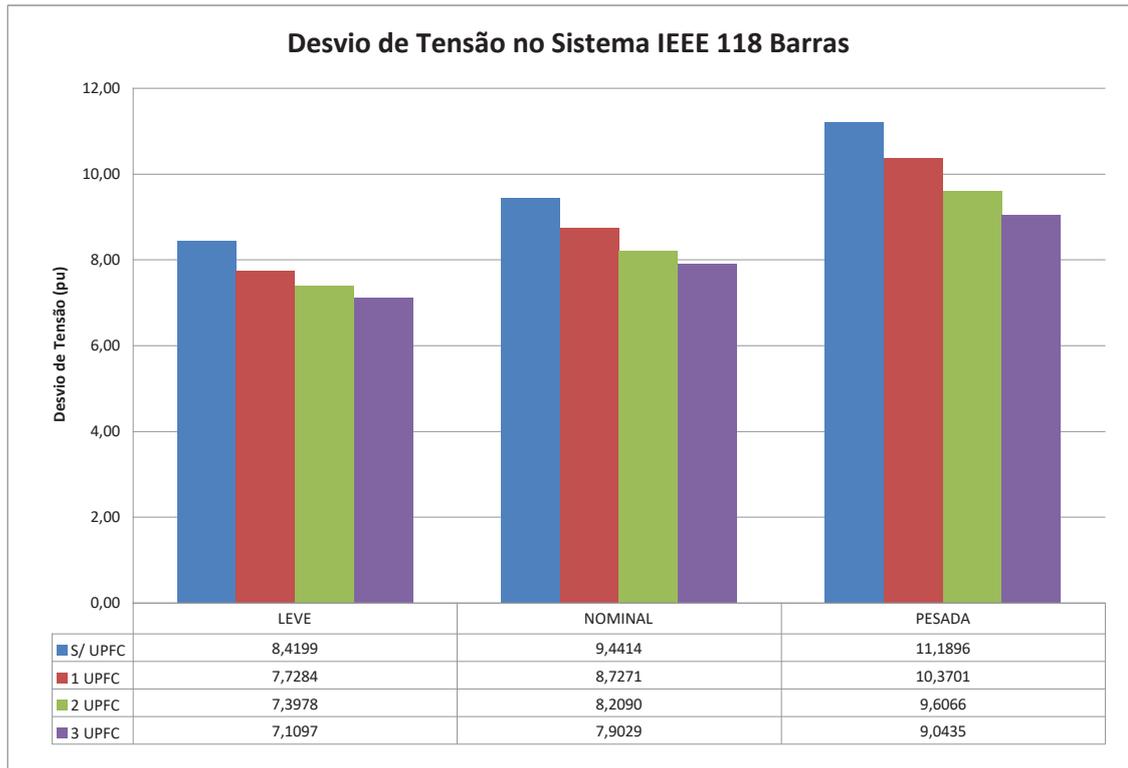


Figura 5.9: Análise dos desvios de tensão para sistema de 118 barras

A redução dos desvios de tensão para o sistema de 118 barras foi em torno de 10%.

Foi analisado também quanto ao nível de perdas e do desvio de tensão juntamente, os resultados encontrados são mostrados na Tabela 5.8 abaixo:

Tabela 5.8: Resultados para as perdas e desvio de tensão para o sistema IEEE 118 barras.

| 118 BARRAS | ÍNDICE PÓS OTIMIZAÇÃO | | | ALOCAÇÃO (LINHA) | | | | | |
|------------|-----------------------|--------|--------|------------------|--------|-------|--------|-------|-------|
| | 1 UPFC | 2 UPFC | 3 UPFC | 1 UPFC | 2 UPFC | | 3 UPFC | | |
| LEVE | 1,7701 | 1,6549 | 1,5010 | 8-9 | 8-9 | 49-51 | 8-9 | 85-88 | 88-89 |
| NOMINAL | 1,7612 | 1,6648 | 1,2353 | 48-49 | 83-85 | 48-49 | 5-11 | 80-96 | 48-49 |
| PESADA | 1,7604 | 1,6574 | 1,5672 | 5-11 | 5-11 | 69-75 | 5-11 | 2-12 | 79-80 |

Na Figura 5. 10 abaixo, são mostrados, graficamente, os resultados obtidos para análise dos níveis de perdas e desvio de tensão para cada tipo de carregamento.

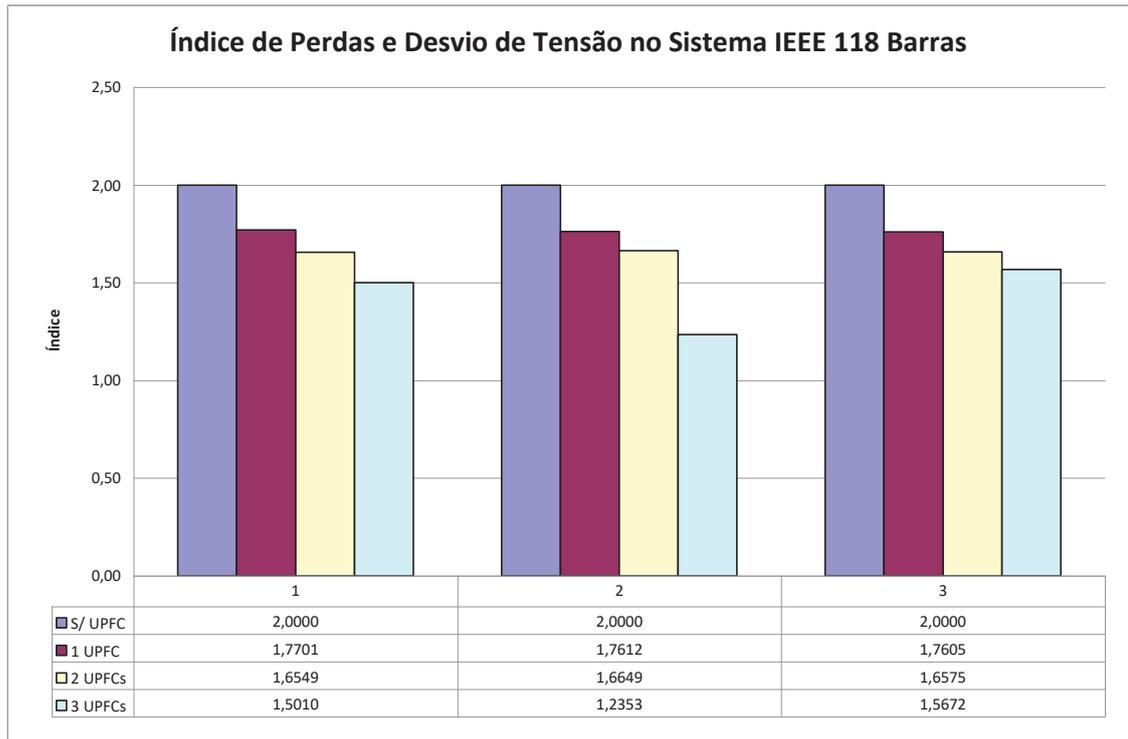


Figura 5. 10: Análise dos índices de perdas e desvio de tensão para sistema IEEE de 118 barras

Assim como ocorre na análise dos níveis de perdas e desvio de tensão analisados separadamente, para esse sistema maior, que tem mais opções, não tem como indicar qual melhor alocação para este caso.

A redução do índice ponderado foi bem significativo levando em consideração que este índice é dois para o sistema sem compensadores.

5.4 RESULTADOS PARA O CENÁRIO DE CARGA PONDERADA

Neste item, são apresentados e analisados os resultados de simulação a partir do cenário definido como Carga Ponderada, em que três níveis de carregamento são avaliados sequencialmente e são considerados na composição da função de otimização. Nesta etapa são apresentados os resultados apenas do critério de otimização definido pela expressão (4.10), que trata do índice normalizado de perdas ativas e desvio de tensão.

As condições de simulações são as mesmas consideradas no item anterior, adotadas para cada sistema em estudo.

5.4.1 Resultado para o Sistema de 14 Barras

Os resultados obtidos para o sistema de 14 barras considerando a alocação de um e dois Controladores UPFC são apresentados na Tabela 5.9 abaixo:

Tabela 5.9: Resultados para perdas e desvio de tensão para o sistema IEEE de 14 barras

| 14 BARRAS | PERDAS PÓS OTIMIZAÇÃO | | FATOR DE COMP. REATIVA | | ALOCAÇÃO (LINHA) | | |
|-----------|-----------------------|--------|------------------------|-----------------|------------------|--------|-----|
| | 1 UPFC | 2 UPFC | 1 UPFC | 2 UPFC | 1 UPFC | 2 UPFC | |
| PONDERADA | 1,0349 | 0,7409 | 0,9 / 1,1 / 0,9 | 0,9 / 1,1 / 1,1 | 1-5 | 1-5 | 4-9 |

Na Figura 5.11 abaixo, esses resultados são comparados graficamente.

Pode-se perceber através dos resultados apresentados acima que a melhor alocação para o Controlador UPFC no sistema de 14 barras é entre as barras 1 e 5. Quando se considera a instalação de mais um controlador, a linha 4-9 aparece como mais indicada.

A redução deste índice que conjuga perdas e desvio de tensão foi bem significativa, chegando a 35% quando é considerada a instalação de dois controladores.

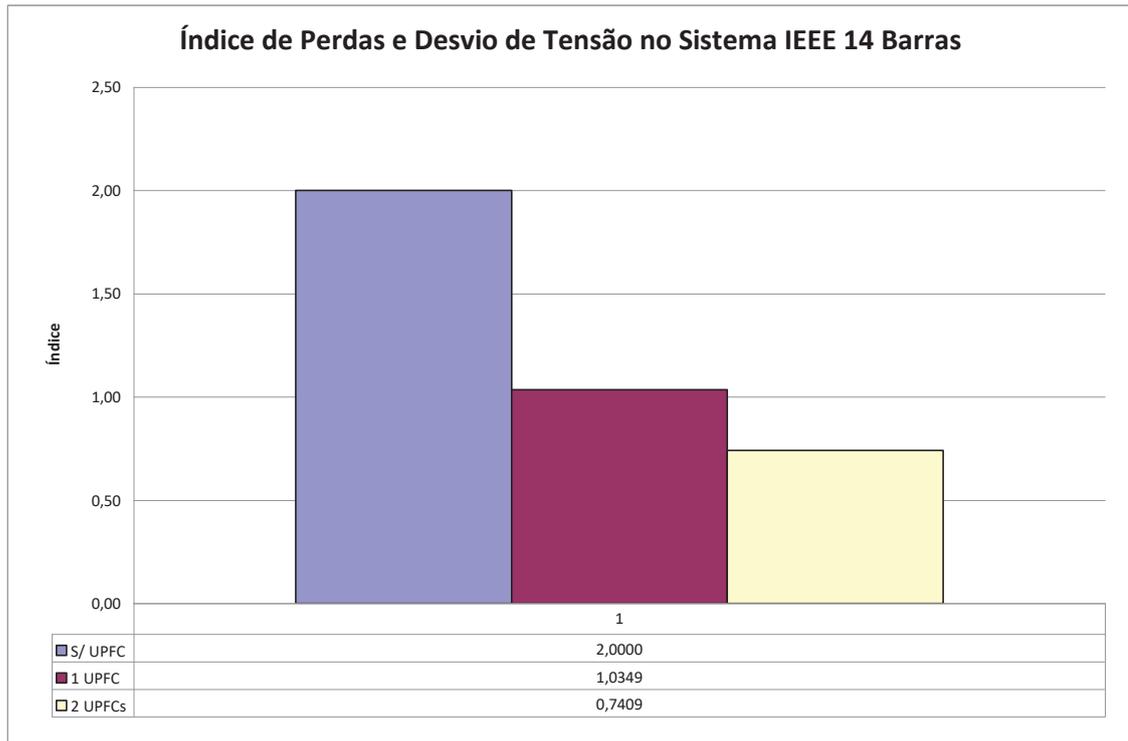


Figura 5.11: Índices de Perdas Ativa e Desvio de Tensão para Sistemas de 14 Barras.

5.4.2 Resultado para o sistema de 118 barras

Os resultados obtidos nas simulações com o sistema de 118 barras considerando o índice de perdas e desvio de tensão como critério de alocação estão apresentados na Tabela 5.10 abaixo. Foram consideradas a instalação de até três Controladores UPFC para este sistema.

Tabela 5. 10: Resultados para perdas e desvio de tensão para o sistema IEEE 118 barras.

| 118 BARRAS | ÍNDICE PÓS OTIMIZAÇÃO | | | ALOCAÇÃO (LINHA) | | | | | |
|------------|-----------------------|--------|--------|------------------|--------|-------|--------|-------|-------|
| | 1 UPFC | 2 UPFC | 3 UPFC | 1 UPFC | 2 UPFC | | 3 UPFC | | |
| PONDERADA | 1,6064 | 1,5129 | 1,4282 | 48-49 | 48-49 | 50-57 | 83-85 | 48-49 | 50-57 |

Na Figura 5.12 apresenta um comparativo gráfico dos resultados mostrados na Tabela 5.10 acima.

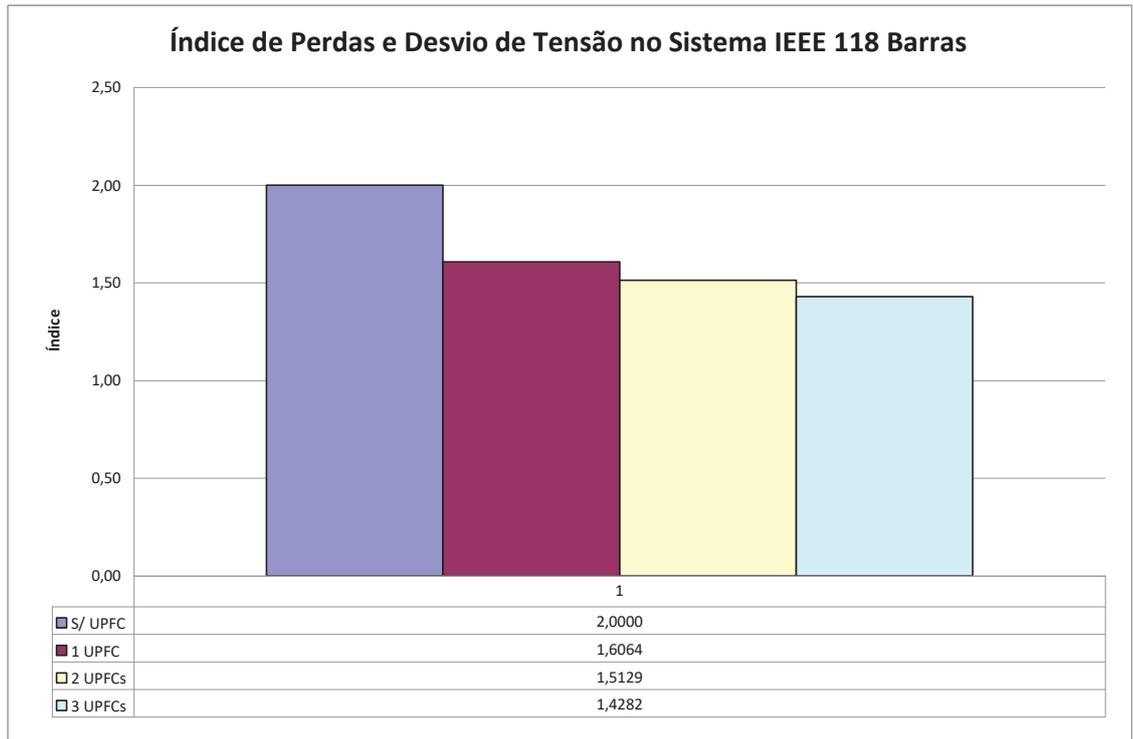


Figura 5.12: Análise dos índices de perdas e desvio de tensão para sistema de 118 barras.

Observando os resultados destas simulações, a linha 48 – 49 aparece como preferencial para receber um UPFC. Quando são consideradas a instalação de mais controladores, as linhas 50 – 57 e 83 - 85 aparecem, em ordem de preferência, como as mais indicadas para melhorar simultaneamente o nível de perdas ativas e o perfil de tensão do sistema de 118 barras.

Pode-se notar que a redução do índice avaliado fica em torno de 20% quando considerada a instalação de um UPFC e chega a quase 30% quando da alocação de três controladores.

As Figuras 5.13 e 5.14 mostram os resultados encontrados para a alocação dos controladores UPFC para todos os casos analisados anteriormente. Nestas figuras estão marcadas com cores diferentes para as várias opções de alocação sugeridas pela metodologia desenvolvida neste trabalho.

