

200205599



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica

Desenvolvimento de Interfaces Gráficas para Centros de Controle de Energia Elétrica

Autor: Alexandre de Assis Mota

Orientador: Prof. Dr. Alcir José Monticelli

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alcir José Monticelli (Presidente)
Prof. Dr. Hans Helmut Zürn
Prof. Dr. André Luiz Morelato França
Prof. Dr. Ariovaldo Verandio Garcia

DSEE/FEEC/UNICAMP
DEE/UFSC
DSEE/FEEC/UNICAMP
DSEE/FEEC/UNICAMP

Campinas (SP), 30 de Março de 2001.

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por Alexandre de Assis Mota e aprovada pela Comissão Julgada em 30 / 03 / 2001

[Assinatura]
Orientador

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	T/UNICAMP
	M856d
V.	
Tombo BC/	47401
PROC.	837102
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	2511,00
DATA	04-02-02
N.º CPD	

CM00163100-2

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M856d

Mota, Alexandre de Assis

Desenvolvimento de interfaces gráficas para centros de controle de energia elétrica / Alexandre de Assis Mota. - Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientador: Alcir José Monticelli.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sistemas de energia elétrica - Controle. 2. Sistemas de energia elétrica. 3. Centros de controle. 4. Interface Homem-Computador. I. Monticelli, Alcir José. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Resumo

O objetivo desta dissertação é o de estudar os métodos e requisitos necessários para realizar a implementação de interfaces gráficas no ambiente de centros de controle de energia elétrica, que possibilitem a visualização, através de animações gráficas e figuras tridimensionais, do estado do sistema de energia em tempo real e dos dados obtidos junto às funções de análise de rede, tais como Estimador de Estado, Fluxo de Carga, Análise de Segurança, etc. Para tanto, são empregados conceitos de visualização científica e orientação a objetos. Como resultado deste trabalho, é apresentada a versão revisada de uma interface de visualização do estado da rede elétrica, generalizada para aplicação com diferentes funções de análise de rede e desenvolvida com a linguagem JAVA, utilizando recursos avançados como animações e visualização tridimensional do estado.

Palavras-chave: Interfaces Gráficas, Centros de Controle de Energia Elétrica, Visualização Científica.

Abstract

This work is about the study of methods and necessary requirements for the implementation of graphical user interfaces in power systems control centers, that make possible the visualization of the state of electric power systems and data gathered from real time electric network analysis functions (like the state estimator, security assessment and the on-line power flow) through the use of animations and tridimensional figures. To achieve that, scientific visualization and object oriented programming concepts are employed. As a result, a revised version of a user interface for power system state visualization is presented, developed with JAVA language and generalized for use with different electric analysis functions. This interface also makes use of animations and methods for the state tridimensional visualization.

Keywords: Graphical User Interface, Power System Control Center, Scientific Visualization.

*Para Lia.
Para Ivany, José, Gustavo, Ricardo,
Elisabeth, Helena, Guilherme e Hanna.*

Agradecimentos

Ao professor Alcir Monticelli, pelos ensinamentos transmitidos, confiança e inestimável orientação.

Aos demais professores do DSEE, Ariovaldo Garcia, André França, Carlos Castro, Carlos Murari e Fujio Sato, pelos valiosos ensinamentos ao longo destes anos.

Aos colegas do DSEE, em especial ao José Carlos Pasini, pelas contribuições e comentários durante o trabalho.

Às secretárias Edna Servidone e Alaíde Ramos, pela ajuda e competência.

À minha mãe, Ivany, pelo exemplo e carinho, e a meus irmãos Gustavo, Ricardo, Elisabeth, Helena, Guilherme e Hanna, companheiros que sempre deram apoio incondicional aos meus projetos de pesquisa.

À minha querida noiva Lia, pelo seu inegável amor, carinho, companheirismo e dedicação, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

À família de minha noiva, pelo acolhimento, constante estímulo e apoio durante estes anos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo suporte e financiamento desta pesquisa.

Índice

1. Introdução	1
2. Análise do Fluxo de Dados em Centros de Controle de Energia Elétrica ..	5
2.1. Introdução	5
2.2. Arquitetura Geral de Centros de Controle de Energia Elétrica	6
2.3. Aquisição de Dados	7
2.4. O SCADA	9
2.5. O Subsistema de Análise de Rede e Apoio	10
2.6. Bancos de Dados	13
2.7. Funções de Análise de Rede	14
2.7.1. Fluxo de Dados entre as Funções de Análise de Rede	14
2.7.2. Classificação das Funções de Análise de Rede	15
2.8. Descrição das Funções de Análise de Rede	16
2.8.1. Configurador da Rede	16
2.8.2. Observador da Rede	18
2.8.3. Estimador de Estado	19
2.8.4. Determinação do Equivalente Externo	20
2.8.5. Previsão da Carga	22
2.8.6. Fluxo de Potência On-Line	23
2.8.7. Fluxo de Potência Ótimo	23
2.8.8. Gerenciamento de Segurança	24

3. Construção da Interface de Usuário	27
3.1. Interfaces de Usuário	27
3.1.1. Características Gerais de Interfaces de Usuário	27
3.1.2. Metodologia de Projeto de Interfaces de Usuário	29
3.2. Componentes mais Comuns de Interfaces de Usuário	30
3.2.1. Mensagem	31
3.2.2. Menus	32
3.2.3. “Checkbox”	33
3.2.4. Caixas de Diálogo	34
3.2.5. Componentes de Feedback	34
3.2.6. Labels	35
3.2.7. Listas	35
3.2.8. Botões	36
3.3. Programação Orientada a Objetos	37
3.3.1. Conceitos de OOP	37
3.3.2. Análise e Projeto de Software Orientado a Objetos	39
3.3.3. Aplicação de Orientação a Objetos na Construção da Interface de Usuário	40
3.4. Implementação no Ambiente de Centros de Controle de Energia	41
3.4.1. Problemas na Interação Homem-Máquina	41
3.4.2. Tendências do Setor Elétrico	42
3.4.3. Características das Interfaces Homem-Máquina	43
3.4.4. Integração dos Processos em Centros de Controle	44
4. Aspectos de Representação e Visualização da Rede Elétrica	47
4.1. Percepção do Operador e Representação Gráfica	47
4.2. Representação dos Componentes do Sistema de Energia	50
4.2.1. Representação de Barras	51
4.2.2. Representação de Ramos	52

4.2.3. Representação de Geradores e Máquinas Síncronas	53
4.2.4. Representação de Transformadores e Autotransformadores	53
4.2.5. Representação de Dispositivos de Chaveamento	54
4.2.6. Representação de Bancos de Capacitores e Indutores	54
4.2.7. Representação de Usinas e Subestações	55
4.2.8. Outros Dispositivos e Equipamentos	55
4.3. Representação do Estado do Sistema de Energia	56
4.3.1. Emprego de Escalas de Cores	56
4.3.2. Representação Textual de Valores Telemedidos	56
4.3.3. Representação Gráfica com Medidores Analógicos	57
4.3.4. Representação da Magnitude da Tensão Nodal	57
4.3.5. Representação do Ângulo da Tensão Nodal	58
4.3.6. Representação Conjunta da Magnitude e do Ângulo da Tensão Nodal	58
4.3.7. Representação de Fluxos nos Ramos	59
4.3.8. Representação da Injeções de Potência ou Carga nas Barras	59
4.3.9. Representação do Estado de Dispositivos de Chaveamento	60
4.3.10. Representação do Valor dos Taps de Transformadores	60
4.4. Princípios de Visualização Científica	60
4.4.1. O Modelo “Dataflow”	61
4.4.2. Fluxo de Dados entre as Funções de Análise de Rede e Visualização Científica	62
4.4.3. Animação e Visualização Científica	64
4.5. Animação em Centros de Controle	64
4.6. Modelo Conceitual de Animação	67
5. Implementação e Resultados Obtidos	71
5.1. Formas Adotadas para Representação do Estado	71
5.1.1. Escalas de Cores	71

5.1.2. Representação Textual	74
5.1.3. Medidores Gráficos Analógicos	75
5.2. Formas Adotadas para Representação de Componentes	77
5.2.1. Representação de Barras	77
5.2.2. Representação de Ramos	78
5.2.3. Representação de Equipamentos	81
5.2.4. Representação da Rede Elétrica	84
5.2.5. Ajuste de Parâmetros na Representação da Rede Elétrica	94
5.3. Projeto Orientado a Objetos	101
5.4. Mecanismo de Animação Implementado	103
5.4.1. Utilização de Canal Auxiliar	103
5.4.2. Buffer Duplo	104
5.5. Bancos de Dados	105
5.5.1. Visualização de um Único Caso Estático	106
5.5.2. Visualização de dados Históricos	107
5.5.3. Informações em Tempo Real	108
5.5.4. Detalhamento dos Observadores de Dados	109
5.6. A Interface de Usuário	111
5.6.1. Ações do Usuário	112
5.6.2. Menus Implementados	113
5.6.3. Caixas de Informação	119
5.6.4. Processamento de Alarmes e Eventos	120
5.6.5. Caixas de Ajuda	121
5.7. Ambiente Computacional	121
5.8. Testes de Desempenho da Interface	123
5.8.1. Requisição de Memória	123
5.8.2. Taxa de exibição máxima atingida	123
5.8.3. Taxa de Atualização do Arquivo de Dados Dinâmico - Fluxo de Carga	124

5.8.4. Gerenciamento de Múltiplas Janelas	124
5.8.5. Comunicação entre Processos – Estimação de Estado	125
5.8.6. Número de Componentes no Diagrama Unifilar	125
5.8.7. Dimensão das Malhas de Contorno e Tridimensional	126
6. Conclusões	127
Referências Bibliográficas	129
A. Sistemas Utilizados nos Testes	133
B. OMT – Object Modeling Technique	137
C. Formulação das Funções de Análise de Rede Implementadas	141
C.1. Fluxo de Carga	141
C.2. Estimação de Estado	143

Lista de Abreviaturas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz.

DA/TDMA – Demand Assignment/Time Division Multiple Access.

DBS – Data Base System (Sistema de Banco de Dados).

FAR – Funções de Análise de Rede.

FCDC – Fluxo de Carga DC.

GUI – Graphical User Interface (Interface Gráfica de Usuário).

HSV – Escala de Cores (Hue, Saturation and Value).

IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers.

IHM – Interface Homem-Máquina.

INTERNET – Rede Mundial de Computadores (International Network).

OMT – Object Modeling Technique.

OOP – Object Oriented Programming (Programação Orientada a Objetos).

QMP – Método dos Quadrados Mínimos Ponderado.

PC – Computador Pessoal (Personal Computer).

RGB – Escala de Cores Vermelho, Verde e Azul (Red, Green and Blue).

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition.

SGBD – Sistema Gerenciador de Banco de Dados.

UTR – Unidade Terminal Remota.

Lista de Figuras

2.1. Visualização de Dados em um Centro de Controle de Energia	7
2.2. Subsistema de Análise de Rede e Apoio	12
2.3. Fluxo de dados entre as Funções de Análise de Rede	15
3.1. Mensagem	32
3.2. Menus	33
3.3. “Checkbox”	33
3.4. Caixa de diálogo	34
3.5. Componente de “Feedback”	35
3.6. Lista	36
3.7. Botões	36
3.8. Organização de Processos em Centros de Controle	44
3.9. Integração entre as IHMs e as FARs	45
4.1. Processo mental decorrente da interpretação de dados numéricos	48
4.2. Processo mental decorrente da interpretação de dados gráficos	49
4.3. Representação unifilar de barras	51
4.4. Representação bidimensional de barras	52
4.5. Representação unifilar de ramos	52
4.6. Denominação usual de linhas e ramos	52
4.7. Representação de unidades geradoras	53
4.8. Representação de transformadores e Autotransformadores	53
4.9. Representação de chaves e disjuntores	54
4.10. Representação de contatos de chaves e disjuntores	54
4.11. Representação de bancos capacitivos e indutivos	55
4.12. Representação de usinas e subestações	55

4.13. Representação de Medidores Analógicos	57
4.14. Representação escalar com gradação pela altura	58
4.15. Modelo “Dataflow”	62
4.16. Modelo Conceitual do Processo de Animação em um Centro de Controle ..	67
5.1. Escala de Cores Implementada	73
5.2. Medidor Angular	75
5.3. Medidor de Carregamento	76
5.4. Representação adotada para barras	77
5.5. Representação de tensão nodal no caso unifilar	77
5.6. Representação de tensão nodal no caso com escala de cores	78
5.7. Representação de tensão nodal no caso em 3 dimensões	78
5.8. Representação de ramos no caso unifilar	79
5.9. Representação textual de fluxos	79
5.10. Medidores de Fluxo	79
5.11. Carregamento bidimensional	80
5.12. Direcionamento dos fluxos	80
5.13. Setas tridimensionais	81
5.14. Tamanho relativo ao carregamento	81
5.15. Representação de Transformadores	82
5.16. Representação de Autotransformadores	82
5.17. Representação de Geradores	83
5.18. Representação de Chaves e Disjuntores	83
5.19. Diagrama Unifilar do sistema IEEE-14	84
5.20. Diagrama Elétrico e Geográfico para a rede de 5 barras	85
5.21. Cálculo do contorno por quadrante	87
5.22. Região de influência de uma barra	87
5.23. Diagramas de contorno elétrico para a rede de 5 barras	88
5.24. Diagramas de contorno elétrico para a rede IEEE-14	89

5.25. Diagrama de contorno geográfico	90
5.26. Projeção da coordenada z	91
5.27. Perfil tridimensional para elementos com dimensão de 2 pixels, rede de 5 barras	92
5.28. Perfil tridimensional para elementos com dimensão de 5 e de 15 pixels para a rede de 5 barras	92
5.29. Perfil tridimensional para elementos com dimensão de 2 pixels para o sistema IEEE-14	93
5.30. Perfil tridimensional geográfico para elementos com dimensão de 2 pixels para o sistema de 5 barras	94
5.31. Estado da Rede IEEE-14	97
5.32. Perfil Tridimensional ajustado para a rede IEEE-14	98
5.33. Perfil Tridimensional Geográfico ajustado para a rede de 5 barras	99
5.34. Perfil suave para a rede IEEE-14	100
5.35. Tensão reduzida em 3 barras	101
5.36. Interação entre Objetos	102
5.37. Processamento principal da interface	103
5.38. Processamento do canal auxiliar	104
5.39. Impressão em buffer duplo	105
5.40. Visualização de caso estático	107
5.41. Visualização de dados históricos	108
5.42. Visualização através de escrita de arquivos	109
5.43. Visualização através de comunicação de processos	109
5.44. Aplicativo servidor da interface	110
5.45. Aplicativo do usuário via operação com arquivo	110
5.46. Aplicativo do usuário via comunicação entre processos	111
5.47. Caixas de Informação	120
5.48. Exemplo de janela para alarmes e eventos	120
5.49. Menu e caixa de ajuda	121

5.50. Aplicação de Fluxo de Carga via arquivo	122
5.51. Aplicação de estimação de estado via comunicação entre processos	122
B.1. Representação de Classes	139
B.2. Diagramas de Instâncias	139
B.3. Representação de Associações	140
B.4. Atributos de Associações	140

Lista de Tabelas

2.1. Dados envolvidos com o Configurador da Rede Elétrica	18
2.2. Dados envolvidos com o Observador da Rede Elétrica	19
2.3. Dados envolvidos com o Estimador de Estado	20
2.4. Dados envolvidos com a função de Equivalente Externo	22
2.5. Dados envolvidos com a função de Previsão da Carga	22
2.6. Dados envolvidos com o Fluxo de Potência On-Line	23
2.7. Dados envolvidos com o Fluxo de Potência Ótimo	24
2.8. Classificação dos Níveis de Segurança	25
2.9. Dados envolvidos no Gerenciamento da Segurança	26
5.1. Valores base para Escala de cores	72
5.2. Valores base para Escala de tons de cinza	74
5.3. Configuração padrão da fonte	75
5.4. Configuração dos Ambientes Computacionais de Desenvolvimento	121
5.5. Requisição de Espaço de Armazenamento	123
5.6. Taxa de frames por segundo, rede IEEE-14	123
5.7. Atualização da Base de Dados	124
5.8. Gerenciamento de múltiplas janelas	124
5.9. Transferência de informação	125
5.10. Atualização da Base de Dados para comunicação entre processos	125
5.11. Número de componentes do diagrama unifilar	126
5.12. Dimensão das malhas e tempo de exibição por quadro	126

A.1. Dados das barras do sistema IEEE-14	133
A.2. Dados das linhas do sistema IEEE-14	134
A.3. Dados das barras da rede de 5 barras	134
A.4. Dados das linhas da rede de 5 barras	135

Capítulo 1

Introdução

Nas décadas de 1960 e 1970, os investimentos em pesquisa de ferramentas computacionais para o controle de sistemas de energia elétrica concentraram-se na implementação e desenvolvimento de algoritmos e métodos, principalmente no tocante à eficiência dos métodos matemáticos necessários para resolução dos problemas para a análise e a operação de redes elétricas. Isto ocorreu em virtude das limitações impostas pelas máquinas disponíveis na época, com relação à velocidade, capacidade de armazenamento, memória e recursos gráficos.

A solução encontrada inicialmente para o problema foi o desenvolvimento de sistemas dedicados, com a propriedade de explorar ao máximo os recursos disponíveis das máquinas, com o menor custo possível. Este fator, aliado à ausência de padronização das arquiteturas computacionais da época, contribuiu para que os sistemas de supervisão e controle desenvolvidos até a década de 80 fossem profundamente dependentes de hardware, software e sistema operacional específico em cada empresa.

Com o passar do tempo, as pressões do mercado fizeram com que os fornecedores dos sistemas computacionais descontinuassem a sua produção anterior em detrimento de arquiteturas padronizadas. Consequentemente, os custos associados à manutenção do hardware e software específicos dos centros de controle tornaram-se extremamente elevados, enquanto, simultaneamente, diminuía a possibilidade de atualização, expansão e

adaptabilidade dos mesmos, tornando-os rapidamente obsoletos. Estes problemas comprometeram a capacidade dos centros de controle de acompanharem a expansão da rede de energia elétrica e de adaptarem-se às exigências de mercado rapidamente.

Assim, em função destas necessidades, o desenvolvimento dos recursos computacionais após os anos 80, com o aumento de eficiência, velocidade e capacidade de memória, permitiu às empresas concessionárias de energia elétrica o incremento de seus centros de controle de operação, empregando novos computadores e novos conceitos de processamento, tais como: a integração dos processos administrativos, produtivos e dos sistemas de informações, baixo custo dos equipamentos utilizados, capacidade relativamente elevada de processamento de dados, distribuição do processamento em todos os níveis e funções e principalmente o emprego de arquitetura computacional aberta. Em especial, os sistemas mais novos desenvolvidos segundo o conceito de sistemas abertos apresentam características como:

- a) **Modularidade:** implementação de divisões bem definidas quanto às características e escopo de atuação de cada função do centro de controle, proporcionando uma independência entre os algoritmos que possibilita a inclusão ou exclusão de rotinas e aplicativos sem interferência no funcionamento dos demais componentes do sistema de supervisão e controle.
- b) **Expansibilidade:** através desta característica, os aplicativos permitem o aumento da sua capacidade de processamento, por meio de reconfigurações automáticas ou manuais sem a necessidade de recompilação dos algoritmos.
- c) **Portabilidade:** neste caso, os algoritmos são escritos para que os aplicativos resultantes operem sem alterações independentemente da plataforma computacional (hardware ou sistema operacional) em que são executados.

- d) **Interconectividade:** os protocolos de comunicação e mecanismos de troca de informação implementados devem permitir que diferentes plataformas computacionais possam atuar juntas durante o processamento dos aplicativos.

Esta modernização, que abrange o aumento da capacidade de análise em tempo real do centro de controle, torna-se viável através da inclusão das funções de análise de rede, de um ambiente computacional adequado e de interfaces gráficas, que proporcionam ao operador do sistema uma idéia mais geral, precisa e imediata do atual estado da rede de energia.

O objetivo desta dissertação é o de estudar os métodos e requisitos necessários para realizar a implementação de interfaces gráficas no ambiente de centros de controle de energia elétrica, que possibilitem a visualização, através de animações gráficas e figuras tridimensionais, do estado do sistema de energia supervisionado em tempo real e dos dados obtidos junto às funções de análise de rede, tais como Estimador de Estado, Fluxo de Carga, Análise de Segurança, etc.

Com o auxílio de interfaces gráficas mais sofisticadas, o operador do sistema pode atuar mais eficientemente quando da ocorrência de contingências e violações de limites operacionais. Analogamente, os estudos realizados sobre o modelo do sistema, como o planejamento da expansão, análise de contingências, despacho da geração, dentre outros, são altamente facilitados. Por fim, pode-se citar, ainda, que estas interfaces permitem uma visualização mais imediata, e portanto eficiente, do estado global da rede de energia elétrica.

Neste trabalho, o capítulo 2 trata do funcionamento de centros de controle de energia elétrica atuais, descrevendo o sistema de aquisição de dados (SCADA) e o subsistema de análise de redes e apoio, que é composto por um conjunto de funções de análise de rede, com um enfoque sobre as características do fluxo dos dados envolvidos com as funções de análise de rede.

O capítulo 3 descreve as características gerais e o funcionamento de interfaces gráficas de usuário, demonstrando técnicas e metodologias para a sua construção. Em seguida, são abordadas as vantagens da aplicação de conceitos de programação orientada a

objetos (OOP) na construção da interface de usuário. Finalmente, são descritos a forma de implementação e os problemas pertinentes à instalação de interfaces de usuário em um centro de controle.

O capítulo 4 expõe as técnicas de representação gráfica e visualização estudadas, aplicando-as ao ambiente de sistemas de energia elétrica e realizando algumas considerações sobre princípios de visualização científica com aplicação ao problema de visualização da rede de energia em centros de controle. São discutidas também as diferentes formas de representação dos aspectos da rede de energia elétrica, dados por seus componentes, equipamentos e variáveis de estado.

O capítulo 5 apresenta os resultados práticos quanto aos aspectos da implementação da interface gráfica e os testes realizados para avaliar o seu desempenho.

Finalmente, o capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas neste trabalho, bem como as sugestões para desenvolvimentos futuros nesta área.

Capítulo 2

Análise do Fluxo de Dados em Centros de Controle de Sistemas de Energia Elétrica

2.1. Introdução

A compreensão da maneira pela qual os dados fluem em um centro de controle, em especial aqueles envolvidos no sistema SCADA e com as funções de análise de rede, é de grande importância para a implementação eficiente de dispositivos de visualização do estado e características de uma rede elétrica supervisionada.

Neste capítulo, é descrita inicialmente a arquitetura geral de um centro de controle, abordando os seus aspectos computacionais com relação às etapas de coleta de informações junto à rede elétrica, tratamento e armazenamento destes dados no sistema do centro de controle e processamentos preliminares realizados pelo SCADA.

A seguir, são analisados a formatação e os detalhes da informação envolvida nas funções de análise de rede, tratando-se especialmente da estrutura de troca de dados e tendo-se em vista as principais características de cada FAR.

Finalmente, são abordados os principais aspectos da implementação de interfaces homem-máquina no ambiente de centros de controle de energia, discutindo-se suas características básicas e problemas atuais concernentes à sua utilização.

2.2. Arquitetura Geral de Centros de Controle de Energia Elétrica

A importância dos centros de controle de energia deve-se à necessidade de coordenar adequadamente a operação do sistema, na tentativa de reduzir-se ao mínimo a ocorrência de problemas no suprimento de energia, bem como otimizar a geração. Deve-se considerar, ainda, o porte elevado dos investimentos na área de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, o que justifica as operações de supervisão como um fator de prevenção de gastos desnecessários com substituição e manutenção de equipamentos da rede.

Para tanto, é necessário o emprego de configurações e aplicativos em tempo real que atendam adequadamente a demanda computacional requisitada pelo sistema de aquisição de dados, processamento da informação, visualização e controle. A arquitetura principal de um centro de controle moderno possui um sistema de coleta de dados conhecido como “Supervisory Control and Data Acquisition” (SCADA). O SCADA é responsável pela aquisição de informações junto a estações remotas posicionadas ao longo da rede elétrica e também por modificar a estrutura da rede de maneira remota.

Estas estações remotas, chamadas de Unidades Terminais Remotas (UTRs), monitoram variáveis da rede elétrica tais como o estado das chaves do sistema, taps de transformadores, magnitude de tensões e fluxos de potência nas linhas de transmissão de energia elétrica, através de varreduras periódicas. As informações obtidas através das UTRs são transmitidas para uma Central de Coleta de Dados, e então enviadas para um Sistema Gerenciador de Banco de Dados (DBS, “Data Base System”), cuja finalidade é a de manter um banco de informações constantemente atualizado com os dados provenientes do SCADA. O DBS deve ainda permitir a recuperação destas informações de acordo com as solicitações de outras funções do centro de controle de energia elétrica. Finalmente, os dados do DBS são enviados para interfaces de visualização (painéis, gráficos on-line) e

para interfaces homem-máquina (telas gráficas, consoles, dispositivos de alerta luminosos e sonoros, etc.). A figura 2.1 exemplifica a arquitetura computacional principal de um centro de controle de energia elétrica descrita anteriormente.

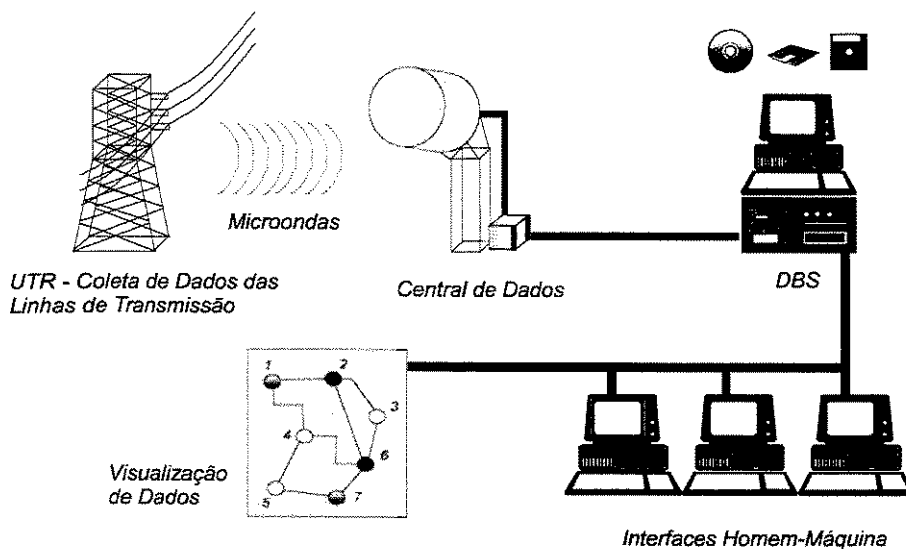


Figura 2.1: Visualização de Dados em um Centro de Controle de Energia

O centro de controle possui, também, um Subsistema de Análise de Rede e Apoio, composto por uma série de programas de execução on-line, cujo objetivo é operar a rede elétrica de maneira econômica e garantir a sua segurança. Os programas do Subsistema de Análise de Rede e Apoio desempenham funções de modelagem da rede elétrica em tempo real, análise de desempenho da rede e síntese de ações de controle a serem sugeridas aos operadores do centro de controle.