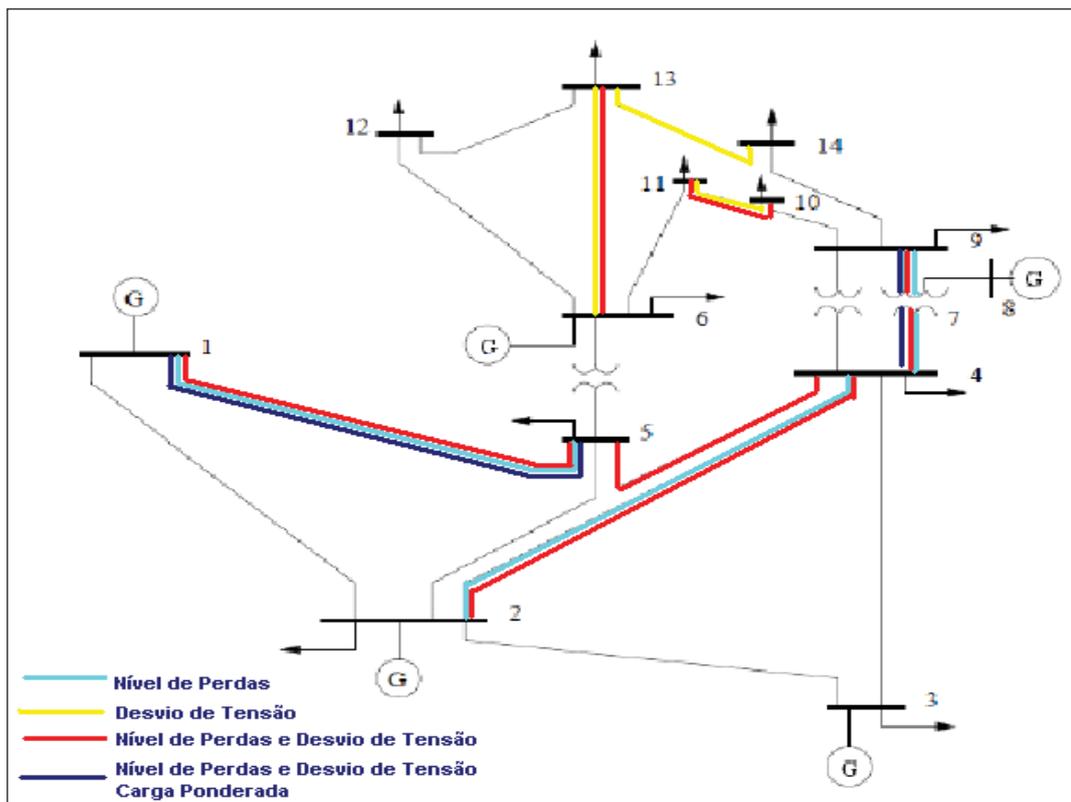


Figura 5.13: Desenho esquemático das opções de alocação do UPFC para o sistema de 14 barras.

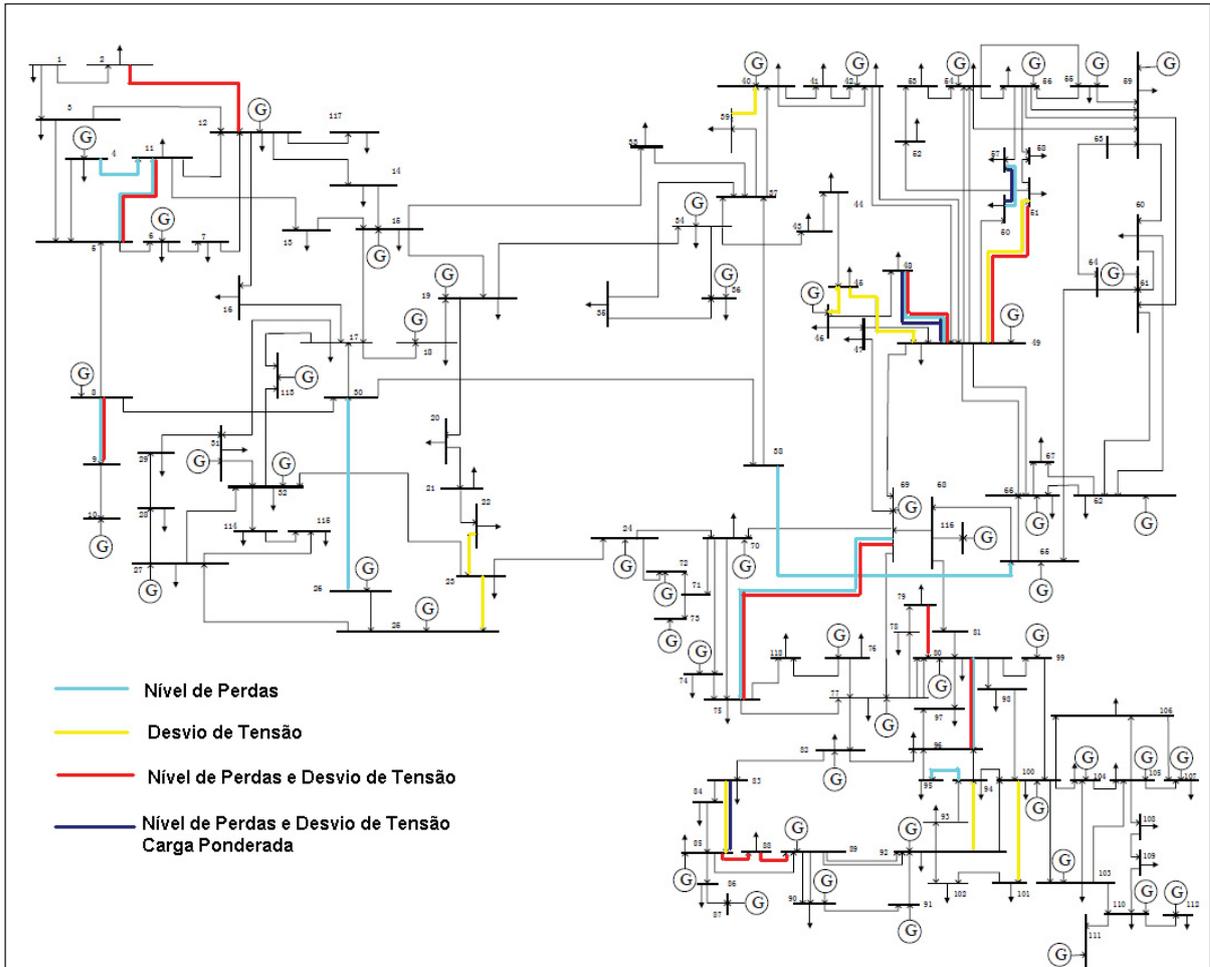


Figura 5.14: Desenho esquemático das opções de alocação do UPFC para o sistema de 118 barras.

Onde cada cor mostra uma função objetivo diferente e para cada função objetivo são geradas opções de alocação diferentes como mostrado na análise dos resultados.

5.5 DESEMPENHO DA MEMÓRIA

Para avaliar o efeito do emprego do sistema de memória no processo de convergência da metodologia proposta, foram observados os tempos de processamento, considerando a carga ponderada e avaliando o nível de perdas, cujos resultados foram apresentados na seção anterior. Na Tabela 5.11 pode-se verificar a grande diferença no tempo de processamento proporcionada pelo emprego da memória, ressaltando que o resultado obtido é o mesmo para as duas situações.

Tabela 5.11: Efeito do emprego da memória no tempo de processamento

| | Com sistema de memória | Sem sistema de memória |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 14 barras | 6,6 s | 44,5 s |
| 118 barras | 47,6 s | 677,9 s |

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram propostos para análise quatro cenários de carregamento e a alocação avaliada em termos de três critérios de otimização. Dá análise conjunta dos resultados fica evidenciado que os resultados obtidos com o cenário de carga ponderada apresentam resultados muito semelhantes ao obtido com a consideração de carga nominal, para todos os critérios de otimização.

A partir dos resultados apresentados nas diversas situações, fica evidente o benefício técnico proporcionado pela introdução de Controladores UPFC na rede elétrica, no sentido da redução dos níveis de perdas ativas e também na melhora do perfil de tensão, para qualquer condição de carga.

6 CONCLUSÕES

6.1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para alocação eficiente de Controladores FACTS do tipo UPFC em sistemas de transmissão de energia elétrica.

O conceito e a evolução de diversos tipos de Controladores FACTS foram abordados, servindo de base para a apresentação da modelagem proposta para o conversor objeto deste estudo. Tal modelagem apoia-se na representação do UPFC como resultado da associação de dois outros controladores, o STATCOM e o SSSC, também detalhados neste trabalho.

Foi realizada também uma ampla descrição da técnica de Algoritmos Genéticos, base do processo de alocação, abordando suas características e possibilidades de controle.

As análises apresentadas demonstram a viabilidade da utilização dos Algoritmos Genéticos em conjunto com o cálculo de fluxo de potência, indicando que tal metodologia apresenta um grande potencial para a solução do problema de alocação de Controladores FACTS em sistemas elétricos de potência.

Os resultados obtidos através de simulações permitiram determinar, com grande eficiência computacional, os pontos de uma rede elétrica em que a conexão de Controladores UPFC se mostre mais efetiva.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com sugestão para trabalhos futuros pode-se destacar:

- Aprimoramento das funções de avaliação dos benefícios dos Controladores FACTS, tratando de aspectos de ordem técnica e econômica e levando em conta seu custo de instalação.
- Extensão do estudo para outros tipos de controladores.
- Aperfeiçoamento do tratamento relativo aos diversos parâmetros do AG, buscando uma relação mais eficiente de acordo com características do sistema a ser estudado.
- Aperfeiçoamento da metodologia apresentada visando uma abordagem que contemple aspectos de operação do sistema elétrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BHASAPUTRA, P.; ONGSAKUL, W. **Optimal Placement of Multi Type FACTS Devices by Hybrid TSISA Approach**. Energy Field of Study, School of Environment, Resources and Development Asian Institute of Technology, Pathumthani 12120, Thailand, 2003.

BOSE, B.K. **Power electronics and AC Drives**. New Jersey: Prentice Hall, 1986.

CAI, L. J.; ERLICH, I.; STAMTSIS, G. **Optimal Choice and Allocation of FACTS Devices in Deregulated Electricity Market using Genetic Algorithms**. IEEE, 2004.

CÁRDENAS, S. L. E. **Aspectos técnicos e econômicos da Utilização dos Controladores FACTS na Operação dos Sistemas de Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós Graduação em Engenharia de Eletricidade da UFMA, 2005.

CAVALIERE, Carlos André Carreiro. **Análise de STATCOM Operando em Sistemas Desbalanceados**. Tese Submetida ao corpo docente da coordenação dos Programas de Pós Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como Parte dos Requisitos Necessários para a Obtenção do Grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, 2001.

CHUNG, T.S., LI, Y. Z. **A Hybrid GA Approach for OPF with Consideration of FACTS Devices**. IEEE Power Engineering Review, 2001.

CIGRE - **Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. Facts Technology for Open Access. CIGRE JWG 14/37/38/39-24, Final Draft Report, 2000.

DENICOLÓ, Giorgio. **Aplicação de Algoritmo Genético na Localização de Dispositivos FACTS no Sistema Elétrico**. Trabalho de graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, 2008.

FILHO, Sergio Alampi. **Análise de Controladores Eletrônicos em Sistemas de Distribuição de Energia**. Tese Submetida ao corpo docente da coordenação dos Programas de Pós Graduação de Engenharia Elétrica, 2005.

FONSECA, I. M. **Algoritmos Genéticos**. DEM/INPE. São José dos Campos, 2002.

GERBEX, S., CHERKAOU, R. e GERMOND, A. J. **Optimal Location of FACTS Devices to Enhance Power System Security**. This work is supported by the Swiss foundations PSEL and CREE-RDP. S. Gerbex, R. Cherkaoui, and A. J. Germond are with Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Laboratoire de Rkseaux Electriques, 2003.

HINGORANI, N. G. and GYUGYI, L. **Understanding FACTS, concepts and technology of flexible ac transmission system**. NewYork, IEEE, 2000.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. Univ. of Michigan Press., Ann Arbor, Michigan, 1975.

IPPOLITO, L., LA CORTIGLIA, A. e PETROCELLI, M. **Optimal Allocation of FACTS Devices by Using Multi-Objective Optimal Power Flow and Genetic Algorithms**. International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol. 7 [2006], Iss. 2, Art. 1 Published by The Berkeley Electronic Press, 2006.

MIASAKI, C. T. **Planejamento da Expansão do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica Utilizando Controladores FACTS**. 72 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia, UNESP ,Ilha Solteira , São Paulo, 2006.

MOHAN, N, UNDELAND, T.M., ROBINS, W.P. **Power Electronics**. New York, JohnWiley & Sons, Inc, 1995.

ONS – **Operador Nacional do Sistema Elétrico**. Disponível em: http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx, 2009.

PETERNI, P., VIVET, S., BENA, M. **Optimal Location of Phase Shifters in the: French Network by Genetic Algorithm**. PE-078-PWRS-0-04-1998 A paper recommended and approved by the IEEE Power System Analysis, Computing and Economics Committee of the IEEE Power Engineering Society for publication in the IEEE Transactions on Power Systems, 1999.

ROMERO, A.; MANTOVANI, J. R. S. **Introdução a Metaheurísticas**. Mini-curso do III Congresso Temático de Dinâmica e Controle da SBMAC, Ilha Solteira, SP, 2004.

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 2006, CAMPINA GRANDE – PARAÍBA. **Anais 129 “Aplicação de um Algoritmo Genético para a Otimização do Fluxo de Potência Ativa em Sistemas de Subtransmissão de Energia Elétrica”**. D. BELPIEDE, N. KAGAN. Universidade de São Paulo, 2005.

TORTELLI, O.L., CAMACHO, C.A. e ACHA, E. **Inclusion of HVDC-VSC Model in a Newton-Raphson Power Flow Algorithm**. IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, V. 150, No.6, 2003.

WATANABE, E. H.; BARBOSA, P. G.; ALMEIDA, K. C. e TARANTO, G. N. **Tecnologia FACTS – Tutorial**. SBA Controle e Automação, Vol. 9, 1997.

APÊNDICE A: FLUXO DE POTÊNCIA

A – 1 FLUXO DE POTÊNCIA – HISTÓRICO DE EVOLUÇÃO

A – 1.1 HISTÓRICO

Até o da década de 1940, e mesmo durante grande parte da década de 1950, as simulações de fluxo de Potência eram feitas mediante modelos reduzidos dos sistemas de potência, os quais ficaram conhecidos como Analisadores de Rede. Além do grande trabalho que era exigido para se obter o ajuste inicial da configuração, também era lenta a etapa de análise, pois exigia a leitura de diversos instrumentos de medição e a anotação dos valores correspondentes sobre um diagrama elétrico traçado no papel.

A – 1.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO FLUXO DE POTÊNCIA

Com o Surgimento dos computadores digitais durante a década de 1950, os analisadores de rede foram sendo substituídos por programas de computador capazes de simular numericamente o comportamento dos Sistemas Elétricos de Potência.

A – 1.3 FLUXO DE POTÊNCIA GAUSS-SEIDEL

Os primeiros programas de Fluxo de se tornaram conhecidos pelo nome de Fluxo de Potência Gauss-Seidel. Em resumo em cada uma das equações que constituem o sistema não linear se isola uma variável, e a partir de uma estimativa inicial, busca-se a convergência mediante sucessivos recálculos de cada uma das variáveis. A aproximação da solução final se faz de forma lenta, exigindo geralmente um número muito grande de iterações para se chegar a solução. O tempo de processamento cresce demasiadamente com o aumento do tamanho do sistema elétrico simulado. Estes problemas tornaram o uso deste método inadequado na medida em que os Sistemas Elétricos cresciam em número de nós e ramos por se tornarem cada vez mais interligados. As vantagens do algoritmo, de exigir pouca

memória computacional e ser de fácil implementação, já não compensava as suas deficiências.