2.3. Aquisição de Dados

A aquisição de dados na supervisão de um sistema de energia é feita através de Unidades Terminais Remotas (UTRs), posicionadas estrategicamente na rede. Apesar de existirem algoritmos para realizar este posicionamento de maneira ótima [29], a localização

dessas UTRs é feita utilizando-se critérios práticos como, por exemplo, considerando a importância relativa das subestações.

Estas UTRs coletam dados do sistema de energia, que são enviados constantemente para o SCADA, por intermédio de uma central de coleta de dados, em determinados intervalos de tempo através de um meio de comunicação confiável. Na Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), por exemplo, utiliza-se comunicação via microondas. Os dados são transmitidos para a estação de coleta de dados em resposta a uma requisição da mesma. Esta resposta pode dar-se de duas maneiras [19]:

- a) Atualizar todo o conjunto de dados monitorado pela UTR;
- b) Atualizar apenas o conjunto de dados onde tenham ocorrido mudanças (“report by exception”). Esta opção tem a vantagem de reduzir o “overhead” no processamento da estação de coleta de dados, além de diminuir a média de carregamento nos circuitos de comunicação. Deve-se, entretanto, prever uma largura de faixa suficiente no canal de comunicação para comportar a situação mais crítica, onde um grande número de variáveis medidas muda rapidamente em situações onde a demanda por precisão e “timing” dos dados é importante.

Os dados coletados por estas unidades em subestações são:

- Magnitude de tensão nas barras do sistema;
- Fluxo de potência ativa e reativa e valor eficaz de corrente nas linhas do sistema;
- Estado de dispositivos de chaveamento (chaves e disjuntores);
- Posição de tap de transformadores com regulação;
- Injeção de potência ativa e reativa nas barras do sistema;
- Estado de dispositivos de proteção da rede e equipamentos, como relés e alarmes;
- Seqüência de eventos;

E os dados coletados por estas unidades em usinas geradoras são:

- Geração de potência ativa e reativa;
- Potências ativa e reativa auxiliares;
- Consumo em MWh;
- Geração máxima e limites de controle;
- Informação de Desempenho;
- Posição e limites da comporta, e níveis do reservatório, em hidrelétricas;

Estes dados, entretanto, para a maioria das aplicações práticas, são codificados de forma serial, “half-duplex”. A conversão dos mesmos em unidades de engenharia pode se dar tanto na própria UTR quanto na central de coleta de dados. O sistema de aquisição utiliza o esquema DA/TDMA (Demand Assignment / Time Division Multiple Access), onde a estação central de coleta de dados controla toda a atividade e as UTRs respondem apenas a requisições [19].

2.4. O SCADA

Após serem enviados pelas UTRs, os dados colhidos a partir da supervisão do sistema são coletados e enviados ao SCADA. Estes dados podem chegar previamente convertidos em unidades de engenharia ou não, e então são tratados pelo SCADA segundo os seguintes passos [19].

- a) **Filtragem dos dados coletados:** conversão de dados coletados em unidades de engenharia e realização de testes de consistência, levando-se em conta os limites físicos da rede de energia e cálculo de grandezas derivadas das monitoradas (como, por exemplo, o cálculo da potência complexa em equipamentos através de suas componentes ativa e reativa).

- b) **Disponibilização dos dados para o operador:** Estes dados são informações em tempo real, ainda não processadas pelo Subsistema de Análise de Redes e Apoio, e podem ser visualizados pelo operador através de interfaces homem-máquina.
- c) **Processamento do Controle Supervisório:** este é o processo de atuar remotamente nos dispositivos do sistema. Inclui a seleção do equipamento a ser controlado e execução do comando. Não envolve diretamente os dados do sistema de coleta, mas as conseqüências da atuação podem alterar os dados medidos e armazenados.
- d) **Processamento de Alarmes e Seqüência de Eventos** (processo implementado na CPFL): Alerta aos operadores a ocorrência de eventos não programados, juntamente com informações acerca da hora ocorrida, local, equipamentos acionados e natureza geral do evento. A seqüência na qual os eventos não programados acontecem é então registrada e armazenada.
- e) **Armazenamento de informações e geração de relatórios:** A manutenção de registros no SCADA é feita através de um Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD), que guarda e atualiza as informações pertinentes ao sistema em intervalos pré-definidos. Estas informações são utilizadas para a geração de relatórios, cujo formato e conteúdo podem ser adaptados para satisfazer os diferentes tipos de usuários encontrados em uma empresa concessionária de energia elétrica.

2.5. O Subsistema de Análise de Rede e Apoio

Aos Centros de Controle modernos foi incorporado um conjunto de aplicativos, denominados funções avançadas de análise de rede, operando em tempo real. Estas funções são capazes de determinar com maior precisão o estado real da rede de energia elétrica e fornecer bases mais concretas para a operação do sistema. Esta modernização possibilita uma melhoria da qualidade dos processos associados à operação do sistema on-line e à pré

e pós-operação. Isto acarreta um aumento da confiabilidade do sistema de fornecimento de energia, elevando a sua qualidade e sua segurança operacional. Além disto, pode-se realizar com maior precisão a análise de contingências na rede, obtendo resultados confiáveis mais rapidamente. Analogamente, as estruturas de planejamento da expansão e proteção também são amplamente beneficiadas com esta modernização.

Deve-se salientar que estas funções podem tanto ser executadas em tempo real, com o objetivo de monitorar o estado do sistema e determinar o nível de segurança da rede, quanto através de requisição dos operadores, com o objetivo de efetuar estudos acerca do sistema, tais como simulação de contingências ou estudos sobre a operação do sistema. As funções de Análise de Rede, assim como os recursos computacionais empregados para a sua execução, constituem o Subsistema de Análise de Rede e Apoio, que é alimentado pelos dados da Arquitetura Computacional Principal a partir de uma estação conectada entre ambos, desempenhando o papel de “Gateway” entre os sistemas. O Subsistema de Análise de Rede e Apoio é disponibilizado aos operadores através de um conjunto de estações computacionais, que constituem parte das interfaces homem-máquina descritas anteriormente.

As FARs mais comumente implementadas em um típico centro de controle de energia elétrica (que serão descritas com mais detalhes posteriormente) são o configurador da rede, o analisador de observabilidade, o estimador de estado, o cálculo do fluxo de potência on-line, a função de análise de segurança estática, determinação do equivalente externo e o fluxo de potência ótimo. A figura 2.2 ilustra os componentes do Subsistema de Análise de Rede e Apoio.

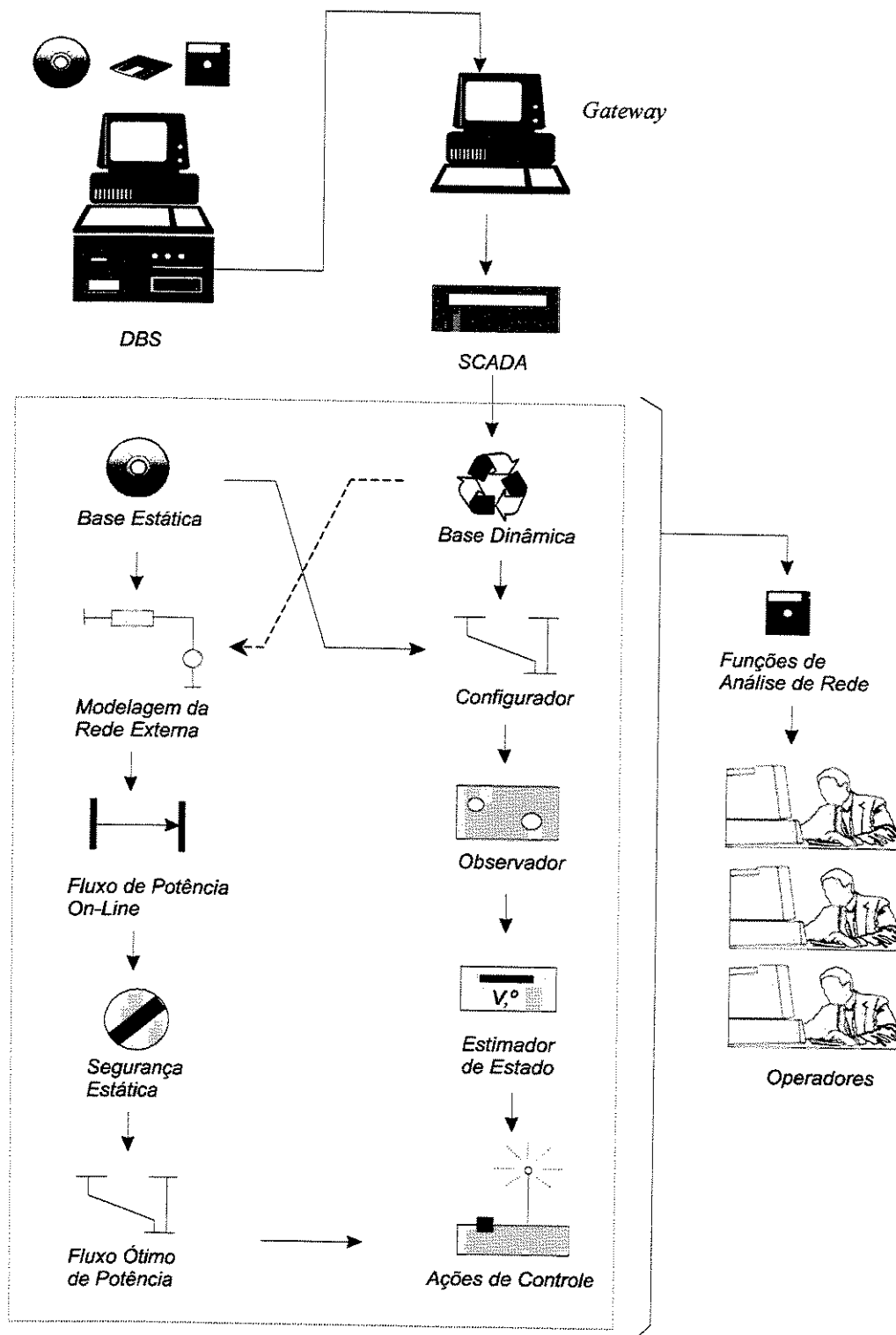


Figura 2.2: Subsistema de Análise de Rede e Apoio

2.6. Bancos de Dados:

Do ponto de vista do SCADA e das funções de análise de rede, será necessária a existência de alguns bancos de dados, controlados pelo SGBD.

Os bancos de dados estáticos são compostos pelas informações necessárias à execução das funções de análise de rede que nunca ou raramente necessitam de atualização, isto é, seus valores permanecem inalterados por longos períodos de tempo ou nunca mudam [19]. Eles podem ser divididos em:

a) **Paramétricos:** Incluem informação acerca de parâmetros da rede ou necessários à interpretação dos dados coletados em tempo real, tais como:

- Parâmetros de linhas de transmissão, transformadores, bancos de reatores ou capacitores;
- Limites máximo e mínimo de equipamentos ou unidades (como geração em usinas hidrelétricas);
- Parâmetros do sistema computacional (como taxas de varredura das UTRs, de atualização dos bancos de dados, etc.).

b) **Dados de Aplicativos:** Referem-se a informações que são pertinentes apenas a aplicativos específicos, e pode conter constantes, limites e mensagens, dentre outros.

Exemplos destes dados são:

- Mensagens de alarme pré-armazenadas;
- Coordenadas geométricas para interfaces gráficas;
- Arquivos de formatação de relatórios.

Os bancos de dados dinâmicos armazenam todas as informações colhidas e atualizadas pelo SCADA através das UTRs, ou dependentes das mesmas. Os seus registros têm uma

taxa de atualização elevada, da ordem do tempo de varredura do sistema. Eles podem ser divididos em:

- a) **Dados em tempo real:** São os dados adquiridos por varredura das UTRs ou dados de entrada dos operadores do sistema.
- b) **Dados calculados:** São dados obtidos a partir de operações realizadas sobre os dados em tempo real e, por conseguinte, são tratados da mesma forma que os mesmos.

2.7. Funções de Análise de Rede

2.7.1. Fluxo de Dados entre as Funções de Análise de Rede

As funções de análise de rede são, de certa forma, independentes quanto à sua ativação, isto é, com o sistema em regime, a execução de uma das rotinas não requer, necessariamente, a ativação imediatamente anterior de qualquer outra. Além disto, elas não realizam, a princípio, qualquer tipo de comunicação direta entre si – comumente apenas se comunicam através das bases de dados, utilizando os bancos de dados estáticos e dinâmicos do sistema para operações de leitura e atualização de informação. Outro fato relevante é que, além de serem executadas periodicamente (em ciclos múltiplos do tempo de varredura do subsistema SCADA), existe a possibilidade de execução requerida pelo operador, para fins de atualização da base de dados ou estudos do sistema.