A – 1.4 FLUXO DE POTÊNCIA NEWTON-RAPHSON

Na medida em que os Sistemas Elétricos foram crescendo em tamanho e complexidade, os pesquisadores começaram a buscar técnicas mais eficientes para simular o Fluxo de Potência. Na década de 1960 surgiu o Fluxo de Potência Newton-Raphson. Em resumo, neste método o sistema de equações não lineares que constitui o Fluxo de Potência é linearizado mediante expansão em série de Taylor a partir de uma estimativa inicial para as variáveis, e aproveitando-se apenas os termos da série até a derivada primeira. Como o sistema linear assim obtido é uma aproximação do sistema não linear original, são necessárias sucessivas iterações até que se obtenha a solução do sistema original não linear. As primeiras aplicações do Fluxo de Potência pelo método de Newton-Raphson na simulação de sistemas elétricos de porte não pareciam ser muito vantajosas quando comparadas com o Método de Gauss-Seidel, porém a deficiência do método estava nos problemas numéricos relativos a sua implementação. As grandes deficiências então existentes relacionavam-se com a dificuldade de se resolver eficientemente grandes sistemas lineares esparsos. Foi somente depois do aproveitamento de técnicas de esparsidade que o método de Newton-Raphson foi reconhecido como eficiente e capaz de substituir inteiramente o método de Gauss-Seidel. No método de Newton-Raphson, o número de iterações para se chegar a solução é geralmente pequeno e independente do tamanho do sistema em estudo.

No método de Newton-Raphson, a cada iteração é feita uma linearização das equações não lineares, o que requer o cálculo da matriz dos coeficientes do sistema linear, a qual é denominada matriz Jacobiana, bem como o cálculo do vetor dos termos independentes. Assim, um sistema linear precisa ser resolvido a cada iteração.

A – 1.5 FLUXO DE POTÊNCIA DESACOPLADO RÁPIDO

Posteriormente, percebeu-se que o método de Newton-Raphson poderia ser modificado e tornado mais eficiente, em termos computacionais, se a cada iteração

não houvesse a necessidade de se calcular uma nova matriz Jacobiana e conseqüentemente se resolver um novo sistema linear. Percebeu-se que se a matriz Jacobiana fosse escolhida adequadamente desde a primeira iteração, poder-se-ia chegar igualmente à solução do sistema não linear original, mediante um cálculo iterativo, alterando-se, de uma iteração para a seguinte, apenas o vetor dos termos independentes. Neste caso bastaria calcular uma única vez a inversa da matriz dos coeficientes, ou a sua tabela de fatores triangulares, e a partir daí realizar operações simples equivalentes a produtos matriciais para obter a solução dos sistemas lineares.

O método derivado do algoritmo de Newton-Raphson, no qual a matriz Jacobiana com aproximações adicionais é mantida constante, conforme descrito anteriormente, passou a ser conhecido como Fluxo de Potência Desacoplado rápido. Normalmente, para se chegar a solução, o método Desacoplado rápido requer um maior número de iterações do que no método de Newton-Raphson, pois a convergência é super-linear e não quadrática. Entretanto, essas iterações são realizadas a um custo computacional muito mais baixo. Outra vantagem do método desacoplado rápido é que, devido a suposição que se faz de desacoplamento entre as variáveis P e E (potência ativa e tensão) e Q e S (potência reativa e ângulo), os sistemas lineares são decompostos em dois subsistemas lineares menores e de mais fácil solução. Para a solução destes a técnica da Bi-fatoração mostra-se muito eficiente.

A – 1.5.1 Variantes do Fluxo de Potência Desacoplado Rápido

Em vista das simplificações efetuadas ao se assumir uma matriz Jacobiana aproximada e fixa, percebeu-se que o método Desacoplado Rápido funcionava bem para sistemas elétricos de transmissão, onde a relação X/R (reatância/resistência) é alta. Porém havia problemas de convergência no caso de sistemas de distribuição onde a relação X/R é baixa. Para resolver este problema, algumas variantes do Fluxo de Potência Desacoplado Rápido foram desenvolvidas, as quais são capazes de funcionar adequadamente tanto com Sistemas de Transmissão como de Distribuição. O Fluxo de Potência desacoplado rápido BX é um exemplo desses desenvolvimentos.

A – 1.6 FLUXOS DE POTÊNCIA APROXIMADOS

Além dos métodos descritos acima, de solução exata dentro da tolerância pré-determinada, há métodos muito rápidos, porém de solução não exata, desenvolvidos a partir de simplificações do problema original. Dentre estes métodos pode-se citar o fluxo de potência DC e o Fluxo de Potência baseado na matriz Z. Ambos podem ser usados apenas em situações em que a precisão dos cálculos não é um fator fundamental, o que restringe bastante a sua utilização.

A – 2 IMPORTÂNCIA DA POTÊNCIA REATIVA NOS SEP

A – 2.1 POTÊNCIA REATIVA

A potência reativa, ao contrário da potência ativa, não necessita ser transmitida em sua totalidade, sendo mais eficiente produzi-la no mesmo local onde ela vai ser consumida.

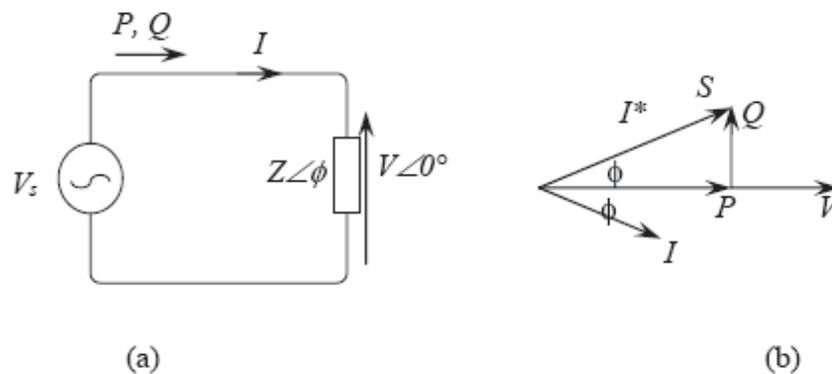
Na busca da operação otimizada do sistema de transmissão, as potências reativas dos geradores têm que estar associadas com a potência de transmissão para que se encontrem dentro dos limites de tensão.

Na Figura A.1 a potência instantânea, é dada por:

$$p = vi \quad (\text{A.1})$$

$$\begin{aligned} p &= \frac{V_{\max} I_{\max}}{2} [\cos\phi + \cos(2\omega t - \phi)] = \\ &= VI \cos\phi (1 + \cos 2\omega t) + VI \sin\phi \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Onde, V e I são os valores eficazes de v e i.



**Figura A.1- a) Circuito representativo para o cálculo da potência reativa e ativa.
b) Diagrama vetorial correspondente ao circuito.**

O primeiro termo da equação (A.2) tem valor médio e valor de pico $VI^* \cos\phi$. Este valor médio é a potência ativa P. O segundo termo tem valor médio igual a zero, mas tem valor de pico $VI^* \sin\phi$ sendo a potência reativa Q. Fasorialmente, tem-se a equação (A.3) e a Figura A.1. Na Figura A.2 apresenta a equação (A.2) graficamente.

$$S = \bar{V} \cdot \bar{I}^* = P + jQ = VI \cos\phi + jVI \sin\phi \quad (\text{A.3})$$

Onde: P é potência ativa (W) e Q é potência reativa (VAr)

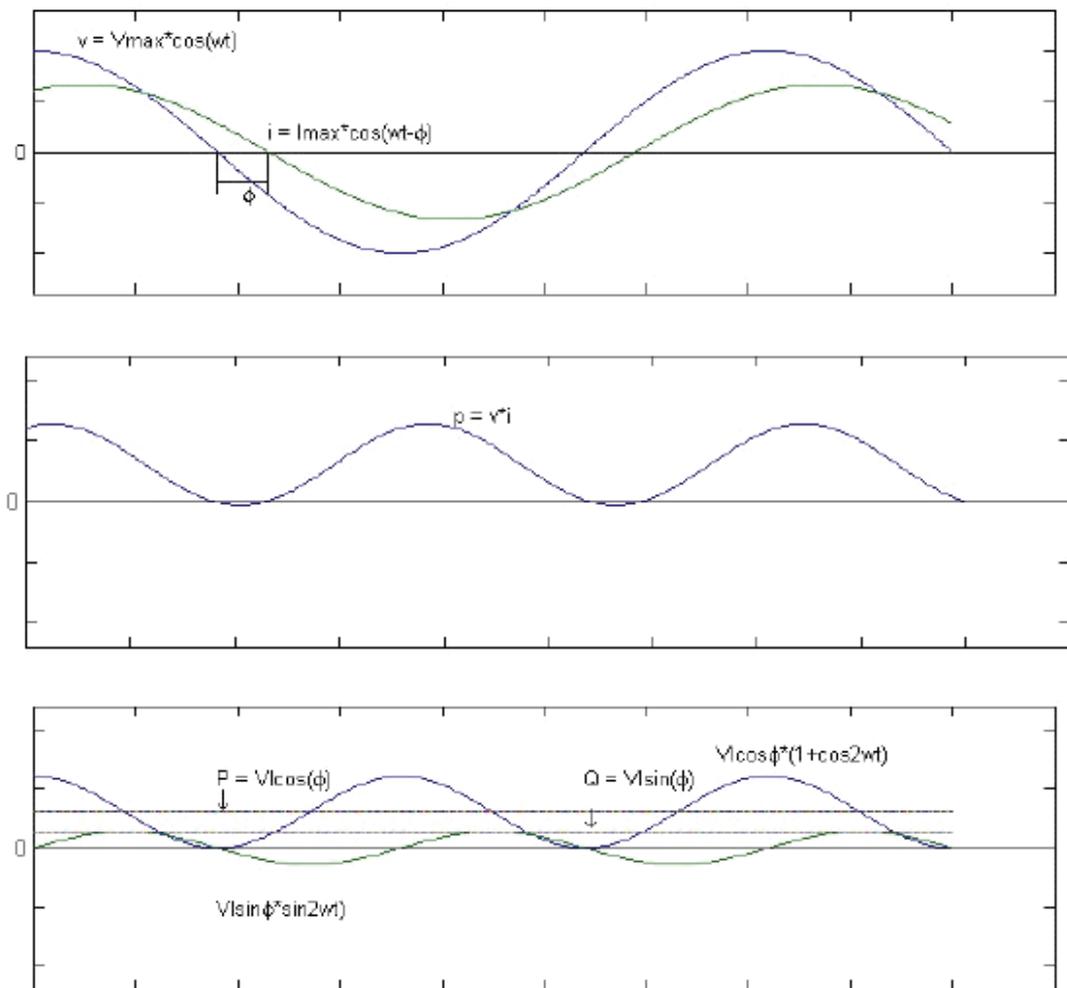


Figura A.2 - Representação da equação eq. A.1 dos parâmetros elétricos numa linha de transmissão AC.

Dispositivos eletromagnéticos armazenam energia em seu campo magnético, atrasam a corrente, fazendo positivo o valor de Q , sendo referidos como consumidores de potência reativa. Dispositivos eletrostáticos armazenam energia em seus campos elétricos, adiantam a corrente, fazendo negativo o valor de Q , sendo referidos como fornecedores de potência reativa.

Requisitos fundamentais para a transmissão de corrente alternada de acordo com:

- Máquinas principais, como os geradores e os compensadores síncronos, devem permanecer estáveis no sincronismo.
- Manter o sincronismo: É manter o sistema de potência em estado de forma equilibrada estável. A estabilidade é a tendência de um sistema de potência a

continuar operando firmemente na modalidade programada pelo ISO. Uma limitação para o transporte de energia é a estabilidade da linha, que devido ao seu comprimento chega a ser menor que a capacidade máxima, menor que a potência que se deseja transmitir. Na atualidade, os sistemas de transmissão operam perto de seus limites máximos de transferência de potência, sendo este o nível máximo de prioridade para a transmissão de potência.

- Manter o sistema de transmissão em seus níveis corretos de tensão, os sistemas de energia elétrica não devem operar com níveis de tensão anormais, a não ser em períodos curtos.

Uma sub-tensão é geralmente associada à carga pesada e/ou carência de geração.

Uma sobre-tensão é uma condição perigosa para o sistema, pode ser produzida por descargas atmosféricas, rejeições de carga, efeito ferranti, faltas etc.

A – 2.1.1 Necessidade de Potência Reativa

A potência reativa é fundamental para controlar níveis de tensão através dos requisitos da compensação. A compensação existe devido aos dispositivos armazenadores, consumidores e fornecedores de potência reativa. O efeito capacitivo das linhas de transmissão longas gera uma injeção de potência reativa positiva. Já a falta de potência reativa exigida pelas cargas, estáticas ou dinâmicas, etc., gera uma injeção de potência reativa negativa.

Dispositivos armazenadores de energia, consumidores e fornecedores de potência reativa, ajudam a compensar e oferecem uma maior flexibilidade para o controle do sistema de transmissão.

Um tipo de compensação ocorre quando as tensões do sistema de transmissão se encontram dentro dos limites, da mesma forma se tem compensação para o controle da tensão na barra onde se encontra colocado o compensador de potência reativa.

Um deficiente manejo da potência reativa nos sistemas de energia elétrica origina:

- Aumento das perdas técnicas de potência ativa, sub-tensões ou sobre-tensões e em consequência baixa qualidade da energia elétrica;
- Instabilidade de tensão e provável colapso do sistema;
- Necessidade de uma capacidade adicional de geração, transmissão e distribuição;
- Aumento dos custos operacionais pela necessidade de operar usinas com maior custo de produção, com a finalidade de compensar a insuficiência de potência reativa.

A – 2.1.2 Compensadores de Potência Reativa num SEP.

Compensação potência reativa é a aplicação de equipamentos específicos para manter um perfil de tensão dentro de padrões pré-estabelecidos em todos os níveis de transmissão de potência, para a melhoria da estabilidade pelo incremento da potência máxima transmissível e/ou para fornecer a potência reativa.

O SEP conta com uma variedade de compensadores de potência reativa, sendo que estes compensadores podem ser estáticos, ou síncronos. Compensação passiva é somente um indutor ou um capacitor fixo; ou seja, este não varia mesmo que mude a corrente ou tensão, o qual não se tem controle.

Já a compensação ativa varia de acordo com o sistema para manter uma das características elétricas da linha de transmissão em variação, tais como a reatância ou a resistência, e assim poder controlar a potência ativa e/ou reativa e/ou a tensão de um barramento.

A – 3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DO FLUXO DE POTÊNCIA

A – 3.1 EQUACIONAMENTO DO FLUXO DE POTÊNCIA

Seja uma barra genérica i de um sistema de potência, conforme representada na figura a seguir, e que pode estar conectada a outras barras j ($j=0,1,\dots,N$ e $j \neq i$).

Para equacionar o problema do Fluxo de Potência, será utilizada a seguinte notação:

P: Potência ativa;

Q: Potência Reativa;

S: Potência Aparente ou Total;

V: Tensão Complexa;

E: Módulo da Tensão complexa V ;

δ : Ângulo da Tensão complexa V ;

y_{ij} : Admitância do ramo que liga a barra i a j (y minúsculo);

Y_{ij} : Elemento situado (i,j) da matriz admitância Y (Y escrito em letra maiúscula);

N: Designa o número de nós do Sistema de Potência em estudo.

Considere-se ainda que:

a- Uma barra genérica i encontra-se conectada a diversas barras j ($j=1,N$ e $j \neq i$), através de ramos de admitância y_{ij} , sendo que $y_{ij} = 0$ se não houver conexão física direta entre as barras i e j ;

b- A barra i possui uma ligação a barra neutra via uma admitância y_{i0} ;

c- A potência líquida injetada na barra i seja $S_i = P_i + jQ_i$

Aplicando-se a lei das correntes ao nó i , e tendo em vista que o somatório das correntes que entram é igual ao somatório das correntes que saem do nó, temos a equação (A.4):

$$i_e = i_{s1} + i_{s2} + \dots + i_{sN} + i_{s0} \quad (\text{A.4})$$

Usando (*) para designar o conjugado de um complexo, substituindo na expressão anterior a corrente elétrica em função das potências, tensões e

admitâncias, e além disso, estendendo a equação geral para todas as N barras do Sistema de Potência, temos a equação (A.5):

$$\frac{S_i^*}{V_i^*} = \sum_{\substack{j=1,N \\ j \neq i}} (V - V_{j_i}) y_{ij} + V_i y_{i0}, \quad (i = 1, \dots, N) \quad (\text{A.5})$$

Agrupando os termos, obtemos a equação (A.6):

$$\frac{S_i^*}{V_i^*} = V_i (y_{i0} + \sum_{\substack{j=1,N \\ j \neq i}} y_{ij}) + \sum_{\substack{j=1,N \\ j \neq i}} (-V_j y_{ij}), \quad (i = 1, \dots, N) \quad (\text{A.6})$$

Entretanto, pela definição de matriz de admitância Y_{ij} , temos a equação (A.7):

$$Y_{ii} = y_{i0} + \sum_{\substack{j=1,N \\ j \neq i}} y_{ij} \quad \text{e} \quad Y_{ij} = -y_{ij} \quad (\text{A.7})$$

Então, pode-se escrever a equação (A.8):

$$\frac{S_i^*}{V_i^*} = V_i y_{ii} + \sum_{\substack{j=1,N \\ j \neq i}} V_j y_{ij}, \quad (i = 1, \dots, N) \quad (\text{A.8})$$

O que leva ao seguinte equacionamento básico, mostrado na equação (A.9):

$$\frac{S_i^*}{V_i^*} = \sum_{\substack{j=1,N \\ j \neq i}} V_j y_{ij}, \quad (i = 1, \dots, N) \quad (\text{A.9})$$

Na sua forma mais simples, o problema de cálculo do Fluxo de Potência envolve encontrar os valores de V que levem a solução do sistema (A.9), o que equivale a dizer que a equação básica deve ficar satisfeita para todas as N barras do sistema de potência. O sistema (A.9) consiste de um sistema de N equações complexas, com N incógnitas complexas V .