Embora independentes quanto à sua ativação, as FARs apresentam um certo relacionamento quanto aos dados empregados na sua execução. Por exemplo, pode-se observar que as funções de fluxo de potência e modelagem da rede externa necessitam de um conjunto de dados atualizado, fornecido pela função de estimação de estado, que por sua vez necessita de informações topológicas dadas pelas funções de análise de observabilidade e configuração da rede.

As soluções adotadas para armazenamento e troca de dados nos centros de controle devem, portanto, atender às características de atualização, tempo de acesso e requisição de leitura exigidas pela interdependência de dados entre as FARs. Uma possível representação desta dependência é dada na figura a seguir:

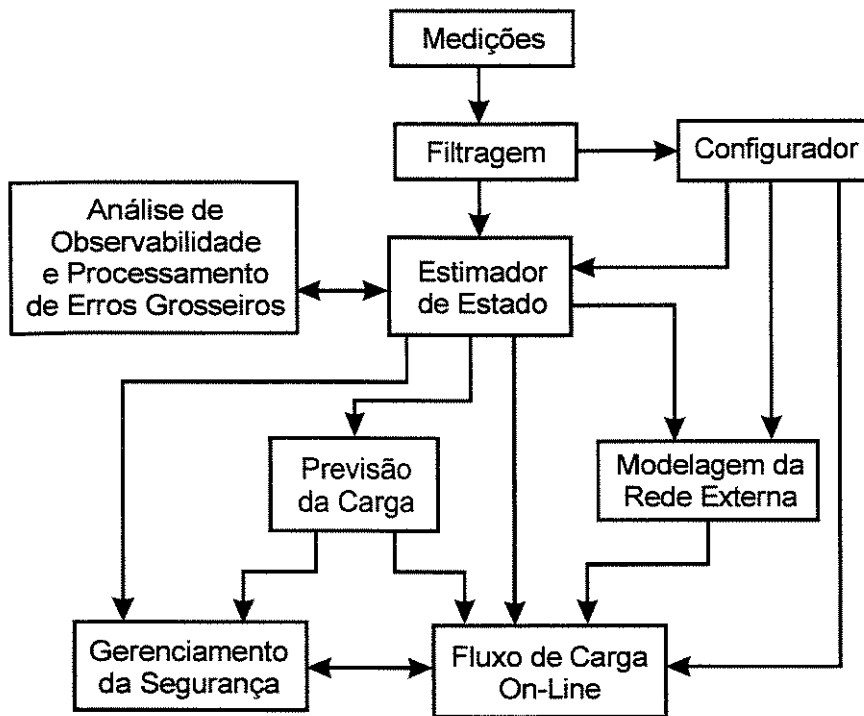


Figura 2.3: Fluxo de Dados entre as Funções de Análise de Rede

2.7.2. Classificação das Funções de Análise de Rede

As funções de Análise de Rede podem ser classificadas em três tipos diferentes, de acordo com o papel que desempenham.

- As funções de modelagem da rede em tempo real têm como objetivo fornecer uma representação atual da rede, de acordo com os dados obtidos a partir do SCADA, incluindo as parcelas não-observáveis do sistema monitorado ou outras regiões de

interesse (tais como equivalentes externos). As funções de estimação de estado, determinação de equivalente externo, configurador da rede e análise de observabilidade se enquadram neste tipo.

- As funções de análise de desempenho da rede são alimentadas por dados provenientes das funções do tipo anterior e consistem em rotinas para a determinação do fluxo de potência e análise de contingências.
- As funções de síntese das ações de controle devem sugerir ao operador do sistema as melhores ações a serem tomadas para levar o mesmo a um ponto de operação que atenda a requisitos pré-determinados, tais como fluxo de potência ótimo ou análise de segurança.

2.8. Descrição das Funções de Análise de Rede

As funções de análise de rede, dadas anteriormente como componentes do subsistema de análise de rede e apoio são resumidas a seguir, além das características e transformações pertinentes ao fluxo de dados entre as mesmas.

2.8.1. Configurador da Rede

O Configurador da Rede é responsável por determinar a topologia do sistema elétrico no instante da amostragem de dados realizada pelo SCADA, fornecendo um modelo de nós da rede e suas interligações a partir da base de dados estática e dos dados obtidos on-line. Como as informações preparadas pelo Configurador são utilizadas por outras FARs, é necessária a sua execução durante a inicialização do sistema, no caso de alterações na topologia do mesmo ou de perda de supervisão em alguma parte dele [9, 29].

Entretanto, ativações posteriores do configurador só serão necessárias em caso de alterações na topologia da rede supervisionada, o que pode ocorrer em situações de

manobra de chaves e disjuntores e perda da supervisão através de falhas da comunicação das UTRs com o SCADA. Além disto, esta reativação pode ser realizada apenas com relação à porção do sistema onde ocorreram as mudanças. Finalmente, o configurador deve especificar a correspondência entre as medidas realizadas em tempo real pelo SCADA e o modelo por ele elaborado, para que as demais FARs possam ser executadas.

Essencialmente, pode-se dividir o processo de configuração da rede (ou processamento da topologia) nas seguintes etapas:

1. **Pré-processamento de dados coletados:** Nesta etapa o configurador converte as medidas fornecidas pelo SCADA para as unidades apropriadas e realiza testes de consistência, tais como a verificação de limites operacionais, testes de fluxo nulo em chaves abertas ou de tensão em chaves fechadas.
2. **Processamento da seção de barras:** Nesta fase testa-se a conectividade de um grupo de seção de barras (ou seja, onde pode-se reduzir, no modelo elaborado pelo configurador, um conjunto de barras para uma única barra, dado o estado dos dispositivos de chaveamento).
3. **Análise de conectividade da rede:** Esta análise identifica se as ilhas elétricas estão energizadas, não-energizadas ou aterradas, criando estruturas de dados adequadas, sendo uma etapa essencial para a execução correta do estimador de estado.
4. **Processamento dinâmico da topologia (“Tracking Mode”):** Neste estado, o configurador atualiza a topologia das parcelas da rede afetadas por mudanças no estado dos dispositivos de chaveamento ou falhas na supervisão do SCADA.

Assim, o configurador da rede recebe informações acerca do status de chaves e disjuntores/secção de barras da rede e do estado coletado dos dispositivos de chaveamento. Processando estas informações, ele gera um modelo do tipo barras / ramos que é o modelo

que será utilizado nas funções posteriores [9, 29]. A tabela a seguir explicita os dados de entrada e saída desta função e suas características:

Tabela 2.1: Dados envolvidos com o Configurador da Rede Elétrica

Dado	Categoria	Tipo	Origem / Destino
Status de dispositivos de chaveamento	Entrada	Lógico	SCADA - Banco de Dados Dinâmico
Mapa topológico da rede de energia	Entrada	Caracter, Inteiro	SGBD - Banco de Dados Estático
Grupos de secção de barras	Entrada	Inteiro	SGBD - Banco de Dados Estático
Mapa topológico da rede – modelo barras/ramos	Saída	Caracter, Inteiro	Configurador - Banco de Dados Dinâmico

2.8.2. Observador da Rede

O Observador determina as partes observáveis do sistema (onde é conhecido, ou pode ser determinado, o estado das barras do sistema, ou seja, a magnitude e fase de suas tensões nodais), utilizando as informações obtidas junto ao Configurador e de dados provenientes do SCADA sobre a natureza das medidas realizadas (número, tipo e local de origem).

Uma vez que o arranjo topológico da rede é dinâmico (dado pelas possíveis alterações nos estados dos dispositivos de chaveamento, tais como chaves e disjuntores), assim como as medidas realizadas pelo subsistema SCADA (onde podem ocorrer problemas na supervisão da rede, como falhas na comunicação com UTRs ou ruído no canal de transmissão), é necessária a execução do observador como uma FAR, em tempo real. A importância do Observador de Estado reside no fato de que somente nas partes observáveis será possível a aplicação das rotinas de estimação de estado.

Portanto, o Analisador de Observabilidade determina as ilhas observáveis do sistema e deve ser executado antes do algoritmo de estimação de estado. Ele utiliza o mapa topológico gerado pela função de configuração e as informações acerca dos medidores de fluxo nos ramos e injeções de potência [9, 29]. A tabela a seguir explicita os dados de entrada e saída desta função e suas características:

Tabela 2.2: Dados envolvidos com o Observador da Rede Elétrica

Dado	Categoria	Tipo	Origem / Destino
Mapa topológico da rede – modelo barras/ramos	Entrada	Caracter, Inteiro	Configurador - Banco de Dados Dinâmico
Status de Medidores de fluxo nos ramos da rede	Entrada	Lógico	SCADA - Banco de Dados Dinâmico
Status de Medidores de injeção de potência nas da rede	Entrada	Lógico	SCADA - Banco de Dados Dinâmico
Conjuntos de barras que compõem as ilhas observáveis	Saída	Caracter, Inteiro e Lógico	Observador - Banco de Dados Dinâmico

2.8.3. Estimador de Estado

O Estimador de Estado é responsável pelo cálculo da melhor aproximação do estado da rede (tensão complexa das barras do sistema) em uma ilha observável, utilizando o modelo da rede e informações do SCADA. Esta estimativa é realizada a partir da configuração da rede e de medidas analógicas do sistema, telemedidas e enviadas ao centro de controle em intervalos de tempo periódicos. Os principais componentes deste banco de medidas são:

- Medidas de tensões nas barras;
- Medidas de fluxo de potência ativa e reativa;
- Medidas de injeções de potência ativa e reativa nas barras;
- Ajuste de taps de transformadores.

Se houver redundância suficiente, o estimador realiza ainda a detecção e eliminação de eventuais erros grosseiros que possam estar associados às medidas realizadas. Pode também determinar as grandezas associadas às barras não supervisionadas da rede, oferecendo assim uma maior quantidade de informações ao operador que o SCADA.

Usualmente emprega-se o método dos quadrados mínimos ponderados (QMP) para a realização da estimativa de estado. As tensões complexas assim calculadas apresentam maior confiabilidade, uma vez que se leva em conta a matriz de pesos, formada em função

das características de variância do conjunto de medidas enviados pelas UTRs. Desta maneira, é necessária uma certa redundância no conjunto de medidas, bem como o fato de serem provenientes de localizações adequadamente distribuídas dentro da topologia do sistema para preservar as propriedades estatísticas da medição.

Desta maneira, o estimador de estado utiliza informação acerca da topologia da rede proveniente do configurador, os conjuntos de ilhas observáveis do analisador de observabilidade e os dados telemedidos do subsistema SCADA. Ele determina, então, através de estimação por quadrados mínimos [9, 29], o estado que minimiza uma função de erro, aproximando-se o máximo possível do estado verdadeiro desconhecido. Nesta etapa, também é efetuada a detecção de erros grosseiros nas medidas realizadas. A tabela a seguir explicita os dados de entrada e saída desta função e suas características:

Tabela 2.3: Dados envolvidos com o Estimador de Estado

Dado	Categoria	Tipo	Origem / Destino
Mapa topológico da rede – modelo barras/ramos	Entrada	Caracter, Inteiro	Configurador - Banco de Dados Dinâmico
Conjuntos de barras que compõem as ilhas observáveis	Entrada	Caracter, Inteiro e Lógico	Observador - Banco de Dados Dinâmico
Medidas de fluxo nos ramos da rede	Entrada	Real	SCADA - Banco de Dados Dinâmico
Medidas de Injeção de potência ativa e reativa nas barras da rede	Entrada	Real	SCADA - Banco de Dados Dinâmico
Medidas de Magnitude e Ângulo de tensão nas barras	Entrada	Real	SCADA - Banco de Dados Dinâmico
Informações dos modelos que relacionam medidas e estado	Entrada	Real, Inteiro	SGBD - Banco de Dados Estático
Estado Estimado – Magnitudes e Ângulos de tensões nodais, injeções de Potência e fluxo nos ramos.	Saída	Real	Estimador - Banco de Dados Dinâmico

2.8.4. Determinação do Equivalente Externo

Em virtude da interligação de diferentes sistemas de energia elétrica e da existência de regiões não-observáveis do sistema, torna-se necessária a determinação de equivalentes

para as redes externas e para as ilhas não-observáveis do sistema. Isto é obtido por uma função de Modelagem da Rede Externa, utilizando a base de dados estática e informações do SCADA.

Uma vez que diversas funções do Subsistema de Análise de Redes e Apoio são afetadas pelas alterações provocadas pelo comportamento dos sistemas externos nas interligações (como, por exemplo, o fluxo de carga), a função de determinação do equivalente externo deve também ser executada como uma FAR em tempo real.

Existem diferentes métodos para o cálculo de equivalentes externos. Um método que tem encontrado ampla utilização é o Equivalente de Ward Estendido, que é obtido em três etapas:

1. Determinam-se as admitâncias equivalentes da rede externa conectadas entre as barras de interligação, através de redução topológica baseado nos valores nominais dos parâmetros das linhas do sistema externo (com sua matriz admitância nodal) e em métodos de redução baseados em técnicas de vetores esparsos.
2. Determinação dos equivalentes da geração e suporte de reativos da rede externa, através da inclusão de barras do tipo P-V e interligações fictícias nas barras de fronteira.
3. Calculam-se as injeções equivalentes nas barras de interligação, novamente aplicando-se redução topológica e técnicas de vetores esparsos.

Em resumo, esta função determina o modelo da rede externa ao sistema supervisionado. Pode-se utilizar métodos para determinar o modelo externo, reduzindo a rede através de métodos de *equivalente externo*, como Ward, ou de *solução externa* [9, 29]. A saída desta função é o modelo combinado dos sistemas interno e externo que será utilizada posteriormente em outras FARs, como a análise de contingências. A tabela a seguir explicita os dados de entrada e saída desta função e suas características:

Tabela 2.4: Dados envolvidos com a função de Equivalente Externo

Dado	Categoria	Tipo	Origem / Destino
Medidas de porção da rede externa (apenas nos métodos de <i>solução externa</i>).	Entrada	Real, Lógico	SCADA Externo - Banco de Dados Dinâmico de outro Centro de Controle
Parâmetros da rede externa	Entrada	Real, Inteiro	SGDB - Banco de Dados Estático
Mapa topológico da rede – modelo barras/ramos	Entrada	Caracter, Inteiro	Configurador - Banco de Dados Dinâmico
Estado Estimado – Magnitudes e Ângulos de tensões nodais, injeções de Potência e fluxo nos ramos.	Entrada	Real	Estimador - Banco de Dados Dinâmico
Modelo da Rede Externa.	Saída	Real, Inteiro, Caracter	Modelagem da Rede Externa - Banco de Dados Dinâmico

2.8.5. Previsão da Carga:

Uma vez que a função Estimador é executada periodicamente, pode-se construir um histórico acerca das medições de carga e utilizar as mesmas para prever o carregamento do sistema, explorando os dados armazenados. Esta previsão é utilizada, dentre outros, na análise de segurança do sistema e para construir pseudo-medidas em barras não observáveis [9, 20]. A tabela a seguir explicita os dados de entrada e saída desta função e suas características:

Tabela 2.5: Dados envolvidos com a função de Previsão da Carga

Dado	Categoria	Tipo	Origem / Destino
Estado Estimado – Injeções de Potência nas barras PQ.	Entrada	Real	Estimador - Banco de Dados Dinâmico
Previsão – Injeções de Potência nas barras PQ.	Saída	Real	Previsão da Carga - Banco de Dados Dinâmico

2.8.6. Fluxo de Potência On-line

O Fluxo de Potência On-Line é uma ferramenta utilizada para análise do sistema de potência em regime permanente, utilizando-se do modelo da rede obtido nas funções anteriores e fornecendo informações completas sobre o estado do sistema, tais como tensões complexas e distribuição dos fluxos de potência [28, 29].

Esta função necessita da resolução de um sistema de equações de fluxo de carga não linear, que é realizada através do método de Newton e suas variações (desacoplado e desacoplado-rápido), empregando um método numérico iterativo, com critério de parada dado por uma tolerância pré-estabelecida ou por um número limite de iterações. Em especial, o método desacoplado-rápido, dada a sua maior simplicidade de implementação e qualidade dos resultados obtidos, é o preferencialmente escolhido para aplicações on-line, como o caso de centros de controle de energia.

A tabela a seguir explicita os dados de entrada e saída desta função e suas características:

Tabela 2.6: Dados envolvidos com o Fluxo de Potência On-Line

Dado	Categoria	Tipo	Origem / Destino
Estado Estimado	Entrada	Real	Estimador - Banco de Dados Dinâmico
Mapa topológico da rede – modelo barras/ramos	Entrada	Caracter, Inteiro	Configurador – Banco de Dados Dinâmico
Parâmetros do sistema	Entrada	Real, Inteiro	SGDB - Banco de Dados Estático
Distribuição de potência na rede	Saída	Real	Fluxo de Potência On Line - Banco de Dados Dinâmico

2.8.7. Fluxo de Potência Ótimo

Esta função é responsável pela determinação do ponto de operação ótimo do sistema para uma dada condição de carga estática. Para isto, empregam-se algoritmos de otimização sobre uma determinada função objetivo (minimização do custo de operação e perdas na transmissão, mínimo desvio de um ponto de operação, etc.) e um conjunto de restrições. O

resultado obtido determina ações de controle a serem efetuadas para levar o sistema ao ponto de operação desejado, automaticamente ou não.

Uma extensão desta função é o fluxo de potência ótimo com restrições de segurança (FPORS), que envolve otimização de um problema de grande porte, o que leva a um grande esforço computacional. Isto dificulta a implementação do FPORS como uma função de análise de rede em tempo real. A tabela a seguir explicita os dados de entrada e saída desta função e suas características:

Tabela 2.7: Dados envolvidos com o Fluxo de Potência Ótimo

Dado	Categoria	Tipo	Origem / Destino
Estado Estimado	Entrada	Real	Estimador - Banco de Dados Dinâmico
Mapa topológico da rede – modelo barras/ramos	Entrada	Caracter, Inteiro	Configurador – Banco de Dados Dinâmico
Parâmetros do sistema	Entrada	Real, Inteiro	SGDB - Banco de Dados Estático
Conjunto de restrições	Entrada	Real, Inteiro	SGDB - Bancos de Dados Estático e Dinâmico
Distribuição de potência na rede	Saída	Real	Fluxo de Potência Ótimo - Banco de Dados Dinâmico

2.8.8. Gerenciamento de Segurança

Esta função é responsável pela avaliação do estado de operação do sistema, determinando se o mesmo opera em um estado seguro; caso contrário, sugere alterações que possam levar o sistema a um ponto de operação seguro. Ela se utiliza das funções de Estimção de Estado e Modelagem da Rede Externa para obter o modelo da rede no qual é realizado o estudo de segurança. Esta função pode ser subdividida em:

- a) O monitoramento de segurança (identificando o estado atual do sistema e realizando a verificação de limites).

- b) A análise de segurança (avaliando se o estado do sistema é seguro ou não, com respeito a um conjunto de contingências).
- c) O melhoramento de segurança (determinando ações preventivas para levar o sistema a um ponto seguro de operação).

A segurança do sistema pode ser classificada em seis diferentes níveis, de acordo com a tabela a seguir, extraída da referência [29]:

Tabela 2.8: Classificação dos Níveis de Segurança

Nível de Segurança	Características
Nível 01	Todas as cargas são supridas e não existe violação de limites de operação; Se ocorrer alguma contingência, não haverá perda de carga.
Nível 02	Todas as cargas são supridas e não existe violação de limites de operação; Se ocorrer alguma contingência, não haverá perda de carga, desde que sejam tomadas ações de controle.
Nível 03	Todas as cargas são supridas e não existe violação de limites de operação; Se ocorrer alguma contingência, poderá haver perda de carga, mesmo que sejam tomadas ações de controle.
Nível 04	Todas as cargas são supridas, mas existe violação de limites de operação e esta situação poderá ser corrigida através de ações de controle sem perda de carga.
Nível 05	Todas as cargas são supridas, mas existe violação de limites de operação e esta situação não poderá ser corrigida através de ações de controle sem perda de carga.
Nível 06	Nenhum limite de operação é violado, mas ocorreu perda da carga.

Assim, esta função é executada em tempo real em dois estágios: no primeiro, é determinado o nível de segurança do sistema atual, para detectar violações e determinar controle imediato; e no segundo, o modelo do sistema é submetido ao processo de análise

de contingências [29, 35]. A tabela a seguir explicita os dados de entrada e saída desta função e suas características:

Tabela 2.9: Dados envolvidos no Gerenciamento da Segurança

Dado	Categoria	Tipo	Origem / Destino
Previsão de Geração	Entrada	Real	SGBD - Banco de Dados Dinâmico
Previsão de Carga – Injeções de Potência nas barras PQ	Entrada	Real	Função de Previsão de Carga - Banco de Dados Dinâmico
Modelagem da rede externa	Entrada	Real, Inteiro	Função de Modelagem da Rede Externa - Banco de Dados Dinâmico
Parâmetros da rede interna	Entrada	Real, Inteiro	SGDB - Banco de Dados Estático
Mapa topológico da rede – modelo barras/ramos	Entrada	Caracter, Inteiro	Configurador - Banco de Dados Dinâmico
Estado Estimado – Magnitudes e Ângulos de tensões nodais, injeções de Potência e fluxo nos ramos.	Entrada	Real	Estimador - Banco de Dados Dinâmico
Características do estado de segurança do sistema e sugestão de ações de controle.	Saída	Real, Inteiro, Caracter, Gráfico	Análise de Segurança - Banco de Dados Dinâmico

Capítulo 3

Construção da Interface de Usuário

3.1. Interfaces de Usuário

3.1.1. Características Gerais de Interfaces de Usuário

O objetivo da implementação de uma interface gráfica em um sistema computacional é o de promover uma forma efetiva de comunicação com o usuário. Uma interface gráfica de usuário (GUI – Graphical User Interface) pode ser considerada boa quando torna fácil, para os usuários, a extração de informação da máquina e, para o computador, a requisição de dados dos usuários e a apresentação de informação reconhecível para os mesmos. Pode-se dizer que um bom projeto de interface leva em consideração as seguintes características [17]:

- a) **Clareza visual:** uma interface limpa ajuda a prevenir erros dos usuários, facilitando o processo de aprendizagem e uso do operador e salientando, de maneira óbvia, informações importantes. Neste aspecto, devem ser levados em conta conceitos como similaridade (que estabelece que dois estímulos visuais com propriedades comuns parecem estar representados juntos), proximidade

(que estabelece que dois estímulos visuais que estão próximos na tela parecem estar representados juntos), contorno (que estabelece que um conjunto de estímulos visuais que contorna uma área, total ou parcialmente, estabelece no usuário a sensação da existência e representação desta área) e continuidade (que estabelece que um conjunto de estímulos visuais representados graficamente em seqüência segundo uma trajetória provoca no usuário a sensação da existência e representação desta trajetória como uma linha), extraídos da psicologia Gestalt [22].

- b) **Consistência:** um sistema pode ser dito consistente quando o modelo conceitual, sua funcionalidade e sequenciamento de ações são uniformes e seguem um conjunto definido de regras, possibilitando a generalização do conhecimento obtido e empregado em aspecto do sistema para outros aspectos. Em outras palavras, uma interface consistente permite aos usuários aplicar conhecimentos previamente adquiridos no uso do software a novas tarefas e ações desconhecidas. As aplicações devem ser consistentes tanto no aspecto interno (isto é, na implementação visual de seus próprios componentes) quanto no externo (relativo aos aspectos concernentes ao ambiente de implementação, como o modo de janelas do sistema operacional).
- c) **Simplicidade:** interfaces devem ser fáceis de se aprender e de se utilizar, estabelecendo um compromisso entre a funcionalidade e um "design" simples.
- d) **Controlada pelo usuário:** todas as ações e interações devem ser iniciadas e controladas pelo usuário. Assim, as interfaces devem fornecer ao usuário a sensação de que estão no comando das atividades no computador, e para tanto, devem permitir a visualização da relação de causa e efeito entre as ações que o mesmo executa e os objetos na tela.

- e) **Minimização da possibilidade de erros:** os mecanismos de controle e ação fornecidos ao usuário não devem permitir que sejam tomadas ações ilegais, nocivas ou contrárias no que concerne aos objetivos das tarefas executadas. O software da interface deve desabilitar tais opções de comando, que dependem tanto do contexto quanto da natureza da tarefa em andamento.
- f) **Recuperação de erros:** as interfaces devem prover mecanismos para a recuperação de erros e reversibilidade de ações executadas pelo usuário. Esta característica pode ser implementada em nível simples (reversibilidade apenas da última ação) ou múltiplo (reversibilidade das n-últimas ações).
- g) **Fornecimento de “feedback”:** o usuário deve ser mantido informado acerca das operações do software, através de mecanismos de “feedback” apropriados para cada tarefa específica.
- h) **Estética:** O ambiente de trabalho do usuário deve ser agradável e que contribua para a compreensão da informação apresentada na tela, uma vez que todos os elementos gráficos competem potencialmente pela atenção do operador.

3.1.2. Metodologia de Projeto de Interfaces de Usuário

Foley [17] define os passos seguintes como uma possível metodologia de projeto de interfaces gráficas de usuário:

- a) **Definir claramente os objetivos da interface gráfica:** os requisitos exigidos do software não devem ser pobres para que o projeto não se torne ineficaz. Estes requisitos podem ser extraídos do estudo detalhado das características e dos métodos de resolução do problema ao qual a interface será aplicada. Outra possibilidade, é o aprendizado, por parte do projetista, acerca da natureza das tarefas executadas em questão.

- b) **Determinar as características do operador:** devem ser determinadas preliminarmente características sobre campo de atuação, nível de conhecimento, habilidades, familiaridade com computadores, predisposição ao aprendizado do software e frequência de uso do software, dentre outras, para que o projeto seja orientado segundo as necessidades específicas do perfil do usuário final.
- c) **Projeto conceitual:** representa a definição formal do modelo de usuário da aplicação. Nesta etapa, definem-se os objetos do sistema e suas propriedades, relacionamento e operações, do ponto de vista do operador da interface.
- d) **Projeto funcional:** este projeto define em detalhes a funcionalidade da interface, em termos da informação necessária para a operação, a possibilidade e natureza dos erros que podem ocorrer, o tratamento dos mesmos e os resultados de cada operação do sistema.
- e) **Projeto seqüencial:** este projeto define a ordem e seqüência das entradas e saídas de dados envolvidas no funcionamento do programa.
- f) **Protótipos da interface:** A confecção de protótipos durante o desenvolvimento, representando uma versão rápida (embora de funcionalidade limitada) do estágio do trabalho, que pode ser avaliada por operadores representativos da classe do usuário final, pode favorecer bastante o processo de criação da interface.