Caso o primeiro termo do sistema (A.9) fosse constante, o sistema seria complexo linear. A maior parte dos circuitos elétricos estudados na disciplina de circuitos elétricos pertencem a este caso, pois não é costume nessa disciplina se representar geração ou carga na forma de potências conectadas aos nós.

No caso do Fluxo de Potência o primeiro termo não é constante, por causa da incógnita V_i^* (conjugado da tensão complexa V_i), caracterizando o problema como um problema não linear complexo.

Na prática há barras nas quais S_i é conhecido e se deseja calcular V_i , em outras ocorre o contrário, sendo sempre conhecidos os valores de Y_{ij} .

A – 3.2 O PROBLEMA DO FLUXO DE POTÊNCIA EM UM SISTEMA REAL

Geralmente a potência complexa S costuma ser decomposta nas suas componentes potência ativa P (parte real de S) e potência reativa Q (parte imaginária de S), bem como as admitâncias complexas Y são decompostas nas componentes Condutância G (parte real de Y) e Susceptância B (parte imaginária de Y). Já a tensão complexa V pode ser decomposta em módulo e ângulo, ou em parte real e imaginária.

Dependendo de quais variáveis sejam conhecidas e quais sejam incógnitas, as barras de um sistema elétrico real são classificadas segundo a Tabela A.1 a seguir representada:

Tabela A.1: Classificação das barras de um SEE.

| Nome da Barra | Grandezas Conhecidas | Incógnitas |
|---|----------------------|----------------|
| Barra de Referência, Swing ou $V\delta$ | E e δ | P e Q |
| Barra de Tensão Controlada ou PV | E e P | Q e δ |
| Barra de carga Ou PQ | P e Q | E e δ |

A existência de três tipos diferentes de barras exige que os métodos de solução do Fluxo de Potência considerem esta diversidade de barras.

Um sistema de potência pode possuir inúmeras barras PQ e PV, porém há apenas uma barra $V\delta$ (*swing* ou referência). Como nesta barra já são conhecidas de antemão as incógnitas E e δ , a equação relativa a esta barra não precisa ser descrita e pode ser retirada do sistema de equações, de modo que i passa a abranger as barras de i até $N-i$, sendo a barra *swing* numerada como barra N .

A – 4 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON NO CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA

A – 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O cálculo de um fluxo de potência equivale à solução de um sistema de equações algébricas não-lineares. Os recursos da matemática disponíveis para a solução destas equações são relativamente escassos. Na grande maioria dos casos, o emprego de métodos diretos de solução não é possível, devendo ser usados métodos iterativos. Não se pode ainda, garantir que um sistema de equações não-lineares tenha qualquer solução ou, caso tenha solução, que seja única ou existam várias outras. Felizmente, no problema de fluxo de potência, tais dificuldades ficam bastante atenuadas pelo fato de que as faixas de valores permitidos para as variáveis do problema, praticamente são as mesmas para a grande maioria dos sistemas elétricos de potência existentes.

O método para solução do fluxo de potência deve atender a alguns requisitos básicos, notadamente; eficiência computacional, confiabilidade especialmente no que concerne a problemas mal-condicionados e flexibilidade para representação de dispositivos de controle. O método de Newton-Raphson é um método numérico geral para a determinação de raízes reais de equações não lineares, com grande confiabilidade de convergência e velocidade. A aplicação eficiente deste método para fluxo de potência foi desenvolvida em sua formulação clássica no final da década de sessenta.

É possível demonstrar que o método de Newton-Raphson apresenta uma taxa de convergência quadrática, isto é, a norma do vetor de resíduos diminui com o quadrado do número de iterações. Isto significa que o método converge rapidamente na vizinhança da solução. Entretanto, essa convergência é fortemente dependente das condições iniciais do problema, em sistemas de potência definida por tensões e ângulos em barras de carga.

Caso a condição inicial não esteja contida em uma região próxima da solução procurada (região de atração) o processo iterativo poderá convergir para uma solução não desejável ou até mesmo apresentar uma divergência.

O objetivo deste apêndice é fazer uma rápida revisão da solução das equações de fluxo de potência utilizando-se o método de Newton-Raphson.

A – 4.2 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

Se for conhecida uma aproximação $x^{(0)}$ para uma das raízes reais da equação (A.10):

$$y = f(x) \quad (\text{A.10})$$

Então, uma aproximação melhor $x^{(h+1)}$ onde $h = 0, 1, 2, \dots$ pode ser obtida calculando-se eq. A.14 pela Série de Taylor, considerando-se apenas os dois primeiros termos desta série.

$$y = f(x^{(h)}) + f'(x^{(h)}) \cdot \Delta x^{(h)} + \frac{f''(x^{(h)})}{2!} \cdot (\Delta x^{(h)})^2 + \dots \quad (\text{A.11})$$

$$y - f(x^{(h)}) = f'(x^{(h)}) \cdot \Delta x^{(h)} \quad (\text{A.12})$$

$$\Delta y^{(h)} = y - f(x^{(h)}) \quad (\text{A.13})$$

$$\Delta x^{(h)} = [f'(x^{(h)})]^{-1} \Delta y^{(h)} \quad (\text{A.14})$$

A variável x é atualizada a cada iteração como mostra a equação (A.15):

$$x^{(h+1)} = x^h + \Delta x^{(h)} \quad (\text{A.15})$$

O processo retorna a equação (A.11) até que sua convergência seja obtida quando:

$$x^{(h+1)} - x^h \leq \varepsilon \quad (\text{A.16})$$

Generalizando-se para j equações tem-se:

$$\begin{aligned} y_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_i) \\ y_2 &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_i) \\ &\vdots \\ y_i &= f_i(x_1, x_2, \dots, x_i) \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

A correção a cada iteração é então obtida da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1^{(h)} \\ \Delta x_2^{(h)} \\ \vdots \\ \Delta x_j^{(h)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(h)} & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(h)} & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_j}\right)^{(h)} \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(h)} & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(h)} & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_j}\right)^{(h)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_1}\right)^{(h)} & \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_2}\right)^{(h)} & \dots & \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right)^{(h)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta y_1^{(h)} \\ \Delta y_2^{(h)} \\ \vdots \\ \Delta y_i^{(h)} \end{bmatrix} \quad (\text{A.18})$$

A – 4.3 APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES DO FLUXO DE POTÊNCIA

Para uma barra genérica k tem-se:

$$S_k = P_k + j \cdot Q_k \quad (\text{A.19})$$

As equações básicas do fluxo de potência são dadas pelas equações (A.20) e (A.21):

$$P_k = V_k \cdot \sum_{m \in \Omega_k} V_m \cdot (G_{km} \cdot \cos \theta_{km} + B_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}) \quad (\text{A.20})$$

$$Q_k = V_k \cdot \sum_{m \in \Omega_k} V_m \cdot (G_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cdot \cos \theta_{km}) \quad (\text{A.21})$$

$$\theta_{km} = \theta_k - \theta_m \quad (\text{A.22})$$

Aplicando-se o método iterativo de Newton-Raphson na solução das equações (A.20) e (A.21), tem-se uma relação linearizada entre as variações do módulo da tensão e do ângulo, para as variações nas potências ativa e reativa. Desta forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & -N \\ M & -L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (\text{A.23})$$

onde se tem:

$$H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k \cdot V_m \cdot (G_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cdot \cos \theta_{km}) \quad (\text{A.24})$$

$$H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 \cdot B_{kk} - V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km}) \quad (\text{A.25})$$

$$H_{kk} = -V_k^2 \cdot B_{kk} - Q_k \quad (\text{A.26})$$

$$N_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k \cdot (G_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}) \quad (\text{A.27})$$

$$N_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -V_k \cdot B_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}) \quad (\text{A.28})$$

$$N_{kk} = \frac{(P_k + V_k^2 \cdot G_{kk})}{V_k} \quad (\text{A.29})$$

$$M_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = -V_k \cdot V_m \cdot (G_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}) \quad (\text{A.30})$$

$$M_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 \cdot G_{kk} + V_k \cdot \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}) \quad (\text{A.31})$$

$$M_{kk} = -V_k^2 \cdot G_{kk} - P_k \quad (\text{A.32})$$

$$L_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k \cdot (G_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km}) \quad (\text{A.33})$$

$$L_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = V_k \cdot B_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km}) \quad (\text{A.34})$$

$$L_{kk} = \frac{(Q_k - V_k^2 \cdot B_{kk})}{V_k} \quad (\text{A.35})$$

Os resíduos de potência são dados por:

$$\Delta P_k = P_k^{esp} - V_k \cdot \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}) \quad (\text{A.36})$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{esp} - V_k \cdot \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} + B_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km}) \quad (\text{A.37})$$

A matriz Jacobiana é altamente esparsa na aplicação do fluxo de potência, sendo a equação (A.23) resolvida direta e rapidamente a cada iteração, utilizando-se a eliminação ordenada para solução de grandes sistemas lineares esparsos.

A partir de um conjunto inicial de tensões nas barras, são calculadas as potências ativa e reativa, bem como os respectivos resíduos de potência. Caso estes

resíduos estejam dentro de uma tolerância pré-determinada, considera-se que o processo iterativo convergiu para uma solução. Caso contrário calcula-se a matriz Jacobiana e determina-se a nova solução:

$$\theta^{(h+1)} = \theta^{(h)} + \Delta\theta^{(h)} \quad (\text{A.38})$$

$$V^{(h+1)} = V^{(h)} + \Delta V^{(h)} \quad (\text{A.39})$$

Onde, $\Delta\theta^{(h)}$ e $\Delta V^{(h)}$ são obtidos da solução da equação (A.23).

Posteriormente, incrementa-se o contador do número de iterações e retorna-se ao cálculo das potências ativa e reativa, repetindo-se o ciclo descrito.

Na formulação básica do problema, a cada barra do sistema são associadas quatro variáveis, sendo que duas delas entram no problema como dados e duas como incógnitas: V_k, θ_k, P_k, Q_k .

Dependendo de quais variáveis nodais sejam classificadas como dados e quais são consideradas como incógnitas, definem-se três tipos de barras:

- PQ → são dados P_k e Q_k , e calcula-se V_k e θ_k .
- PV → são dados P_k e V_k , e calcula-se θ_k e Q_k .
- Vθ → são dados V_k e θ_k , e calcula-se P_k e Q_k .

As barras dos tipos PQ e PV são utilizadas para representar, respectivamente, barras de carga e barras de geração (incluindo-se os compensadores síncronos).

A barra Vθ, ou barra de referência, tem uma dupla função: como o próprio nome indica, fornece a referência angular do sistema (a referência de magnitude de tensão é o próprio nó terra); além disso, é utilizada para fechar o balanço de potência do sistema, levando em conta as perdas na transmissão que não são conhecidas antes da solução final do problema (daí a necessidade de se dispor de uma barra do sistema na qual não são especificadas as potências ativa e reativa).

O método de Newton-Raphson é um método iterativo de cálculo de equações e sistemas não lineares de equações que se baseie na linearização das equações. No caso de um sistema não linear de equações, encontrar a sua solução significa achar a interseção das superfícies que representam cada uma de suas equações. Aplicar o método de Newton-Raphson equivale, a partir de uma estimativa inicial de solução (pontos iniciais), substituir as superfícies por planos (ou hiperplanos) tangentes nestes pontos e encontrar a interseção desses planos. Geralmente a

interseção dos hiperplanos vai se aproximando da interseção das superfícies na medida em que a técnica é repetida mediante cálculo iterativo.

No método de Newton-Raphson aplicado à resolução do Fluxo de Potência, o sistema de equações complexas não lineares é inicialmente substituído por um sistema de equações reais não lineares, porém contendo um número de equações e incógnitas iguais ao dobro do número de equações complexas. O método de Newton-Raphson pode ser implementado com as tensões na forma polar ou na forma cartesiana, sendo, no presente trabalho utilizada a forma polar.

Seja:

P e Q: valores específicos de potência ativa e reativa nas barras do sistema;

P' e Q': Valores de potência ativa e reativa nas barras do sistema calculados segundo os valores de tensão e ângulo da iteração anterior, ou segundo os valores de tensão e ângulo arbitrados, em se tratando da primeira iteração;

Seja ainda:

G_{ij}: Parte Real de Y_{ij}, chamada de condutância.

B_{ij}: Parte imaginária de Y_{ij}, chamada de susceptância.

O sistema de equações não lineares pode ser reescrito, mediante separação das partes Real e Imaginaria:

$$P_i(\delta, E) = \sum_{j=1, N} E_i E_j (G_{ij} \cos \alpha - B_{ij} \sin \alpha) \quad i = (1, \dots, N-1) \quad (\text{A.40})$$

$$Q_i(\delta, E) = \sum_{j=1, N} -E_i E_j (B_{ij} \cos \alpha + G_{ij} \sin \alpha) \quad i = (1, \dots, N-1) \quad (\text{A.41})$$

onde:

$$\begin{aligned} V_i &= E_i e^{j\delta_i} \\ V_j &= E_j e^{j\delta_j} \\ Y_{ij} &= G_{ij} + jB_{ij} \\ S_i &= P_i + jQ_i \\ \alpha &= \delta_j - \delta_i \end{aligned} \quad (\text{A.42})$$

Expandindo-se P_i e Q_i em série de Taylor até o termo de primeira ordem, obtém-se:

$$\begin{aligned}
P_i(\delta, E) &= P_i'(\delta, E) + \left(\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j}\right)\Delta\delta_j + \left(\frac{\partial P_i}{\partial E_j}\right)\Delta E_j \\
Q_i(\delta, E) &= Q_i'(\delta, E) + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j}\right)\Delta\delta_j + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial E_j}\right)\Delta E_j
\end{aligned}
\tag{A.43}$$

Por razões de eficiência computacional é melhor se trabalhar com $E_j \frac{\partial P_i}{\partial E_j}$ e $E_j \frac{\partial Q_i}{\partial E_j}$ do que com $\frac{\partial P_i}{\partial E_j}$ e $\frac{\partial Q_i}{\partial E_j}$ respectivamente. Fazendo esta modificação, obtém-se:

$$\begin{aligned}
P_i(\delta, E) &= P_i'(\delta, E) + \left(\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j}\right)\Delta\delta_j + \left(E_j \frac{\partial P_i}{\partial E_j}\right) \frac{\Delta E_j}{E_j} \\
Q_i(\delta, E) &= Q_i'(\delta, E) + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j}\right)\Delta\delta_j + \left(E_j \frac{\partial Q_i}{\partial E_j}\right) \frac{\Delta E_j}{E_j}
\end{aligned}
\tag{A.44}$$

Define-se neste ponto quatro matrizes (H, N, M e L), conforme a seguir:

- $H = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j}$ é a submatriz Jacobiana das derivadas parciais da potência ativa em relação aos ângulos;
- $N = E_j \frac{\partial P_i}{\partial E_j}$ é a submatriz Jacobiana das derivadas parciais da potência ativa em relação aos módulos das tensões;
- $J = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j}$ é a submatriz Jacobiana das derivadas parciais da potência reativa em relação aos ângulos;
- $L = E_j \frac{\partial Q_i}{\partial E_j}$ é a submatriz Jacobiana das derivadas parciais da potência reativa em relação aos módulos das tensões;

Reescrevendo na forma matricial, para todas as barras do sistema de potência, obtém-se:

$$\begin{aligned}
P(\delta, E) &= P'(\delta, E) + H\Delta\delta + N \frac{\Delta E}{E} \\
Q(\delta, E) &= Q'(\delta, E) + J\Delta\delta + L \frac{\Delta E}{E}
\end{aligned}
\tag{A.47}$$

Que pode finalmente ser descrito na forma de um sistema linear:

$$\begin{aligned} H\Delta\delta + N\frac{\Delta E}{E} &= P(\delta, E) - P'(\delta, E) \\ J\Delta\delta + L\frac{\Delta E}{E} &= Q(\delta, E) - Q'(\delta, E) \end{aligned} \quad (\text{A.48})$$

No método de Newton-Raphson parte-se de uma estimativa inicial de E e δ (módulos de tensões e ângulos), e são calculados os valores de $P'(\delta, E)$ e $Q'(\delta, E)$. Em seguida resolve-se o sistema linear (A.46), obtendo-se os valores das correções ΔE e $\Delta\delta$, e, por conseguinte, os novos valores de E e δ .

O processo é encerrado quando os valores calculados de P' e Q' estiverem próximos dos valores especificados de P e Q , segundo uma tolerância pré-estabelecida.

Quanto ao método de Newton-Raphson, podem ser feitas as seguintes observações:

- a)** Para as barras de geração as equações do tipo II no Sistema (A.46) não precisam ser escritas, pois Q não é especificado e, portanto não há razão para se calcular o desvio $Q-Q'$. Para um sistema com N barras, havendo N_{ger} barras PV, o Sistema (A.46) será de dimensão $2(N-1) - N_{\text{ger}}$. Esta redução no tamanho do sistema linear não ocorreria caso o problema fosse tratado na forma cartesiana ao invés das formas polares;
- b)** A matriz dos coeficientes do sistema (A.46), constituída das submatrizes H , N , J e L , deve ser calculada a cada nova iteração;
- c)** A matriz dos coeficientes do sistema (A.46), constituídas das submatrizes H , N , J e L , é uma matriz bastante esparsa, pois é nula a derivada parcial das potências da barra i em relação a barra j , se não houver uma conexão direta entre as barras i e j ;
- d)** A cada iteração o sistema linear (A.46) a ser resolvido é atualizado, sendo modificados tanto a matriz dos coeficientes das incógnitas como o vetor dos termos independentes;
- e)** O método de Newton-Raphson é mais rápido que o método de Gauss-Seidel, principalmente em se tratando de sistemas de médio ou grande porte;
- f)** No método de Newton-Raphson a taxa de convergência é quadrática;

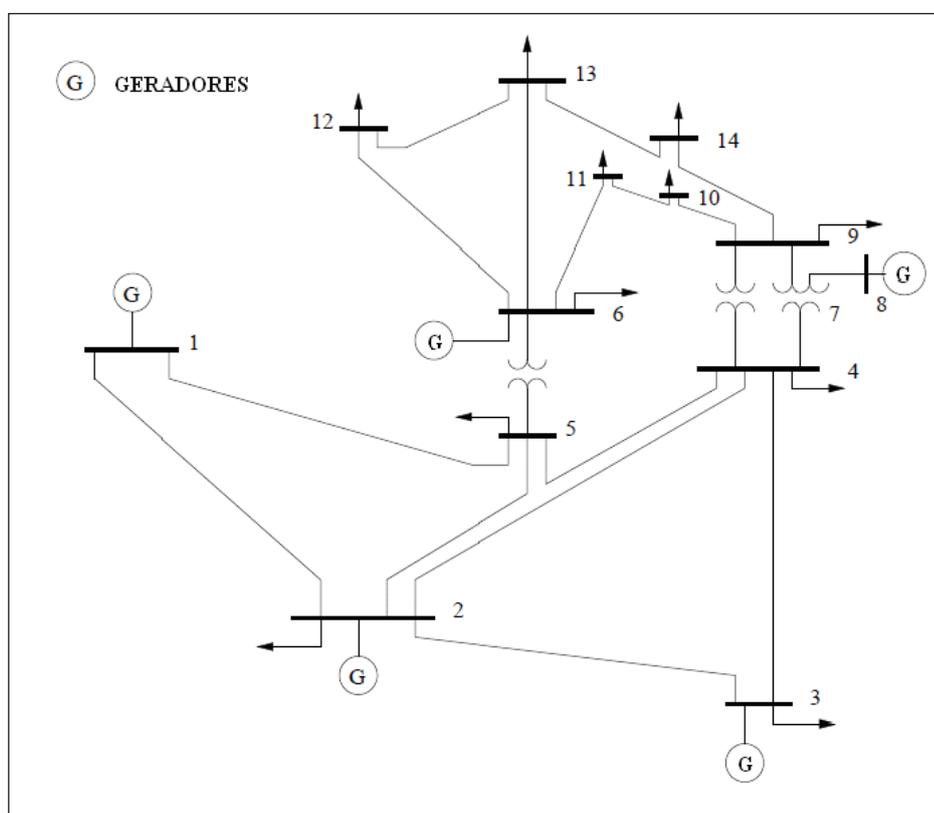
g) A convergência do método de Newton-Raphson é mais dependente dos valores iniciais do que o método de Gauss-Seidel.

ANEXO A

A.1 – INTRODUÇÃO

Este anexo apresenta os dados de ramos e barras do sistema de 14 barras e 118 barras. Todos os valores estão em p.u. na base 100 MVA.

A 1.1 SISTEMA DE TESTE IEEE 14 BARRAS



A 1.1.1 Dados das Barras

| N° Barra | Tipo da barra | P Nom. (p.u.) | Q Nom. (p.u.) | P Lev. (p.u.) | Q Lev. (p.u.) | P Pes. (p.u.) | Q Pes. (p.u.) |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 18,3 | -12,7 | 9,15 | -6,35 | 23,79 | -16,51 |
| 3 | 1 | -94,2 | -19 | -47,1 | -9,5 | 122,46 | -24,7 |
| 4 | 2 | -47,8 | 3,9 | -23,9 | 1,95 | -62,14 | 5,07 |
| 5 | 2 | -7,6 | -1,6 | -3,8 | -0,8 | -9,88 | -2,08 |
| 6 | 1 | -11,2 | -7,5 | -5,6 | -3,75 | -14,56 | -9,75 |
| 7 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 2 | -29,5 | -16,6 | -14,75 | -8,3 | -38,35 | -21,58 |
| 10 | 2 | -9 | -5,8 | -4,5 | -2,9 | -11,7 | -7,54 |
| 11 | 2 | -3,5 | -1,8 | -1,75 | -0,9 | -4,55 | -2,34 |
| 12 | 2 | -6,1 | -1,6 | -3,05 | -0,8 | -7,93 | -2,08 |
| 13 | 2 | -13,5 | -5,8 | -6,75 | -2,9 | -17,55 | -7,54 |
| 14 | 2 | -14,9 | -5 | -7,45 | -2,5 | -19,37 | -6,5 |

*Tipo da Barra: 0 – Barra de referência, 1 – Barra tipo PV e 2 – Barra Tipo PQ

A 1.1.2 Dados das Linhas:

| N° do Ramo | De | Para | R (p.u.) | X (p.u.) |
|------------|----|------|----------|----------|
| 1 | 1 | 2 | 0,01938 | 0,05917 |
| 2 | 1 | 5 | 0,05403 | 0,22304 |
| 3 | 2 | 3 | 0,04699 | 0,19797 |
| 4 | 2 | 4 | 0,05811 | 0,17632 |
| 5 | 2 | 5 | 0,05695 | 0,17388 |
| 6 | 3 | 4 | 0,06701 | 0,17103 |
| 7 | 4 | 5 | 0,01335 | 0,04211 |
| 8 | 4 | 7 | 0,00000 | 0,20912 |
| 9 | 4 | 9 | 0,00000 | 0,58562 |
| 10 | 5 | 6 | 0,00000 | 0,25202 |
| 11 | 6 | 11 | 0,09498 | 0,19890 |
| 12 | 6 | 12 | 0,12291 | 0,25581 |
| 13 | 6 | 13 | 0,06615 | 0,13027 |
| 14 | 7 | 8 | 0,00000 | 0,17615 |
| 15 | 7 | 9 | 0,00000 | 0,11001 |
| 16 | 9 | 10 | 0,03181 | 0,08450 |
| 17 | 9 | 14 | 0,12711 | 0,27038 |
| 18 | 10 | 11 | 0,08205 | 0,19207 |
| 19 | 12 | 13 | 0,22092 | 0,19988 |
| 20 | 13 | 14 | 0,17093 | 0,34802 |

A 1.1.3 Arquivo de Dados para o Matlab:

```

%dados 14-barras
%% tipo 0-Vt 2-PQ 1-PV
Tipo = [0 1 1 2 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2];
nb = length(Tipo);

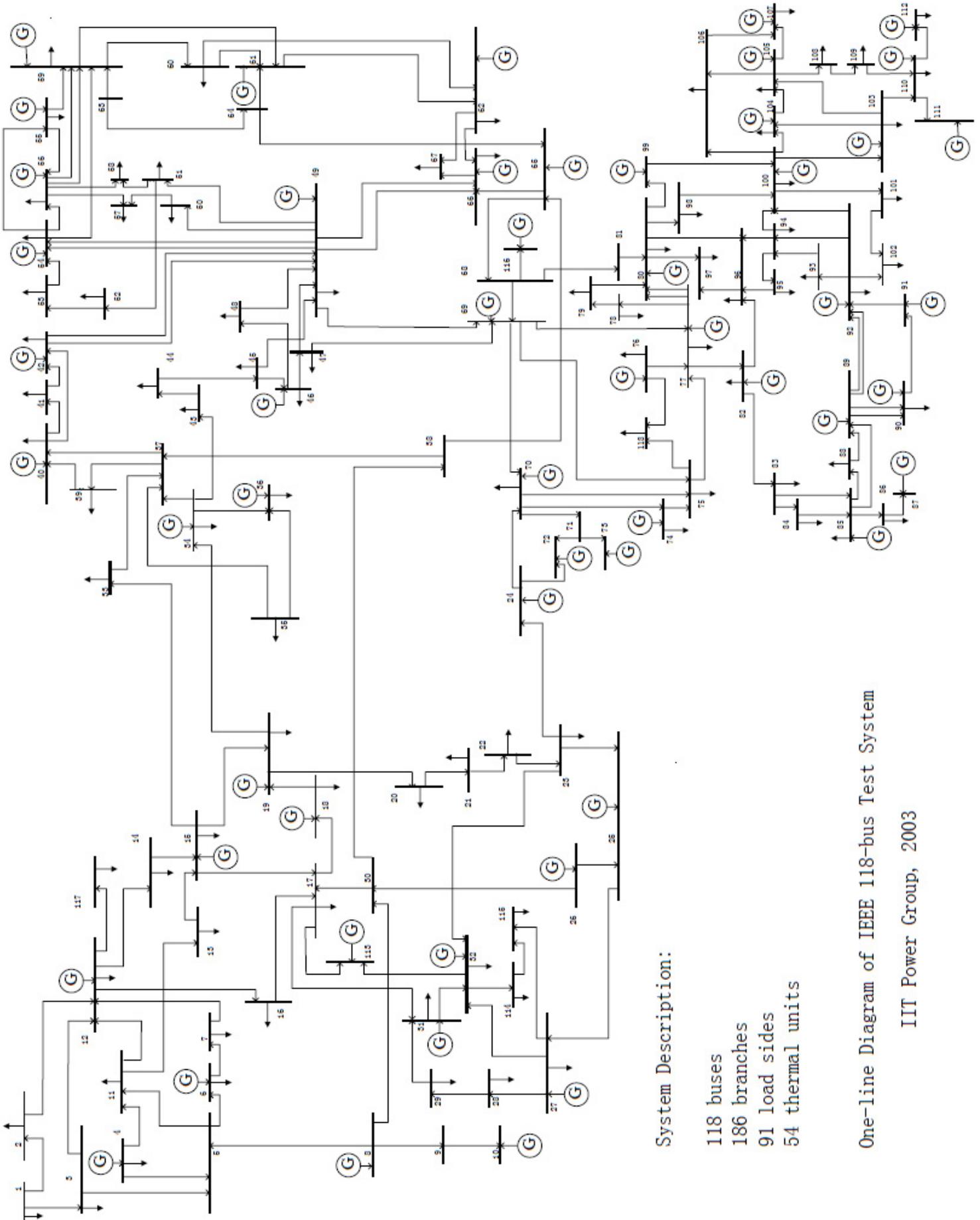
V = [1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1];

for i=1:nb
    dados_barra(i,1)=Tipo(i);
    dados_barra(i,2)=V(i);
    dados_barra(i,3)=Pnom(i);
    dados_barra(i,4)=Qnom(i);
    dados_barra(i,5)=Plev(i);
    dados_barra(i,6)=Qlev(i);
    dados_barra(i,7)=Ppes(i);
    dados_barra(i,8)=Qpes(i);
end

%dados de linha [from to vR vX]
from = [ 1 1 2 2 2 3 4 4 4 5 6 6 6 7 7 9 9 10 12 13];
to = [ 2 5 3 4 5 4 5 7 9 6 11 12 13 8 9 10 14 11 13 14];
vR = [.01938 .05403 .04699 .05811 .05695 .06701 .01335 .0 .0 .0
      .09498 .12291 .06615 .0 .0 .03181 .12711 .08205 .22092 .17093];
vX = [.05917 .22304 .19797 .17632 .17388 .17103 .04211 .20912 .55618 .25202
      .19890 .25581 .13027 .17615 .11001 .08450 .27038 .19207 .19988 .34802];
nr=length(from);
for i=1:nr
    dados_linha(i,1)=from(i);
    dados_linha(i,2)=to(i);
    dados_linha(i,3)=vR(i);
    dados_linha(i,4)=vX(i);
end

```

A 1.2 SISTEMA DE TESTE IEEE 118 BARRAS



System Description:

- 118 buses
- 186 branches
- 91 load sides
- 54 thermal units

One-line Diagram of IEEE 118-bus Test System

IIIT Power Group, 2003

A 1.2.1 Dados das Barras

(continua)

| N° Barra | Tipo da barra | V (p.u.) | ângulo (°) | P Dem. (p.u.) | Q Dem. (p.u.) | P Ger. (p.u.) | Q Ger. (p.u.) |
|----------|---------------|----------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 2 | 0,955 | 10,67 | 51,00 | 27,00 | 0,00 | 0,00 |
| 2 | 0 | 0,971 | 11,22 | 20,00 | 9,00 | 0,00 | 0,00 |
| 3 | 0 | 0,968 | 11,56 | 39,00 | 10,00 | 0,00 | 0,00 |
| 4 | 2 | 0,998 | 15,28 | 30,00 | 12,00 | -9,00 | 0,00 |
| 5 | 0 | 1,002 | 15,73 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 6 | 2 | 0,990 | 13,00 | 52,00 | 22,00 | 0,00 | 0,00 |
| 7 | 0 | 0,989 | 12,56 | 19,00 | 2,00 | 0,00 | 0,00 |
| 8 | 2 | 1,015 | 20,77 | 0,00 | 0,00 | -28,00 | 0,00 |
| 9 | 0 | 1,043 | 28,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 10 | 2 | 1,050 | 35,61 | 0,00 | 0,00 | 450,00 | 0,00 |
| 11 | 0 | 0,985 | 12,72 | 70,00 | 23,00 | 0,00 | 0,00 |
| 12 | 2 | 0,990 | 12,20 | 47,00 | 10,00 | 85,00 | 0,00 |
| 13 | 0 | 0,968 | 11,35 | 34,00 | 16,00 | 0,00 | 0,00 |
| 14 | 0 | 0,984 | 11,50 | 14,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 |
| 15 | 2 | 0,970 | 11,23 | 90,00 | 30,00 | 0,00 | 0,00 |
| 16 | 0 | 0,984 | 11,91 | 25,00 | 10,00 | 0,00 | 0,00 |
| 17 | 0 | 0,995 | 13,74 | 11,00 | 3,00 | 0,00 | 0,00 |
| 18 | 2 | 0,973 | 11,53 | 60,00 | 34,00 | 0,00 | 0,00 |
| 19 | 2 | 0,963 | 11,05 | 45,00 | 25,00 | 0,00 | 0,00 |
| 20 | 0 | 0,958 | 11,93 | 18,00 | 3,00 | 0,00 | 0,00 |
| 21 | 0 | 0,959 | 13,52 | 14,00 | 8,00 | 0,00 | 0,00 |
| 22 | 0 | 0,970 | 16,08 | 10,00 | 5,00 | 0,00 | 0,00 |
| 23 | 0 | 1,000 | 21,00 | 7,00 | 3,00 | 0,00 | 0,00 |
| 24 | 2 | 0,992 | 20,89 | 0,00 | 0,00 | -13,00 | 0,00 |
| 25 | 2 | 1,050 | 27,93 | 0,00 | 0,00 | 220,00 | 0,00 |
| 26 | 2 | 1,015 | 29,71 | 0,00 | 0,00 | 314,00 | 0,00 |
| 27 | 2 | 0,968 | 15,35 | 62,00 | 13,00 | -9,00 | 0,00 |
| 28 | 0 | 0,962 | 13,62 | 17,00 | 7,00 | 0,00 | 0,00 |
| 29 | 0 | 0,963 | 12,63 | 24,00 | 4,00 | 0,00 | 0,00 |
| 30 | 0 | 0,968 | 18,79 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 31 | 2 | 0,967 | 12,75 | 43,00 | 27,00 | 7,00 | 0,00 |
| 32 | 2 | 0,964 | 14,80 | 59,00 | 23,00 | 0,00 | 0,00 |
| 33 | 0 | 0,972 | 10,63 | 23,00 | 9,00 | 0,00 | 0,00 |
| 34 | 2 | 0,986 | 11,30 | 59,00 | 26,00 | 0,00 | 0,00 |
| 35 | 0 | 0,981 | 10,87 | 33,00 | 9,00 | 0,00 | 0,00 |
| 36 | 2 | 0,980 | 10,87 | 31,00 | 17,00 | 0,00 | 0,00 |
| 37 | 0 | 0,992 | 11,77 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 38 | 0 | 0,962 | 16,91 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 39 | 0 | 0,970 | 8,41 | 27,00 | 11,00 | 0,00 | 0,00 |
| 40 | 2 | 0,970 | 7,35 | 20,00 | 23,00 | -46,00 | 0,00 |
| 41 | 0 | 0,967 | 6,92 | 37,00 | 10,00 | 0,00 | 0,00 |
| 42 | 2 | 0,985 | 8,53 | 37,00 | 23,00 | -59,00 | 0,00 |
| 43 | 0 | 0,978 | 11,28 | 18,00 | 7,00 | 0,00 | 0,00 |
| 44 | 0 | 0,985 | 13,82 | 16,00 | 8,00 | 0,00 | 0,00 |
| 45 | 0 | 0,987 | 15,67 | 53,00 | 22,00 | 0,00 | 0,00 |
| 46 | 2 | 1,005 | 18,49 | 28,00 | 10,00 | 19,00 | 0,00 |
| 47 | 0 | 1,017 | 20,73 | 34,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