3.2. Componentes mais Comuns de Interfaces de Usuário

Existem diversos elementos para a implementação dos mecanismos de ação e controle do usuário. Os mais comuns, existentes na maioria dos softwares de desenvolvimento de aplicações gráficas atualmente, estão descritos a seguir [10, 17, 33]:

3.2.1. Mensagem

Mensagens são informações visuais que aparecem em janelas, notificando o usuário acerca da natureza, conseqüências ou resultados de suas ações. São escritas na voz ativa e podem ser formuladas tanto como uma questão (com respostas do tipo sim/não) ou como uma diretiva (com respostas do tipo OK/Cancelar).

Existem três diferentes tipos de mensagem. Uma mensagem de informação reporta ao usuário os resultados de um processamento normal de uma operação. Ela aparece normalmente em janelas móveis de tamanho fixo. Incluem um botão para que o usuário possa demonstrar reconhecimento e desaparecem apenas quando este botão é pressionado. Podem incluir, também, um botão de ajuda. Normalmente não são acompanhadas por um aviso sonoro. Contém um símbolo identificado pela letra “i”.

Uma mensagem de alerta informa ao usuário acerca de situações potencialmente perigosas, destrutivas ou indesejadas que ocorrem durante a tarefa. Elas interrompem o processamento e aguardam informações do usuário para continuar. Podem possuir botões de reconhecimento e ajuda. São normalmente acompanhadas de sinal sonoro e contém um símbolo com o sinal de exclamação “!”.

Uma mensagem de ação notifica o usuário de problemas sérios não destrutivos que requerem a sua intervenção, para corrigir uma certa condição de operação, tentar uma ação alternativa ou cancelar a operação. Ela normalmente aparece em uma janela de tamanho fixo, móvel, acompanhada de alerta sonoro e interrompe o processamento da tarefa em andamento. Em geral, contém botões rotulados com respostas do tipo “sim/não”, “tentar novamente” (para recomeçar a partir de um ponto de falha) e “cancelar”. Contém também um símbolo de parada.

A figura a seguir, extraída do ambiente Windows 98, exemplifica este tipo de componente:

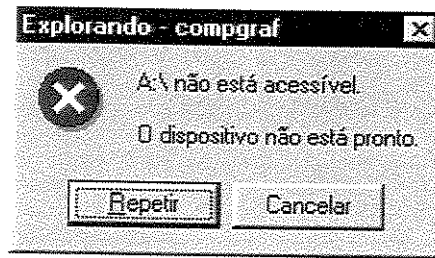


Figura 3.1: Mensagem

3.2.2. Menus

Uma barra de menus é uma barra horizontal no topo da janela principal do aplicativo que exibe uma lista de tópicos. Estes tópicos são os cabeçalhos de uma seqüência de menus do tipo “pull-down”. Os tópicos da barra de menus não executam ações. Servem para agrupar comandos que se referem a tarefas similares. Estes comandos devem ser breves e corresponder ao título sob o qual estão agrupados e são ordenados segundo conceitos de funcionalidade, freqüência de uso, ordem de uso e ordem alfabética. Os menus “pull-down” devem ter ao menos duas opções. Caso um menu tenha mais que 10 opções, devem ser utilizados menus em cascata, descritos a seguir. Opções relacionadas a diferentes tipos, dentro de um menu, devem ser agrupadas e distinguidas por uma linha de separação. Os tópicos do menu normalmente possuem uma tecla de atalho para permitir o seu acesso sem utilização do mouse. Os rótulos dos comandos normalmente têm as letras principais escritas em maiúsculas (por exemplo, “Selecionar Tudo”, “Configurar Impressora”).

Os menus em cascata são definidos como uma coleção de escolhas de menu relacionadas a uma escolha de menu previamente selecionada, que provê uma organização hierárquica a um menu do tipo “pull-down”. Eles devem agrupar escolhas relacionadas entre si de um menu, em um sub-grupo do menu principal, para reduzir o número de escolhas listadas. Normalmente, apresenta um apontador gráfico do tipo seta para indicar em que direção o menu em cascata aparecerá. Em geral, não se utiliza mais que dois níveis hierárquicos em cascata para cada menu principal.

A figura a seguir, extraída de uma versão inicial da interface deste projeto, exemplifica este tipo de componente:

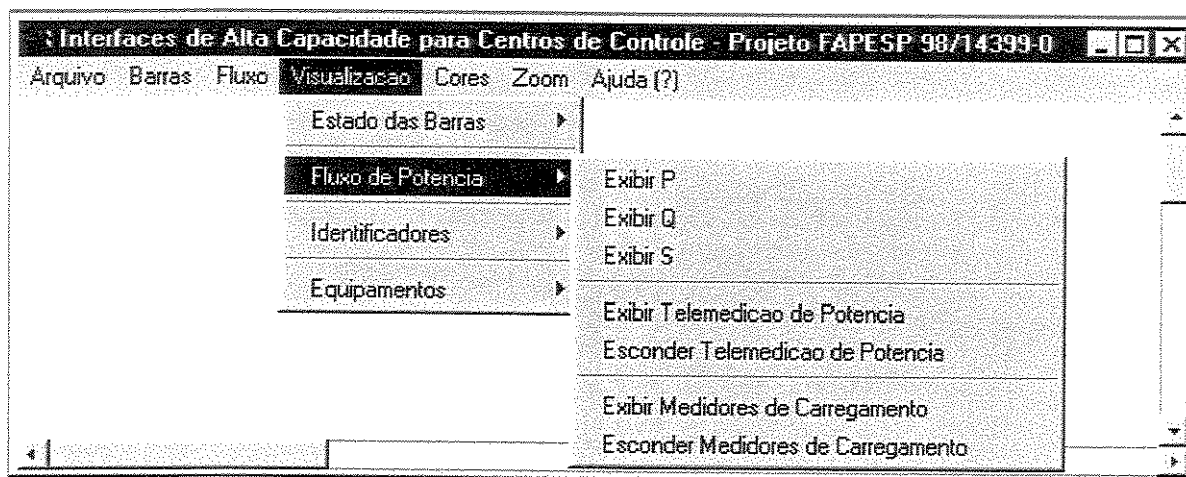


Figura 3.2: Menus

3.2.3. “Checkbox”

Este tipo de controle é utilizado para selecionar uma ou mais opções de uma lista fixa. Cada uma destas opções é composta por um texto (rótulo) e um indicador gráfico de seleção, cuja condição de vazio indica opção não selecionada. As opções não precisam ser mutuamente exclusivas e podem ser combinadas. A seleção de uma opção não deve afetar o seu rótulo e é aconselhável o uso de expressões positivas no projeto dos mesmos. A figura a seguir, extraída do toolkit da linguagem Java, exemplifica este tipo de componente:

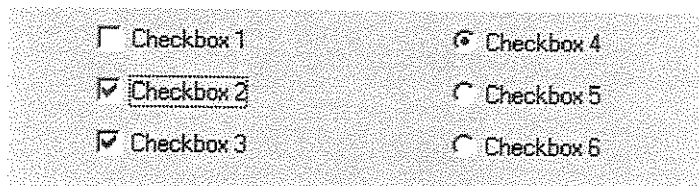


Figura 3.3: “Checkbox”

Uma situação particular de “checkboxes” é o botão de rádio, que é um componente utilizado para a seleção de um item de uma lista reduzida (por exemplo, cinco itens ou menos). As opções desta lista devem ser mutuamente exclusivas, isto é, apenas um item

pode estar selecionado. Ele é formado por um componente gráfico responsável por indicar o item selecionado e os rótulos que identificam as opções. Um dos itens deve estar sempre selecionado (a opção default) e a seleção de uma opção desabilita as outras.

3.2.4. Caixa de Diálogo

O propósito deste componente é apresentar informações ao usuário e coletar dados de entrada do mesmo. Tem a forma de uma janela móvel de tamanho fixo, e aparece durante o processamento por requisição do usuário para coletar decisões e informação necessárias ao andamento da tarefa. Podem permitir ou não o andamento da tarefa a que estão relacionadas antes que o diálogo esteja completo. Não utilizam menus para executar seus comandos. Pode ser utilizada como diálogo de erro, diferindo do componente de mensagem de ação no sentido em que podem requerer mais informação do usuário (como o nome de um arquivo de entrada não encontrado, por exemplo) e ser composta por outros componentes de interfaces gráficas (janelas, botões, etc.). A figura a seguir, extraída do ambiente Java, exemplifica este tipo de componente:



Figura 3.4: Caixa de diálogo

3.2.5. Componentes de “Feedback”

Este tipo de componente apresenta uma indicação visual ou auditiva dos resultados de uma tarefa ao usuário. Representa a resposta do aplicativo ao operador e deve ser utilizado para notificar entrada de dados, progresso de operação e assistência para erros. Exemplos são: cursores de localização, ponteiros gráficos e objetos visuais. Eles podem ser

compostos por outros componentes descritos (janelas, botões, etc.). A figura a seguir exemplifica este tipo de componente, representando um indicador do progresso de download de arquivos:

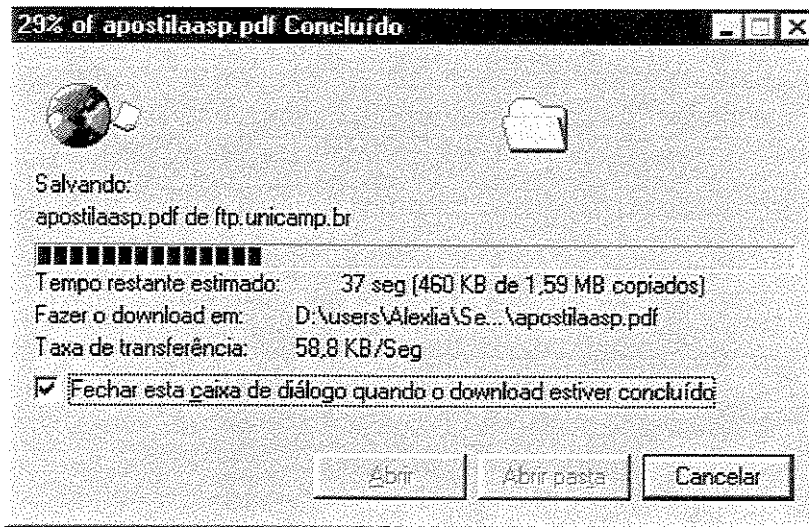


Figura 3.5: Componente de “Feedback”

3.2.6. Labels

Labels são rótulos de texto estático e descritivo, que servem a propósitos de identificação de janelas, botões e outros objetos gráficos. Selecionar um label não precisa necessariamente resultar em uma ação computacional. São normalmente alinhados à esquerda, mas podem ter qualquer tipo de justificação ou fonte.

3.2.7. Listas

Uma lista mostra opções que os usuários podem selecionar, contendo um item por linha da lista. Pode conter uma barra de rolagem se o número de opções for muito grande, ou o tamanho da lista seja insuficiente para conter todos ao mesmo tempo. O tipo de seleção da lista pode ser simples (apenas uma opção selecionada por vez) ou múltipla

(várias opções podem ser selecionadas ao mesmo tempo). São utilizadas apenas para seleção e escolha e não para executar comandos ou navegação. O item selecionado é destacado dos demais através da mudança do seu background. A figura a seguir, extraída do ambiente Java, exemplifica este tipo de componente:

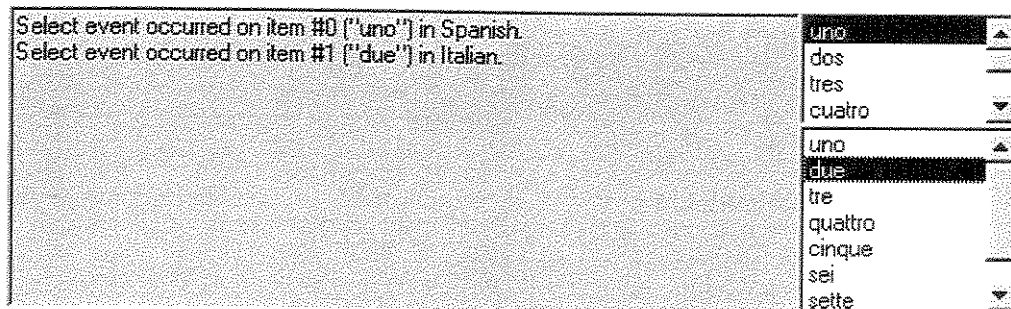


Figura 3.6: Lista

3.2.8. Botões

Um botão é um objeto gráfico rotulado com texto e/ou gráficos. Sua função é executar uma ação, designada pelo rótulo no componente, quando o operador posiciona o mouse sobre o botão e clica. O botão “default” de uma janela deve ser aquele mais solicitado pelos usuários e os botões devem poder ser acessados por teclas de atalho (como <ESC> ou <Cancel>). A figura a seguir exemplifica diferentes tipos de botões extraídos dos ambientes Java e Windows 98:



Figura 3.7: Botões

3.3. Programação Orientada a Objetos

Programação orientada a objetos (ou Oriented Object Programming – OOP) é uma técnica de programação na qual o problema a ser abordado é modelado como sendo constituído por um conjunto de objetos que interagem entre si. A seguir, serão expostos os conceitos básicos desta técnica.

3.3.1. Conceitos de OOP

Os conceitos básicos de orientação a objeto são [10, 31, 32]:

- a) **Classe:** Uma classe é definida como um molde ou gabarito através do qual serão definidos os objetos. Ela é responsável pela determinação de atributos ou métodos pertinentes aos mesmos. Assim, é um protótipo que define os métodos e atributos comuns a um conjunto de objetos de um mesmo tipo. Em outras palavras, descreve um grupo de objetos com propriedades, comportamento, relações com outros objetos e semântica comuns entre si.
- b) **Objeto:** Um objeto é uma instância de uma classe. Ele representa uma entidade, conceito ou abstração individual pertinente ao domínio do problema sob análise. Pode-se dizer que é uma parcela de código que contém variáveis e os métodos relacionados. São os componentes do software que existem durante a vida do programa e têm como finalidade prover uma base prática para a implementação computacional de representações do mundo real.
- c) **Atributos:** Um atributo é uma propriedade do objeto. Eles representam a informação contida, na forma de variáveis ou constantes, dentro do objeto definido, registrando o estado atual do mesmo.

- d) **Métodos:** Representam o conjunto de operações que um objeto pode realizar. Basicamente, são sub-rotinas que manipulam variáveis locais, atributos próprios ou de outros objetos e parâmetros por passagem de valor.

- e) **Encapsulamento:** Pelo conceito de encapsulamento entende-se que um objeto deve conter em si mesmo os dados necessários à sua manipulação como unidade, isto é, colocar as suas variáveis e atributos sob a custódia protetora de seus métodos. Com isto, consegue-se obter os benefícios de modularidade para o sistema, pois os detalhes da implementação tornam-se transparentes para o programador, empregando o conceito de **ocultamento da informação**, descrito a seguir.

- f) **Ocultamento da informação:** Através deste conceito entende-se que um objeto deve revelar apenas as informações estritamente necessárias ao seu funcionamento, sendo manipulável através de uma interface pública. Em outras palavras, não é necessário conhecer os mecanismos dos métodos do objeto, mas apenas seus efeitos, para utilizá-los.

- g) **Herança:** O mecanismo de herança permite que características comuns a um determinado conjunto de classes possam ser derivadas a partir de uma classe base, reaproveitando declarações e estruturas já existentes. A partir desta classe base (ou superclasse), outras classes podem ser especificadas (ou derivadas). As superclasses associam-se com suas derivadas através de relações de hierarquia, permitindo a criação de uma biblioteca de classes. A utilização de herança permite o aumento da eficiência da programação pela ausência de códigos repetitivos. Outra vantagem do emprego de uma biblioteca de classes reflete-se na facilidade de reutilização e ajuste de classes pré-existentes, provendo a capacidade de fácil adaptabilidade aos códigos implementados.

- h) **Polimorfismo:** A característica de polimorfismo permite que métodos que apresentam mecanismos de funcionamento diferentes, mas que acarretem comportamentos similares, possuam a mesma identificação, através da sobrecarga destes métodos. Assim, empregando este mecanismo, um objeto pode, por exemplo, comunicar-se com outro sem precisar conhecer a classe a que o mesmo pertence.

3.3.2. Análise e Projeto de Software Orientado a Objetos

No desenvolvimento de software utilizando orientação a objetos, é necessário efetuar-se etapas de análise da aplicação através dos requisitos funcionais do sistema [31, 32]. As principais etapas de análise são:

- a) **Identificação:** Nesta etapa, deve-se identificar e selecionar os objetos e propriedades relevantes para o funcionamento do sistema.
- b) **Organização:** Nesta etapa, são classificados os objetos e classes considerando-se suas características similares para organizar hierarquias de herança, composição e cooperação entre os mesmos.
- c) **Interação:** Nesta etapa, analisa-se como os objetos integram-se ao sistema, através de colaboração com outros objetos, para definir a interface (definição do comportamento do objeto) dos mesmos.
- d) **Operação:** Esta etapa compreende a descrição do conjunto de operações do objeto e pode requerer a colaboração de outros objetos.
- e) **Implementação:** Finalmente, são definidos os dados e transformações que o objeto precisa manter internamente (métodos e atributos).

Da maneira descrita anteriormente, são gerados os conceitos do sistema, podendo-se utilizar a metodologia de OMT (“Object Modeling Technique”), expressa através de três modelos, que estão descritos no apêndice B. Deve-se realizar, antes da etapa de implementação, a etapa de projeto, de onde resultará um modelo mais refinado e formal que os anteriores levando-se em conta as características do ambiente de implementação [31, 32]. As três principais tarefas que precisam ser desempenhadas nesta etapa são:

- a) **Identificação do ambiente de implementação:** Consiste na determinação do impacto que as características do ambiente de implementação terão no projeto.
- b) **Desenvolvimento do ambiente inicial do projeto:** Consiste em inserir no modelo resultante da etapa de análise as propriedades detectadas anteriormente pertinentes ao ambiente de implementação.
- c) **Interação entre objetos:** Consiste na expansão do modelo do projeto para descrever, formalmente, as operações e comunicações dos mesmos. Nesta fase, são definidas as interfaces (meios de interação da classe com o ambiente computacional) de implementação das classes.

3.3.3. Aplicação de Orientação a Objetos na Construção da Interface de Usuário

A orientação a objetos apresenta vantagens na implementação de interface de usuário com relação ao emprego de algoritmos estruturados, principalmente do ponto de vista de desenvolvimento [24]. Normalmente, o programador faz uso de uma camada orientada a objetos na interface de programação. Esta camada fornece um conjunto de classes pré-definidas que reduzem drasticamente a quantidade de código gerada, emprestando características de consistência aos componentes da interface.

Além disto, o próprio padrão de interação de um usuário com os ícones na tela se aproxima bastante da filosofia de orientação a objeto, uma vez que as figuras são representações gráficas de objetos do mundo real e podem reagir a ações do usuário, gerando interações com outros objetos do ambiente computacional.

A adaptabilidade e capacidade de atualização dos códigos segundo um esforço reduzido favorece as metodologias de desenvolvimento estudadas, principalmente com relação ao ciclo de testes das versões iniciais, onde a interface tem que ser corrigida repetidas vezes segundo a percepção dos usuários.

Por fim, as figuras e ícones representados na tela muitas vezes apresentam padrões repetitivos, tais como propriedades de contorno, preenchimento e interação com o operador, o que privilegia o emprego do mecanismo de herança, além de características como o polimorfismo (proporcionando a objetos de diferentes classes comportamentos similares) e encapsulamento (proporcionando o acesso a atributos dos objetos).

3.4. Implementação no Ambiente de Centros de Controle de Energia

3.4.1. Problemas na Interação Homem-Máquina

Em geral, as aplicações computacionais existentes nos centros de controle de energia elétrica realizam tarefas específicas com relação à análise e simulação da rede elétrica. Assim, quando os operadores do sistema precisam realizar tarefas de média dificuldade, que envolvem diferentes aspectos de operação da rede, é necessário que sejam ativados diferentes aplicativos e, em seguida, é preciso procurar, dentre a infinidade de dados que foram gerados, aqueles que são representativos para a solução do problema abordado. Como os aplicativos são independentes, em geral apresentam representações e características de interfaceamento muito díspares, o que vem a confundir e a atrasar o operador. Além disto, como tais aplicativos fazem uso da modelagem do sistema de energia elétrica e de seus componentes mais adequada para os seus propósitos, é necessário para o operador conhecer e trabalhar ao mesmo tempo com estas diferentes modelagens,

para que seja possível interpretar a saída de dados. Também se deve considerar que grande parte dos programas dos centros de controle são desenvolvidos por profissionais pouco familiarizados com o ambiente de operação, e assim, geram interfaces gráficas com deficiências no tocante às necessidades reais dos operadores.

3.4.2. Tendências do Setor Elétrico

As interfaces de usuário desenvolvidas para centros de controle devem apresentar algumas características para aumentar a sua efetividade, respeitando as tendências do setor de energia elétrica e os conceitos descritos anteriormente, que se aplicam a interfaces de usuário de maneira geral.

Inicialmente, deve-se considerar os seguintes aspectos [6]:

- a) O operador deverá dispor de cada vez menos tempo para coleta e localização de dados acerca da rede supervisionada. Assim, as informações deverão ser centralizadas e acessíveis de uma interface padrão, qualquer que seja a sua natureza.
- b) As chances de sucesso das ações de controle em tempo real, que são normalmente estimadas pelo operador com base em sua experiência própria, deverão ser avaliadas também com o auxílio de ferramentas computacionais on-line. Tais ferramentas deverão prover, em linguagem acessível, os custos estimados, os riscos envolvidos com a ação de controle e as alternativas operacionais que resultem em um estado de operação mais seguro ou que otimize algum aspecto da rede de energia.
- c) De maneira semelhante, as incongruências e discrepâncias de resultados no processamento do sistema sob estudo, causadas por ineficiência computacional ou de modelagem da rede, e que hoje são desprezadas por não apresentarem um significado prático imediato, deverão passar a ser informadas ao operador, para

que os riscos de adotar-se um estado de operação mais próximo à capacidade máxima da rede (e portanto mais econômico, aumentando a competitividade da empresa) possam ser melhor calculados.

Assim, as interfaces gráficas desenvolvidas para centros de controle devem incorporar aplicações que possam tomar decisões prévias quanto à sugestão de ações de controle e não apenas aguardar as solicitações do operador. Mais ainda, devem avaliar as ações tomadas pelo operador e calcular os riscos das mesmas, retornando uma estimativa para o mesmo em tempo real [6].

Por fim, o crescente aumento da competitividade das empresas do setor elétrico pode deteriorar as relações entre as companhias concessionárias de energia, que atualmente apresentam uma natureza cooperativa. As interfaces desenvolvidas devem também incorporar esta característica no momento de sugerir ações para o operador.

3.4.3. Características das Interfaces Homem-Máquina

As interfaces homem-máquina (IHMs) de um sistema de gerenciamento de energia consistem de mecanismos de visualização tais como consoles, painéis, impressoras e monitores gráficos, além de alarmes sonoros.

Atualmente, os dispositivos de representação visual para o operador apresentam uma capacidade relativamente elevada de atualização e gama de cores. Para a representação gráfica através de interfaces de visualização do sistema, é necessária a utilização de dados que podem ser classificados em três tipos:

- **Máscaras Estáticas ou Background:** são dados que representam as informações que nunca mudam para uma determinada porção do sistema que se deseja visualizar, como, por exemplo, o diagrama unifilar de uma parte da rede, quando visualizada do ponto de vista de chaves-disjuntores/secção de barras.

- **Descritores:** são dados que não aparecem diretamente na tela, mas que representam informações necessárias para identificar os dados telemididos e calculados que devam ser mostrados em um determinado instante.
- **Dados Dinâmicos ou Variáveis:** são exibidos na tela e periodicamente atualizados. Representam, por exemplo, as medidas das grandezas representativas do sistema, como tensões complexas e distribuição de fluxos de potência na rede e informações sobre componentes da tela, como cursores ou a posição do “mouse”.

3.4.4. Integração aos Processos em Centros de Controle

As implementações de processos em centros de controle de energia são usualmente realizadas segundo uma organização na qual a ativação das funções de análise de rede e simulação não está vinculada às demais e sua comunicação é realizada através de bancos de dados ou troca de mensagens. O operador deve, ainda, ativar cada função em separado, ajustando-as para as suas necessidades, realizando em seguida o concatenamento mental das informações adquiridas através de sua capacidade própria [6].

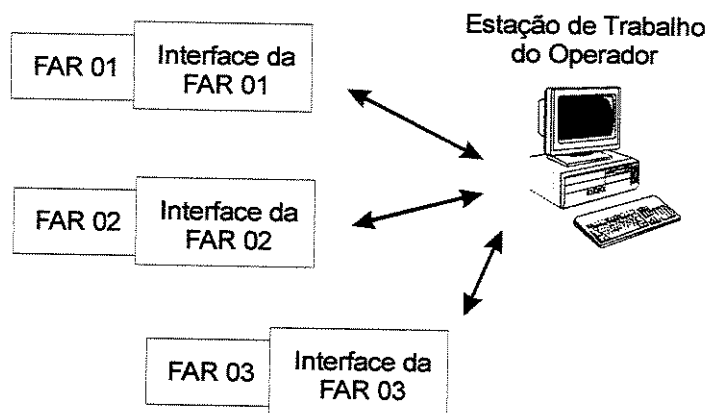


Figura 3.8: Organização de processos em centros de controle

Neste tipo de organização, as funções de análise de rede são construídas segundo conjuntos independentes, cada qual possuindo uma interface própria com o operador, que

atuam sobre um conjunto de dados próprio. Estes dados podem ou não corresponder àqueles que são utilizados na comunicação com outras FARs. Conseqüentemente, podem ocorrer discrepâncias nos métodos de processamento, acesso e saída de dados correspondentes aos diferentes módulos [6]. A figura a seguir refere-se a este mecanismo de representação da informação envolvida com as FARs através de IHMs:

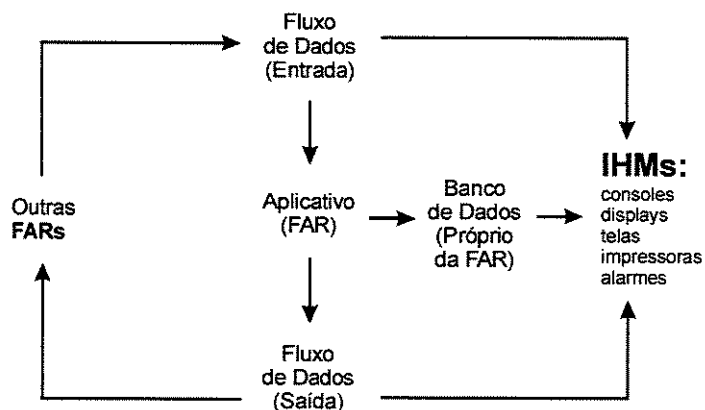


Figura 3.9: Integração entre as IHMs e as FARs

Capítulo 4

Aspectos de Representação e Visualização da Rede Elétrica

4.1. Percepção do Operador e Representação Gráfica

O ambiente computacional aplicado a sistemas de energia elétrica possui um conjunto de softwares associados que fazem uso de algoritmos sofisticados, que podem ser classificados, conforme a sua aplicação, em três diferentes áreas [5, 6]:

- a) **Controle**, onde os resultados dos algoritmos são automaticamente aplicados à operação do sistema;
- b) **Operação**, onde os operadores do sistema observam os resultados e tomam decisões sobre ações de controle baseadas em sua interpretação, normalmente em um tempo reduzido;
- c) **Projeto**, onde os profissionais analisam os resultados e tomam decisões acerca do projeto baseado também na sua interpretação.