(continuação)

| | | | | | | | |
|----|---|-------|-------|--------|--------|--------|------|
| 48 | 0 | 1,021 | 19,93 | 20,00 | 11,00 | 0,00 | 0,00 |
| 49 | 2 | 1,025 | 20,94 | 87,00 | 30,00 | 204,00 | 0,00 |
| 50 | 0 | 1,001 | 18,90 | 17,00 | 4,00 | 0,00 | 0,00 |
| 51 | 0 | 0,967 | 16,28 | 17,00 | 8,00 | 0,00 | 0,00 |
| 52 | 0 | 0,957 | 15,32 | 18,00 | 5,00 | 0,00 | 0,00 |
| 53 | 0 | 0,946 | 14,35 | 23,00 | 11,00 | 0,00 | 0,00 |
| 54 | 2 | 0,955 | 15,26 | 113,00 | 32,00 | 48,00 | 0,00 |
| 55 | 2 | 0,952 | 14,97 | 63,00 | 22,00 | 0,00 | 0,00 |
| 56 | 2 | 0,954 | 15,16 | 84,00 | 18,00 | 0,00 | 0,00 |
| 57 | 0 | 0,971 | 16,36 | 12,00 | 3,00 | 0,00 | 0,00 |
| 58 | 0 | 0,959 | 15,51 | 12,00 | 3,00 | 0,00 | 0,00 |
| 59 | 2 | 0,985 | 19,37 | 277,00 | 113,00 | 155,00 | 0,00 |
| 60 | 0 | 0,993 | 23,15 | 78,00 | 3,00 | 0,00 | 0,00 |
| 61 | 2 | 0,995 | 24,04 | 0,00 | 0,00 | 160,00 | 0,00 |
| 62 | 2 | 0,998 | 23,43 | 77,00 | 14,00 | 0,00 | 0,00 |
| 63 | 0 | 0,969 | 22,75 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 64 | 0 | 0,984 | 24,52 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 65 | 2 | 1,005 | 27,65 | 0,00 | 0,00 | 391,00 | 0,00 |
| 66 | 2 | 1,050 | 27,48 | 39,00 | 18,00 | 392,00 | 0,00 |
| 67 | 0 | 1,020 | 24,84 | 28,00 | 7,00 | 0,00 | 0,00 |
| 68 | 0 | 1,003 | 27,55 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 69 | 3 | 1,035 | 30,00 | 0,00 | 0,00 | 516,40 | 0,00 |
| 70 | 2 | 0,984 | 22,58 | 66,00 | 20,00 | 0,00 | 0,00 |
| 71 | 0 | 0,987 | 22,15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 72 | 2 | 0,980 | 20,98 | 0,00 | 0,00 | -12,00 | 0,00 |
| 73 | 2 | 0,991 | 21,94 | 0,00 | 0,00 | -6,00 | 0,00 |
| 74 | 2 | 0,958 | 21,64 | 68,00 | 27,00 | 0,00 | 0,00 |
| 75 | 0 | 0,967 | 22,91 | 47,00 | 11,00 | 0,00 | 0,00 |
| 76 | 2 | 0,943 | 21,77 | 68,00 | 36,00 | 0,00 | 0,00 |
| 77 | 2 | 1,006 | 26,72 | 61,00 | 28,00 | 0,00 | 0,00 |
| 78 | 0 | 1,003 | 26,42 | 71,00 | 26,00 | 0,00 | 0,00 |
| 79 | 0 | 1,009 | 26,72 | 39,00 | 32,00 | 0,00 | 0,00 |
| 80 | 2 | 1,040 | 28,96 | 130,00 | 26,00 | 477,00 | 0,00 |
| 81 | 0 | 0,997 | 28,10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 82 | 0 | 0,989 | 27,24 | 54,00 | 27,00 | 0,00 | 0,00 |
| 83 | 0 | 0,985 | 28,42 | 20,00 | 10,00 | 0,00 | 0,00 |
| 84 | 0 | 0,980 | 30,95 | 11,00 | 7,00 | 0,00 | 0,00 |
| 85 | 2 | 0,985 | 32,51 | 24,00 | 15,00 | 0,00 | 0,00 |
| 86 | 0 | 0,987 | 31,14 | 21,00 | 10,00 | 0,00 | 0,00 |
| 87 | 2 | 1,015 | 31,40 | 0,00 | 0,00 | 4,00 | 0,00 |
| 88 | 0 | 0,987 | 35,64 | 48,00 | 10,00 | 0,00 | 0,00 |
| 89 | 2 | 1,005 | 39,69 | 0,00 | 0,00 | 607,00 | 0,00 |
| 90 | 2 | 0,985 | 33,29 | 78,00 | 42,00 | -85,00 | 0,00 |
| 91 | 2 | 0,980 | 33,31 | 0,00 | 0,00 | -10,00 | 0,00 |
| 92 | 2 | 0,993 | 33,80 | 65,00 | 10,00 | 0,00 | 0,00 |
| 93 | 0 | 0,987 | 30,79 | 12,00 | 7,00 | 0,00 | 0,00 |
| 94 | 0 | 0,991 | 28,64 | 30,00 | 16,00 | 0,00 | 0,00 |
| 95 | 0 | 0,981 | 27,67 | 42,00 | 31,00 | 0,00 | 0,00 |
| 96 | 0 | 0,993 | 27,51 | 38,00 | 15,00 | 0,00 | 0,00 |
| 97 | 0 | 1,011 | 27,88 | 15,00 | 9,00 | 0,00 | 0,00 |

(conclusão)

| | | | | | | | |
|-----|---|-------|-------|-------|-------|---------|------|
| 98 | 0 | 1,024 | 27,40 | 34,00 | 8,00 | 0,00 | 0,00 |
| 99 | 2 | 1,010 | 27,04 | 0,00 | 0,00 | -42,00 | 0,00 |
| 100 | 2 | 1,017 | 28,03 | 37,00 | 18,00 | 252,00 | 0,00 |
| 101 | 0 | 0,993 | 29,61 | 22,00 | 15,00 | 0,00 | 0,00 |
| 102 | 0 | 0,991 | 32,30 | 5,00 | 3,00 | 0,00 | 0,00 |
| 103 | 2 | 1,001 | 24,44 | 23,00 | 16,00 | 40,00 | 0,00 |
| 104 | 2 | 0,971 | 21,69 | 38,00 | 25,00 | 0,00 | 0,00 |
| 105 | 2 | 0,965 | 20,57 | 31,00 | 26,00 | 0,00 | 0,00 |
| 106 | 0 | 0,962 | 20,32 | 43,00 | 16,00 | 0,00 | 0,00 |
| 107 | 2 | 0,952 | 17,53 | 28,00 | 12,00 | -22,00 | 0,00 |
| 108 | 0 | 0,967 | 19,38 | 2,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 |
| 109 | 0 | 0,967 | 18,93 | 8,00 | 3,00 | 0,00 | 0,00 |
| 110 | 2 | 0,973 | 18,09 | 39,00 | 30,00 | 0,00 | 0,00 |
| 111 | 2 | 0,980 | 19,74 | 0,00 | 0,00 | 36,00 | 0,00 |
| 112 | 2 | 0,975 | 14,99 | 25,00 | 13,00 | -43,00 | 0,00 |
| 113 | 2 | 0,993 | 13,74 | 0,00 | 0,00 | -6,00 | 0,00 |
| 114 | 0 | 0,960 | 14,46 | 8,00 | 3,00 | 0,00 | 0,00 |
| 115 | 0 | 0,960 | 14,46 | 22,00 | 7,00 | 0,00 | 0,00 |
| 116 | 2 | 1,005 | 27,12 | 0,00 | 0,00 | -184,00 | 0,00 |
| 117 | 0 | 0,974 | 10,67 | 20,00 | 8,00 | 0,00 | 0,00 |
| 118 | 0 | 0,949 | 21,92 | 33,00 | 15,00 | 0,00 | 0,00 |

A 1.2.2 Dados das Linhas

(continua)

| N° do Ramo | De | Para | | | |
|------------|----|------|---------|---------|---------|
| 1 | 1 | 2 | 0,03030 | 0,09990 | 0,02540 |
| 2 | 1 | 3 | 0,01290 | 0,04240 | 0,01080 |
| 3 | 4 | 5 | 0,00176 | 0,00798 | 0,00210 |
| 4 | 3 | 5 | 0,02410 | 0,10800 | 0,02840 |
| 5 | 5 | 6 | 0,01190 | 0,05400 | 0,01430 |
| 6 | 6 | 7 | 0,00459 | 0,02080 | 0,00550 |
| 7 | 8 | 9 | 0,00244 | 0,03050 | 1,16200 |
| 8 | 8 | 5 | 0,00000 | 0,02670 | 0,00000 |
| 9 | 9 | 10 | 0,00258 | 0,03220 | 1,23000 |
| 10 | 4 | 11 | 0,02090 | 0,06880 | 0,01750 |
| 11 | 5 | 11 | 0,02030 | 0,06820 | 0,01740 |
| 12 | 11 | 12 | 0,00595 | 0,01960 | 0,00500 |
| 13 | 2 | 12 | 0,01870 | 0,06160 | 0,01570 |
| 14 | 3 | 12 | 0,04840 | 0,16000 | 0,04060 |
| 15 | 7 | 12 | 0,00862 | 0,03400 | 0,00870 |
| 16 | 11 | 13 | 0,02225 | 0,07310 | 0,01880 |
| 17 | 12 | 14 | 0,02150 | 0,07070 | 0,01820 |
| 18 | 13 | 15 | 0,07440 | 0,24440 | 0,06270 |
| 19 | 14 | 15 | 0,05950 | 0,19500 | 0,05020 |
| 20 | 12 | 16 | 0,02120 | 0,08340 | 0,02140 |
| 21 | 15 | 17 | 0,01320 | 0,04370 | 0,04440 |
| 22 | 16 | 17 | 0,04540 | 0,18010 | 0,04660 |
| 23 | 17 | 18 | 0,01230 | 0,05050 | 0,01300 |
| 24 | 18 | 19 | 0,01119 | 0,04930 | 0,01140 |

(continuação)

| | | | | | |
|----|----|----|---------|---------|---------|
| 25 | 19 | 20 | 0,02520 | 0,11700 | 0,02980 |
| 26 | 15 | 19 | 0,01200 | 0,03940 | 0,01010 |
| 27 | 20 | 21 | 0,01830 | 0,08490 | 0,02160 |
| 28 | 21 | 22 | 0,02090 | 0,09700 | 0,02460 |
| 29 | 22 | 23 | 0,03420 | 0,15900 | 0,04040 |
| 30 | 23 | 24 | 0,01350 | 0,04920 | 0,04980 |
| 31 | 23 | 25 | 0,01560 | 0,08000 | 0,08640 |
| 32 | 26 | 25 | 0,00000 | 0,03820 | 0,00000 |
| 33 | 25 | 27 | 0,03180 | 0,16300 | 0,17640 |
| 34 | 27 | 28 | 0,01913 | 0,08550 | 0,02160 |
| 35 | 28 | 29 | 0,02370 | 0,09430 | 0,02380 |
| 36 | 30 | 17 | 0,00000 | 0,03880 | 0,00000 |
| 37 | 8 | 30 | 0,00431 | 0,05040 | 0,51400 |
| 38 | 26 | 30 | 0,00799 | 0,08600 | 0,90800 |
| 39 | 17 | 31 | 0,04740 | 0,15630 | 0,03990 |
| 40 | 29 | 31 | 0,01080 | 0,03310 | 0,00830 |
| 41 | 23 | 32 | 0,03170 | 0,11530 | 0,11730 |
| 42 | 31 | 32 | 0,02980 | 0,09850 | 0,02510 |
| 43 | 27 | 32 | 0,02290 | 0,07550 | 0,01930 |
| 44 | 15 | 33 | 0,03800 | 0,12440 | 0,03190 |
| 45 | 19 | 34 | 0,07520 | 0,24700 | 0,06320 |
| 46 | 35 | 36 | 0,00224 | 0,01020 | 0,00270 |
| 47 | 35 | 37 | 0,01100 | 0,04970 | 0,01320 |
| 48 | 33 | 37 | 0,04150 | 0,14200 | 0,03660 |
| 49 | 34 | 36 | 0,00871 | 0,02680 | 0,00570 |
| 50 | 34 | 37 | 0,00256 | 0,00940 | 0,00980 |
| 51 | 38 | 37 | 0,00000 | 0,03750 | 0,00000 |
| 52 | 37 | 39 | 0,03210 | 0,10600 | 0,02700 |
| 53 | 37 | 40 | 0,05930 | 0,16800 | 0,04200 |
| 54 | 30 | 38 | 0,00464 | 0,05400 | 0,42200 |
| 55 | 39 | 40 | 0,01840 | 0,06050 | 0,01550 |
| 56 | 40 | 41 | 0,01450 | 0,04870 | 0,01220 |
| 57 | 40 | 42 | 0,05550 | 0,18300 | 0,04660 |
| 58 | 41 | 42 | 0,04100 | 0,13500 | 0,03440 |
| 59 | 43 | 44 | 0,06080 | 0,24540 | 0,06070 |
| 60 | 34 | 43 | 0,04130 | 0,16810 | 0,04230 |
| 61 | 44 | 45 | 0,02240 | 0,09010 | 0,02240 |
| 62 | 45 | 46 | 0,04000 | 0,13560 | 0,03320 |
| 63 | 46 | 47 | 0,03800 | 0,12700 | 0,03160 |
| 64 | 46 | 48 | 0,06010 | 0,18900 | 0,04720 |
| 65 | 47 | 49 | 0,01910 | 0,06250 | 0,01600 |
| 66 | 42 | 49 | 0,07150 | 0,32300 | 0,08600 |
| 67 | 42 | 49 | 0,07150 | 0,32300 | 0,08600 |
| 68 | 45 | 49 | 0,06840 | 0,18600 | 0,04440 |
| 69 | 48 | 49 | 0,01790 | 0,05050 | 0,01260 |
| 70 | 49 | 50 | 0,02670 | 0,07520 | 0,01870 |
| 71 | 49 | 51 | 0,04860 | 0,13700 | 0,03420 |
| 72 | 51 | 52 | 0,02030 | 0,05880 | 0,01400 |
| 73 | 52 | 53 | 0,04050 | 0,16350 | 0,04060 |
| 74 | 53 | 54 | 0,02630 | 0,12200 | 0,03100 |
| 75 | 49 | 54 | 0,07300 | 0,28900 | 0,07380 |

(continuação)

| | | | | | |
|-----|----|----|---------|---------|---------|
| 76 | 49 | 54 | 0,08690 | 0,29100 | 0,07300 |
| 77 | 54 | 55 | 0,01690 | 0,07070 | 0,02020 |
| 78 | 54 | 56 | 0,00275 | 0,00955 | 0,00730 |
| 79 | 55 | 56 | 0,00488 | 0,01510 | 0,00370 |
| 80 | 56 | 57 | 0,03430 | 0,09660 | 0,02420 |
| 81 | 50 | 57 | 0,04740 | 0,13400 | 0,03320 |
| 82 | 56 | 58 | 0,03430 | 0,09660 | 0,02420 |
| 83 | 51 | 58 | 0,02550 | 0,07190 | 0,01790 |
| 84 | 54 | 59 | 0,05030 | 0,22930 | 0,05980 |
| 85 | 56 | 59 | 0,08250 | 0,25100 | 0,05690 |
| 86 | 56 | 59 | 0,08030 | 0,23900 | 0,05360 |
| 87 | 55 | 59 | 0,04739 | 0,21580 | 0,05650 |
| 88 | 59 | 60 | 0,03170 | 0,14500 | 0,03760 |
| 89 | 59 | 61 | 0,03280 | 0,15000 | 0,03880 |
| 90 | 60 | 61 | 0,00264 | 0,01350 | 0,01460 |
| 91 | 60 | 62 | 0,01230 | 0,05610 | 0,01470 |
| 92 | 61 | 62 | 0,00824 | 0,03760 | 0,00980 |
| 93 | 63 | 59 | 0,00000 | 0,03860 | 0,00000 |
| 94 | 63 | 64 | 0,00172 | 0,02000 | 0,21600 |
| 95 | 64 | 61 | 0,00000 | 0,02680 | 0,00000 |
| 96 | 38 | 65 | 0,00901 | 0,09860 | 1,04600 |
| 97 | 64 | 65 | 0,00269 | 0,03020 | 0,38000 |
| 98 | 49 | 66 | 0,01800 | 0,09190 | 0,02480 |
| 99 | 49 | 66 | 0,01800 | 0,09190 | 0,02480 |
| 100 | 62 | 66 | 0,04820 | 0,21800 | 0,05780 |
| 101 | 62 | 67 | 0,02580 | 0,11700 | 0,03100 |
| 102 | 65 | 66 | 0,00000 | 0,03700 | 0,00000 |
| 103 | 66 | 67 | 0,02240 | 0,10150 | 0,02680 |
| 104 | 65 | 68 | 0,00138 | 0,01600 | 0,63800 |
| 105 | 47 | 69 | 0,08440 | 0,27780 | 0,07090 |
| 106 | 49 | 69 | 0,09850 | 0,32400 | 0,08280 |
| 107 | 68 | 69 | 0,00000 | 0,03700 | 0,00000 |
| 108 | 69 | 70 | 0,03000 | 0,12700 | 0,12200 |
| 109 | 24 | 70 | 0,00221 | 0,41150 | 0,10200 |
| 110 | 70 | 71 | 0,00882 | 0,03550 | 0,00880 |
| 111 | 24 | 72 | 0,04880 | 0,19600 | 0,04880 |
| 112 | 71 | 72 | 0,04460 | 0,18000 | 0,04440 |
| 113 | 71 | 73 | 0,00866 | 0,04540 | 0,01180 |
| 114 | 70 | 74 | 0,04010 | 0,13230 | 0,03370 |
| 115 | 70 | 75 | 0,04280 | 0,14100 | 0,03600 |
| 116 | 69 | 75 | 0,04050 | 0,12200 | 0,12400 |
| 117 | 74 | 75 | 0,01230 | 0,04060 | 0,01030 |
| 118 | 76 | 77 | 0,04440 | 0,14800 | 0,03680 |
| 119 | 69 | 77 | 0,03090 | 0,10100 | 0,10380 |
| 120 | 75 | 77 | 0,06010 | 0,19990 | 0,04980 |
| 121 | 77 | 78 | 0,00376 | 0,01240 | 0,01260 |
| 122 | 78 | 79 | 0,00546 | 0,02440 | 0,00650 |
| 123 | 77 | 80 | 0,01700 | 0,04850 | 0,04720 |
| 124 | 77 | 80 | 0,02940 | 0,10500 | 0,02280 |
| 125 | 79 | 80 | 0,01560 | 0,07040 | 0,01870 |
| 126 | 68 | 81 | 0,00175 | 0,02020 | 0,80800 |

(continuação)

| | | | | | |
|-----|-----|-----|---------|---------|---------|
| 127 | 81 | 80 | 0,00000 | 0,03700 | 0,00000 |
| 128 | 77 | 82 | 0,02980 | 0,08530 | 0,08170 |
| 129 | 82 | 83 | 0,01120 | 0,03665 | 0,03800 |
| 130 | 83 | 84 | 0,06250 | 0,13200 | 0,02580 |
| 131 | 83 | 85 | 0,04300 | 0,14800 | 0,03480 |
| 132 | 84 | 85 | 0,03020 | 0,06410 | 0,01230 |
| 133 | 85 | 86 | 0,03500 | 0,12300 | 0,02760 |
| 134 | 86 | 87 | 0,02828 | 0,20740 | 0,04450 |
| 135 | 85 | 88 | 0,02000 | 0,10200 | 0,02760 |
| 136 | 85 | 89 | 0,02390 | 0,17300 | 0,04700 |
| 137 | 88 | 89 | 0,01390 | 0,07120 | 0,01930 |
| 138 | 89 | 90 | 0,05180 | 0,18800 | 0,05280 |
| 139 | 89 | 90 | 0,02380 | 0,09970 | 0,10600 |
| 140 | 90 | 91 | 0,02540 | 0,08360 | 0,02140 |
| 141 | 89 | 92 | 0,00990 | 0,05050 | 0,05480 |
| 142 | 89 | 92 | 0,03930 | 0,15810 | 0,04140 |
| 143 | 91 | 92 | 0,03870 | 0,12720 | 0,03270 |
| 144 | 92 | 93 | 0,02580 | 0,08480 | 0,02180 |
| 145 | 92 | 94 | 0,04810 | 0,15800 | 0,04060 |
| 146 | 93 | 94 | 0,02230 | 0,07320 | 0,01880 |
| 147 | 94 | 95 | 0,01320 | 0,04340 | 0,01110 |
| 148 | 80 | 96 | 0,03560 | 0,18200 | 0,04940 |
| 149 | 82 | 96 | 0,01620 | 0,05300 | 0,05440 |
| 150 | 94 | 96 | 0,02690 | 0,08690 | 0,02300 |
| 151 | 80 | 97 | 0,01830 | 0,09340 | 0,02540 |
| 152 | 80 | 98 | 0,02380 | 0,10800 | 0,02860 |
| 153 | 80 | 99 | 0,04540 | 0,20600 | 0,05460 |
| 154 | 92 | 100 | 0,06480 | 0,29500 | 0,04720 |
| 155 | 94 | 100 | 0,01780 | 0,05800 | 0,06040 |
| 156 | 95 | 96 | 0,01710 | 0,05470 | 0,01470 |
| 157 | 96 | 97 | 0,01730 | 0,08850 | 0,02400 |
| 158 | 98 | 100 | 0,03970 | 0,17900 | 0,04760 |
| 159 | 99 | 100 | 0,01800 | 0,08130 | 0,02160 |
| 160 | 100 | 101 | 0,02770 | 0,12620 | 0,03280 |
| 161 | 92 | 102 | 0,01230 | 0,05590 | 0,01460 |
| 162 | 101 | 102 | 0,02460 | 0,11200 | 0,02940 |
| 163 | 100 | 103 | 0,01600 | 0,05250 | 0,05360 |
| 164 | 100 | 104 | 0,04510 | 0,20400 | 0,05410 |
| 165 | 103 | 104 | 0,04660 | 0,15840 | 0,04070 |
| 166 | 103 | 105 | 0,05350 | 0,16250 | 0,04080 |
| 167 | 100 | 106 | 0,06050 | 0,22900 | 0,06200 |
| 168 | 104 | 105 | 0,00994 | 0,03780 | 0,00980 |
| 169 | 105 | 106 | 0,01400 | 0,05470 | 0,01430 |
| 170 | 105 | 107 | 0,05300 | 0,18300 | 0,04720 |
| 171 | 105 | 108 | 0,02610 | 0,07030 | 0,01840 |
| 172 | 106 | 107 | 0,05300 | 0,18300 | 0,04720 |
| 173 | 108 | 109 | 0,01050 | 0,02880 | 0,00760 |
| 174 | 103 | 110 | 0,03906 | 0,18130 | 0,04610 |
| 175 | 109 | 110 | 0,02780 | 0,07620 | 0,02020 |
| 176 | 110 | 111 | 0,02200 | 0,07550 | 0,02000 |
| 177 | 110 | 112 | 0,02470 | 0,06400 | 0,06200 |

| (conclusão) | | | | | |
|-------------|-----|-----|---------|---------|---------|
| 178 | 17 | 113 | 0,00913 | 0,03010 | 0,00770 |
| 179 | 32 | 113 | 0,06150 | 0,20300 | 0,05180 |
| 180 | 32 | 114 | 0,01350 | 0,06120 | 0,01630 |
| 181 | 27 | 115 | 0,01640 | 0,07410 | 0,01970 |
| 182 | 114 | 115 | 0,00230 | 0,01040 | 0,00270 |
| 183 | 68 | 116 | 0,00034 | 0,00405 | 0,16400 |
| 184 | 12 | 117 | 0,03290 | 0,14000 | 0,03580 |
| 185 | 75 | 118 | 0,01450 | 0,04810 | 0,01200 |
| 186 | 76 | 118 | 0,01640 | 0,05440 | 0,01360 |

A 1.2.3 Arquivo de dados para o matlab:

```

%dados 118-barras
%%dados de barra [tipo V Pn Qn Pleve Qleve Ppes Qpes]
%% tipo 0-Vt 1-PQ 2-PV
%%[nB tipo V th Pd Qd Pg Qg]
dados_B=[
  1 2 0.955 10.67 51.0 27.0 0.0 0.0;
  2 0 0.971 11.22 20.0 9.0 0.0 0.0;
  3 0 0.968 11.56 39.0 10.0 0.0 0.0;
  4 2 0.998 15.28 30.0 12.0 -9.0 0.0;
  5 0 1.002 15.73 0.0 0.0 0.0 0.0;
  6 2 0.990 13.00 52.0 22.0 0.0 0.0;
  7 0 0.989 12.56 19.0 2.0 0.0 0.0;
  8 2 1.015 20.77 0.0 0.0 -28.0 0.0;
  9 0 1.043 28.02 0.0 0.0 0.0 0.0;
  10 2 1.050 35.61 0.0 0.0 450.0 0.0;
  11 0 0.985 12.72 70.0 23.0 0.0 0.0;
  12 2 0.990 12.20 47.0 10.0 85.0 0.0;
  13 0 0.968 11.35 34.0 16.0 0.0 0.0;
  14 0 0.984 11.50 14.0 1.0 0.0 0.0;
  15 2 0.970 11.23 90.0 30.0 0.0 0.0;
  16 0 0.984 11.91 25.0 10.0 0.0 0.0;
  17 0 0.995 13.74 11.0 3.0 0.0 0.0;
  18 2 0.973 11.53 60.0 34.0 0.0 0.0;
  19 2 0.963 11.05 45.0 25.0 0.0 0.0;
  20 0 0.958 11.93 18.0 3.0 0.0 0.0;
  21 0 0.959 13.52 14.0 8.0 0.0 0.0;
  22 0 0.970 16.08 10.0 5.0 0.0 0.0;
  23 0 1.000 21.00 7.0 3.0 0.0 0.0;
  24 2 0.992 20.89 0.0 0.0 -13.0 0.0;
  25 2 1.050 27.93 0.0 0.0 220.0 0.0;
  26 2 1.015 29.71 0.0 0.0 314.0 0.0;
  27 2 0.968 15.35 62.0 13.0 -9.0 0.0;
  28 0 0.962 13.62 17.0 7.0 0.0 0.0;
  29 0 0.963 12.63 24.0 4.0 0.0 0.0;
  30 0 0.968 18.79 0.0 0.0 0.0 0.0;
  31 2 0.967 12.75 43.0 27.0 7.0 0.0;
  32 2 0.964 14.80 59.0 23.0 0.0 0.0;
  33 0 0.972 10.63 23.0 9.0 0.0 0.0;
  34 2 0.986 11.30 59.0 26.0 0.0 0.0;
  35 0 0.981 10.87 33.0 9.0 0.0 0.0;
  36 2 0.980 10.87 31.0 17.0 0.0 0.0;
  37 0 0.992 11.77 0.0 0.0 0.0 0.0;
  38 0 0.962 16.91 0.0 0.0 0.0 0.0;
  39 0 0.970 8.41 27.0 11.0 0.0 0.0;
  40 2 0.970 7.35 20.0 23.0 -46.0 0.0;

```

| | | | | | | | |
|-----|---|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 41 | 0 | 0.967 | 6.92 | 37.0 | 10.0 | 0.0 | 0.0; |
| 42 | 2 | 0.985 | 8.53 | 37.0 | 23.0 | -59.0 | 0.0; |
| 43 | 0 | 0.978 | 11.28 | 18.0 | 7.0 | 0.0 | 0.0; |
| 44 | 0 | 0.985 | 13.82 | 16.0 | 8.0 | 0.0 | 0.0; |
| 45 | 0 | 0.987 | 15.67 | 53.0 | 22.0 | 0.0 | 0.0; |
| 46 | 2 | 1.005 | 18.49 | 28.0 | 10.0 | 19.0 | 0.0; |
| 47 | 0 | 1.017 | 20.73 | 34.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 48 | 0 | 1.021 | 19.93 | 20.0 | 11.0 | 0.0 | 0.0; |
| 49 | 2 | 1.025 | 20.94 | 87.0 | 30.0 | 204.0 | 0.0; |
| 50 | 0 | 1.001 | 18.90 | 17.0 | 4.0 | 0.0 | 0.0; |
| 51 | 0 | 0.967 | 16.28 | 17.0 | 8.0 | 0.0 | 0.0; |
| 52 | 0 | 0.957 | 15.32 | 18.0 | 5.0 | 0.0 | 0.0; |
| 53 | 0 | 0.946 | 14.35 | 23.0 | 11.0 | 0.0 | 0.0; |
| 54 | 2 | 0.955 | 15.26 | 113.0 | 32.0 | 48.0 | 0.0; |
| 55 | 2 | 0.952 | 14.97 | 63.0 | 22.0 | 0.0 | 0.0; |
| 56 | 2 | 0.954 | 15.16 | 84.0 | 18.0 | 0.0 | 0.0; |
| 57 | 0 | 0.971 | 16.36 | 12.0 | 3.0 | 0.0 | 0.0; |
| 58 | 0 | 0.959 | 15.51 | 12.0 | 3.0 | 0.0 | 0.0; |
| 59 | 2 | 0.985 | 19.37 | 277.0 | 113.0 | 155.0 | 0.0; |
| 60 | 0 | 0.993 | 23.15 | 78.0 | 3.0 | 0.0 | 0.0; |
| 61 | 2 | 0.995 | 24.04 | 0.0 | 0.0 | 160.0 | 0.0; |
| 62 | 2 | 0.998 | 23.43 | 77.0 | 14.0 | 0.0 | 0.0; |
| 63 | 0 | 0.969 | 22.75 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 64 | 0 | 0.984 | 24.52 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 65 | 2 | 1.005 | 27.65 | 0.0 | 0.0 | 391.0 | 0.0; |
| 66 | 2 | 1.050 | 27.48 | 39.0 | 18.0 | 392.0 | 0.0; |
| 67 | 0 | 1.020 | 24.84 | 28.0 | 7.0 | 0.0 | 0.0; |
| 68 | 0 | 1.003 | 27.55 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 69 | 3 | 1.035 | 30.00 | 0.0 | 0.0 | 516.4 | 0.0; |
| 70 | 2 | 0.984 | 22.58 | 66.0 | 20.0 | 0.0 | 0.0; |
| 71 | 0 | 0.987 | 22.15 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 72 | 2 | 0.980 | 20.98 | 0.0 | 0.0 | -12.0 | 0.0; |
| 73 | 2 | 0.991 | 21.94 | 0.0 | 0.0 | -6.0 | 0.0; |
| 74 | 2 | 0.958 | 21.64 | 68.0 | 27.0 | 0.0 | 0.0; |
| 75 | 0 | 0.967 | 22.91 | 47.0 | 11.0 | 0.0 | 0.0; |
| 76 | 2 | 0.943 | 21.77 | 68.0 | 36.0 | 0.0 | 0.0; |
| 77 | 2 | 1.006 | 26.72 | 61.0 | 28.0 | 0.0 | 0.0; |
| 78 | 0 | 1.003 | 26.42 | 71.0 | 26.0 | 0.0 | 0.0; |
| 79 | 0 | 1.009 | 26.72 | 39.0 | 32.0 | 0.0 | 0.0; |
| 80 | 2 | 1.040 | 28.96 | 130.0 | 26.0 | 477.0 | 0.0; |
| 81 | 0 | 0.997 | 28.10 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 82 | 0 | 0.989 | 27.24 | 54.0 | 27.0 | 0.0 | 0.0; |
| 83 | 0 | 0.985 | 28.42 | 20.0 | 10.0 | 0.0 | 0.0; |
| 84 | 0 | 0.980 | 30.95 | 11.0 | 7.0 | 0.0 | 0.0; |
| 85 | 2 | 0.985 | 32.51 | 24.0 | 15.0 | 0.0 | 0.0; |
| 86 | 0 | 0.987 | 31.14 | 21.0 | 10.0 | 0.0 | 0.0; |
| 87 | 2 | 1.015 | 31.40 | 0.0 | 0.0 | 4.0 | 0.0; |
| 88 | 0 | 0.987 | 35.64 | 48.0 | 10.0 | 0.0 | 0.0; |
| 89 | 2 | 1.005 | 39.69 | 0.0 | 0.0 | 607.0 | 0.0; |
| 90 | 2 | 0.985 | 33.29 | 78.0 | 42.0 | -85.0 | 0.0; |
| 91 | 2 | 0.980 | 33.31 | 0.0 | 0.0 | -10.0 | 0.0; |
| 92 | 2 | 0.993 | 33.80 | 65.0 | 10.0 | 0.0 | 0.0; |
| 93 | 0 | 0.987 | 30.79 | 12.0 | 7.0 | 0.0 | 0.0; |
| 94 | 0 | 0.991 | 28.64 | 30.0 | 16.0 | 0.0 | 0.0; |
| 95 | 0 | 0.981 | 27.67 | 42.0 | 31.0 | 0.0 | 0.0; |
| 96 | 0 | 0.993 | 27.51 | 38.0 | 15.0 | 0.0 | 0.0; |
| 97 | 0 | 1.011 | 27.88 | 15.0 | 9.0 | 0.0 | 0.0; |
| 98 | 0 | 1.024 | 27.40 | 34.0 | 8.0 | 0.0 | 0.0; |
| 99 | 2 | 1.010 | 27.04 | 0.0 | 0.0 | -42.0 | 0.0; |
| 100 | 2 | 1.017 | 28.03 | 37.0 | 18.0 | 252.0 | 0.0; |
| 101 | 0 | 0.993 | 29.61 | 22.0 | 15.0 | 0.0 | 0.0; |

| | | | | | | | |
|-----|---|-------|-------|------|------|--------|--------|
| 102 | 0 | 0.991 | 32.30 | 5.0 | 3.0 | 0.0 | 0.0; |
| 103 | 2 | 1.001 | 24.44 | 23.0 | 16.0 | 40.0 | 0.0; |
| 104 | 2 | 0.971 | 21.69 | 38.0 | 25.0 | 0.0 | 0.0; |
| 105 | 2 | 0.965 | 20.57 | 31.0 | 26.0 | 0.0 | 0.0; |
| 106 | 0 | 0.962 | 20.32 | 43.0 | 16.0 | 0.0 | 0.0; |
| 107 | 2 | 0.952 | 17.53 | 28.0 | 12.0 | -22.0 | 0.0; |
| 108 | 0 | 0.967 | 19.38 | 2.0 | 1.0 | 0.0 | 0.0; |
| 109 | 0 | 0.967 | 18.93 | 8.0 | 3.0 | 0.0 | 0.0; |
| 110 | 2 | 0.973 | 18.09 | 39.0 | 30.0 | 0.0 | 0.0; |
| 111 | 2 | 0.980 | 19.74 | 0.0 | 0.0 | 36.0 | 0.0; |
| 112 | 2 | 0.975 | 14.99 | 25.0 | 13.0 | -43.0 | 0.0; |
| 113 | 2 | 0.993 | 13.74 | 0.0 | 0.0 | -6.0 | 0.0; |
| 114 | 0 | 0.960 | 14.46 | 8.0 | 3.0 | 0.0 | 0.0; |
| 115 | 0 | 0.960 | 14.46 | 22.0 | 7.0 | 0.0 | 0.0; |
| 116 | 2 | 1.005 | 27.12 | 0.0 | 0.0 | -184.0 | 0.0; |
| 117 | 0 | 0.974 | 10.67 | 20.0 | 8.0 | 0.0 | 0.0; |
| 118 | 0 | 0.949 | 21.92 | 33.0 | 15.0 | 0.0 | 0.0]; |

dados_linha=[

| | | | | |
|----|----|---------|---------|---------|
| 1 | 2 | 0.03030 | 0.09990 | 0.0254; |
| 1 | 3 | 0.01290 | 0.04240 | 0.0108; |
| 4 | 5 | 0.00176 | 0.00798 | 0.0021; |
| 3 | 5 | 0.02410 | 0.10800 | 0.0284; |
| 5 | 6 | 0.01190 | 0.05400 | 0.0143; |
| 6 | 7 | 0.00459 | 0.02080 | 0.0055; |
| 8 | 9 | 0.00244 | 0.03050 | 1.1620; |
| 8 | 5 | 0.00000 | 0.02670 | 0.0000; |
| 9 | 10 | 0.00258 | 0.03220 | 1.2300; |
| 4 | 11 | 0.02090 | 0.06880 | 0.0175; |
| 5 | 11 | 0.02030 | 0.06820 | 0.0174; |
| 11 | 12 | 0.00595 | 0.01960 | 0.0050; |
| 2 | 12 | 0.01870 | 0.06160 | 0.0157; |
| 3 | 12 | 0.04840 | 0.16000 | 0.0406; |
| 7 | 12 | 0.00862 | 0.03400 | 0.0087; |
| 11 | 13 | 0.02225 | 0.07310 | 0.0188; |
| 12 | 14 | 0.02150 | 0.07070 | 0.0182; |
| 13 | 15 | 0.07440 | 0.24440 | 0.0627; |
| 14 | 15 | 0.05950 | 0.19500 | 0.0502; |
| 12 | 16 | 0.02120 | 0.08340 | 0.0214; |
| 15 | 17 | 0.01320 | 0.04370 | 0.0444; |
| 16 | 17 | 0.04540 | 0.18010 | 0.0466; |
| 17 | 18 | 0.01230 | 0.05050 | 0.0130; |
| 18 | 19 | 0.01119 | 0.04930 | 0.0114; |
| 19 | 20 | 0.02520 | 0.11700 | 0.0298; |
| 15 | 19 | 0.01200 | 0.03940 | 0.0101; |
| 20 | 21 | 0.01830 | 0.08490 | 0.0216; |
| 21 | 22 | 0.02090 | 0.09700 | 0.0246; |
| 22 | 23 | 0.03420 | 0.15900 | 0.0404; |
| 23 | 24 | 0.01350 | 0.04920 | 0.0498; |
| 23 | 25 | 0.01560 | 0.08000 | 0.0864; |
| 26 | 25 | 0.00000 | 0.03820 | 0.0000; |
| 25 | 27 | 0.03180 | 0.16300 | 0.1764; |
| 27 | 28 | 0.01913 | 0.08550 | 0.0216; |
| 28 | 29 | 0.02370 | 0.09430 | 0.0238; |
| 30 | 17 | 0.00000 | 0.03880 | 0.0000; |
| 8 | 30 | 0.00431 | 0.05040 | 0.5140; |
| 26 | 30 | 0.00799 | 0.08600 | 0.9080; |
| 17 | 31 | 0.04740 | 0.15630 | 0.0399; |
| 29 | 31 | 0.01080 | 0.03310 | 0.0083; |
| 23 | 32 | 0.03170 | 0.11530 | 0.1173; |
| 31 | 32 | 0.02980 | 0.09850 | 0.0251; |

27 32 0.02290 0.07550 0.0193;
15 33 0.03800 0.12440 0.0319;
19 34 0.07520 0.24700 0.0632;
35 36 0.00224 0.01020 0.0027;
35 37 0.01100 0.04970 0.0132;
33 37 0.04150 0.14200 0.0366;
34 36 0.00871 0.02680 0.0057;
34 37 0.00256 0.00940 0.0098;
38 37 0.00000 0.03750 0.0000;
37 39 0.03210 0.10600 0.0270;
37 40 0.05930 0.16800 0.0420;
30 38 0.00464 0.05400 0.4220;
39 40 0.01840 0.06050 0.0155;
40 41 0.01450 0.04870 0.0122;
40 42 0.05550 0.18300 0.0466;
41 42 0.04100 0.13500 0.0344;
43 44 0.06080 0.24540 0.0607;
34 43 0.04130 0.16810 0.0423;
44 45 0.02240 0.09010 0.0224;
45 46 0.04000 0.13560 0.0332;
46 47 0.03800 0.12700 0.0316;
46 48 0.06010 0.18900 0.0472;
47 49 0.01910 0.06250 0.0160;
42 49 0.07150 0.32300 0.0860;
42 49 0.07150 0.32300 0.0860;
45 49 0.06840 0.18600 0.0444;
48 49 0.01790 0.05050 0.0126;
49 50 0.02670 0.07520 0.0187;
49 51 0.04860 0.13700 0.0342;
51 52 0.02030 0.05880 0.0140;
52 53 0.04050 0.16350 0.0406;
53 54 0.02630 0.12200 0.0310;
49 54 0.07300 0.28900 0.0738;
49 54 0.08690 0.29100 0.0730;
54 55 0.01690 0.07070 0.0202;
54 56 0.00275 0.00955 0.0073;
55 56 0.00488 0.01510 0.0037;
56 57 0.03430 0.09660 0.0242;
50 57 0.04740 0.13400 0.0332;
56 58 0.03430 0.09660 0.0242;
51 58 0.02550 0.07190 0.0179;
54 59 0.05030 0.22930 0.0598;
56 59 0.08250 0.25100 0.0569;
56 59 0.08030 0.23900 0.0536;
55 59 0.04739 0.21580 0.0565;
59 60 0.03170 0.14500 0.0376;
59 61 0.03280 0.15000 0.0388;
60 61 0.00264 0.01350 0.0146;
60 62 0.01230 0.05610 0.0147;
61 62 0.00824 0.03760 0.0098;
63 59 0.00000 0.03860 0.0000;
63 64 0.00172 0.02000 0.2160;
64 61 0.00000 0.02680 0.0000;
38 65 0.00901 0.09860 1.0460;
64 65 0.00269 0.03020 0.3800;
49 66 0.01800 0.09190 0.0248;
49 66 0.01800 0.09190 0.0248;
62 66 0.04820 0.21800 0.0578;
62 67 0.02580 0.11700 0.0310;
65 66 0.00000 0.03700 0.0000;
66 67 0.02240 0.10150 0.0268;

65 68 0.00138 0.01600 0.6380;
47 69 0.08440 0.27780 0.0709;
49 69 0.09850 0.32400 0.0828;
68 69 0.00000 0.03700 0.0000;
69 70 0.03000 0.12700 0.1220;
24 70 0.00221 0.41150 0.1020;
70 71 0.00882 0.03550 0.0088;
24 72 0.04880 0.19600 0.0488;
71 72 0.04460 0.18000 0.0444;
71 73 0.00866 0.04540 0.0118;
70 74 0.04010 0.13230 0.0337;
70 75 0.04280 0.14100 0.0360;
69 75 0.04050 0.12200 0.1240;
74 75 0.01230 0.04060 0.0103;
76 77 0.04440 0.14800 0.0368;
69 77 0.03090 0.10100 0.1038;
75 77 0.06010 0.19990 0.0498;
77 78 0.00376 0.01240 0.0126;
78 79 0.00546 0.02440 0.0065;
77 80 0.01700 0.04850 0.0472;
77 80 0.02940 0.10500 0.0228;
79 80 0.01560 0.07040 0.0187;
68 81 0.00175 0.02020 0.8080;
81 80 0.00000 0.03700 0.0000;
77 82 0.02980 0.08530 0.0817;
82 83 0.01120 0.03665 0.0380;
83 84 0.06250 0.13200 0.0258;
83 85 0.04300 0.14800 0.0348;
84 85 0.03020 0.06410 0.0123;
85 86 0.03500 0.12300 0.0276;
86 87 0.02828 0.20740 0.0445;
85 88 0.02000 0.10200 0.0276;
85 89 0.02390 0.17300 0.0470;
88 89 0.01390 0.07120 0.0193;
89 90 0.05180 0.18800 0.0528;
89 90 0.02380 0.09970 0.1060;
90 91 0.02540 0.08360 0.0214;
89 92 0.00990 0.05050 0.0548;
89 92 0.03930 0.15810 0.0414;
91 92 0.03870 0.12720 0.0327;
92 93 0.02580 0.08480 0.0218;
92 94 0.04810 0.15800 0.0406;
93 94 0.02230 0.07320 0.0188;
94 95 0.01320 0.04340 0.0111;
80 96 0.03560 0.18200 0.0494;
82 96 0.01620 0.05300 0.0544;
94 96 0.02690 0.08690 0.0230;
80 97 0.01830 0.09340 0.0254;
80 98 0.02380 0.10800 0.0286;
80 99 0.04540 0.20600 0.0546;
92 100 0.06480 0.29500 0.0472;
94 100 0.01780 0.05800 0.0604;
95 96 0.01710 0.05470 0.0147;
96 97 0.01730 0.08850 0.0240;
98 100 0.03970 0.17900 0.0476;
99 100 0.01800 0.08130 0.0216;
100 101 0.02770 0.12620 0.0328;
92 102 0.01230 0.05590 0.0146;
101 102 0.02460 0.11200 0.0294;
100 103 0.01600 0.05250 0.0536;
100 104 0.04510 0.20400 0.0541;

```

103 104 0.04660 0.15840 0.0407;
103 105 0.05350 0.16250 0.0408;
100 106 0.06050 0.22900 0.0620;
104 105 0.00994 0.03780 0.0098;
105 106 0.01400 0.05470 0.0143;
105 107 0.05300 0.18300 0.0472;
105 108 0.02610 0.07030 0.0184;
106 107 0.05300 0.18300 0.0472;
108 109 0.01050 0.02880 0.0076;
103 110 0.03906 0.18130 0.0461;
109 110 0.02780 0.07620 0.0202;
110 111 0.02200 0.07550 0.0200;
110 112 0.02470 0.06400 0.0620;
17 113 0.00913 0.03010 0.0077;
32 113 0.06150 0.20300 0.0518;
32 114 0.01350 0.06120 0.0163;
27 115 0.01640 0.07410 0.0197;
114 115 0.00230 0.01040 0.0027;
68 116 0.00034 0.00405 0.1640;
12 117 0.03290 0.14000 0.0358;
75 118 0.01450 0.04810 0.0120;
76 118 0.01640 0.05440 0.0136];

nr=length(dados_linha)
nb=length(dados_B)
V=ones(1,nb);
Pnom=zeros(1,nb);
Qnom=zeros(1,nb);
for i=1:nb
    Tipo(i)=dados_B(i,2);
    if Tipo(i)==0
        Tipo(i)=2;
        Pnom(i)=dados_B(i,7)-dados_B(i,5);
        Qnom(i)=dados_B(i,8)-dados_B(i,6);
    elseif Tipo(i)==3
        Tipo(i)=0;
        V(i)=dados_B(i,3);
    else
        Tipo(i)=1;
        V(i)=dados_B(i,3);
        Pnom(i)=dados_B(i,7)-dados_B(i,5);
    end
end
for i=1:nb
    dados_barra(i,1)=Tipo(i);
    dados_barra(i,2)=V(i);
    dados_barra(i,3)=Pnom(i); %% carga nominal
    dados_barra(i,4)=Qnom(i);
    if Tipo(i)~=0
        mmL=abs(50-i)/100;
        dados_barra(i,5)=Pnom(i)*(1-mmL); %% carga leve
        dados_barra(i,6)=Qnom(i)*(1-mmL);
        mmP=abs(60-i)/100;
        dados_barra(i,7)=Pnom(i)*(1+mmP); %% carga pesada
        dados_barra(i,8)=Qnom(i)*(1+mmP);
    end
end
from=dados_linha(:,1);
to=dados_linha(:,2);

```