Entretanto, os dados gerados por estes programas se apresentam freqüentemente na forma de listagens numéricas, normalmente extensas dado o porte dos sistemas de energia sob análise. O processo mental realizado pelo usuário do sistema ou, em centros de controle de energia, pelo operador, pode ser representado pela figura a seguir, extraída da referência [5]:

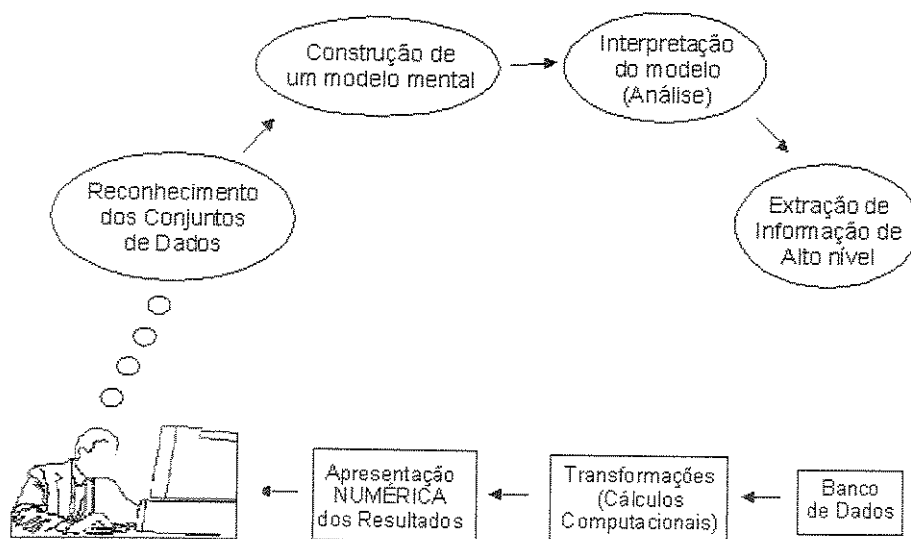


Figura 4.1: Processo mental decorrente da interpretação de dados numéricos

Conforme afirma Jones [22], o processamento de estímulos externos pelos seres humanos é realizado de três maneiras distintas: através do sistema perceptivo (que compreende sentidos como visão, olfato, audição, paladar, tato), do sistema motor (que compreende membros como braços e pernas) e do sistema cognitivo (relacionado com a memória). É possível, com o uso dos recursos computacionais atualmente disponíveis, utilizar representações gráficas para apresentar estes dados numéricos e, assim, tirar proveito das capacidades de reconhecimento de padrões visuais inerentes ao cérebro humano [5]. Isto economiza etapas no processo de interpretação do operador, aumentando a confiabilidade de suas decisões, conforme a figura a seguir:

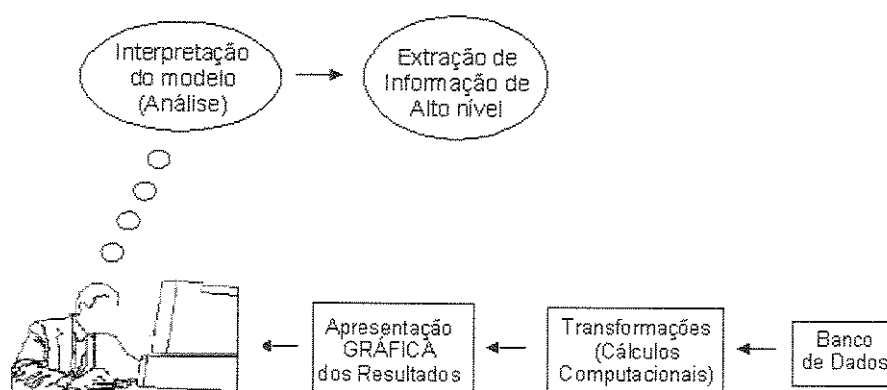


Figura 4.2: Processo mental decorrente da interpretação de dados gráficos

Para que uma representação gráfica possa ser considerada eficiente para o usuário, deve apresentar três características básicas [5, 6]:

- a) **Codificação natural da informação:** significa que a forma de representação gráfica deve corresponder a padrões mentais previamente existentes para a maioria dos usuários do software, ou seja, deve ser possível que eles a compreendam intuitivamente sem a necessidade de treinamento ou explicações intensivas.
- b) **Representação gráfica específica para a tarefa:** significa que a forma de representação deve ser específica para a tarefa computacional a que se destina e, assim, aspectos da representação que não são necessários ou que não se aplicam à tarefa devem ser suprimidos ou ignorados.
- c) **Representação limpa:** com a tendência atual de construir-se representações que sejam bonitas, normalmente encontra-se o uso de decoração que torna a representação apenas mais atrativa, sem fornecer nenhuma informação adicional ao usuário. Este tipo de decoração gráfica deve ser evitado, pois é inútil operacionalmente, além de consumir recursos computacionais.

A representação de gráficos e animações deve obedecer tanto às exigências do sistema perceptivo, através da representação adequada de telas coloridas, quanto às exigências do sistema cognitivo, que impõe restrições às escalas de cores utilizadas e à forma de representação simbólica na tela. Ainda com relação à representação gráfica simbólica, deve-se obedecer a diversos princípios de percepção, tais como o conceito de *background* e *foreground* (contraste), limites de proximidade e aspectos de continuidade.

Esta representação, entretanto, pode ser melhorada se, no lugar de figuras bidimensionais, for utilizada a representação em três dimensões, empregando aspectos de perspectiva através de operações de projeção e aproveitando-se das capacidades de percepção de variação de formas e volumes presentes no cérebro humano. É possível, ainda, aproveitar outras características do sistema perceptivo, como a implementação de alarmes sonoros, para aumentar a eficiência da interface de visualização.

4.2. Representação dos Componentes do Sistema de Energia

A visualização dos componentes e equipamentos do sistema monitorado pode ser ou não do interesse do operador. Em geral, na supervisão on-line, eles são representados juntamente com o diagrama unifilar da rede, uma vez que os dados telemedidos ainda não sofreram nenhum tipo de filtragem (como a passagem pelo configurador, por exemplo). A sua representação, para atender a requisitos de consistência na interface do usuário (conforme explicado anteriormente), deve ser a mesma para todas as telas e páginas gráficas que representam o sistema. Além disto, a maneira de se representar os componentes do sistema para o operador deve ser tal que o mesmo possua familiaridade com os símbolos empregados e possa inferir as características do sistema de maneira natural e intuitiva.

Em virtude destas razões, usualmente empregam-se representações para os equipamentos da rede extraídas a partir da simbologia de normas técnicas, como as da ABNT [1, 2, 3], para utilização em diagramas unifilares de dispositivos, altamente difundidas no meio industrial e de pesquisa em sistemas elétricos de potência.

A seguir, serão descritas as formas mais comuns de representação dos equipamentos geralmente encontrados em sistemas de energia, obtidas a partir da observação de normas técnicas e de diversos modelos de interfaces gráficas diferentes para a visualização do sistema de energia elétrica.

4.2.1. Representação de Barras

As barras do sistema, que representam os nós da rede em estudo, são convencionalmente representadas na sua forma unifilar, a partir de uma linha vertical ou horizontal ligeiramente mais espessa que os ramos, de tamanho variável, conforme a figura a seguir:

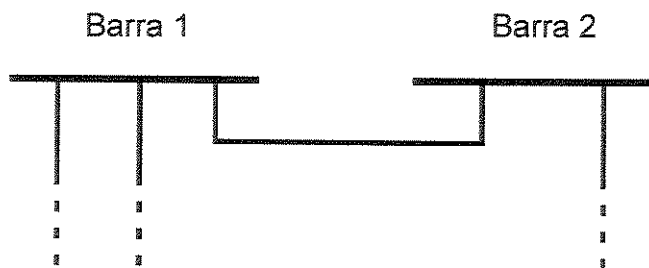


Figura 4.3: Representação unifilar de barras

Entretanto, a forma de representação mais comum encontrada nas interfaces gráficas atualmente é bidimensional, onde as barras são representadas por retângulos de largura e comprimento variável. O motivo desta representação é a possibilidade de preenchimento da região interna da barra com a finalidade de representar seu estado de operação. Deve-se salientar que na visualização do circuito as barras devem conservar a mesma largura, para atender novamente aos requisitos de consistência da representação. A figura a seguir exemplifica uma barra horizontal neste tipo de representação:

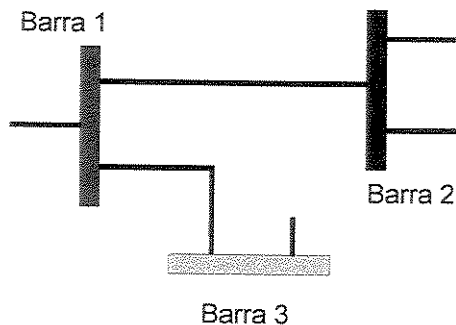


Figura 4.4: Representação bidimensional de barras

4.2.2. Representação de Ramos

Os ramos do sistema são normalmente representados na sua forma unifilar, a partir de uma linha que pode apresentar segmentos verticais, horizontais ou inclinados que conectam duas barras da rede, conforme a figura a seguir:

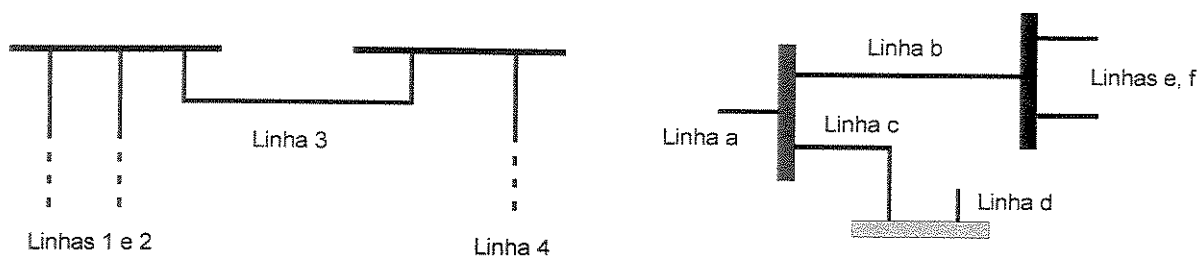


Figura 4.5: Representação unifilar de ramos

Normalmente, a designação utilizada para denominar uma linha corresponde a um rótulo composto pela seqüência da sua barra de origem e da sua barra de destino, sendo geralmente considerada como barra de origem aquela de menor numeração:

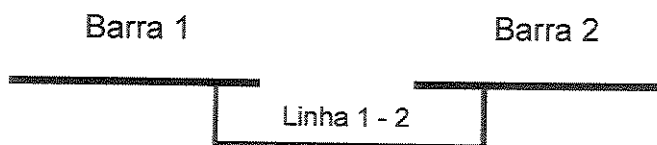


Figura 4.6: Denominação usual de linhas e ramos

4.2.3. Representação de Geradores e Máquinas Síncronas

Unidades geradoras são normalmente representadas, em diagramas unifilares de sistemas de energia, por uma circunferência e um segmento de reta. Na região interna desta circunferência é comum encontrar-se algum tipo de símbolo ou letra identificadora. A figura a seguir demonstra algumas representações deste tipo de componente:

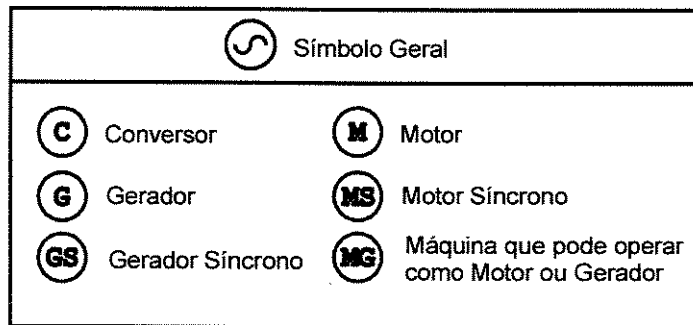


Figura 4.7: Representação de unidades geradoras

4.2.4. Representação de Transformadores e Autotransformadores

Os elementos transformadores da rede de energia são simbolizados através de figuras que representam os enrolamentos do dispositivo. Algumas das formas mais comuns de representação de transformadores e autotransformadores estão descritas a seguir:

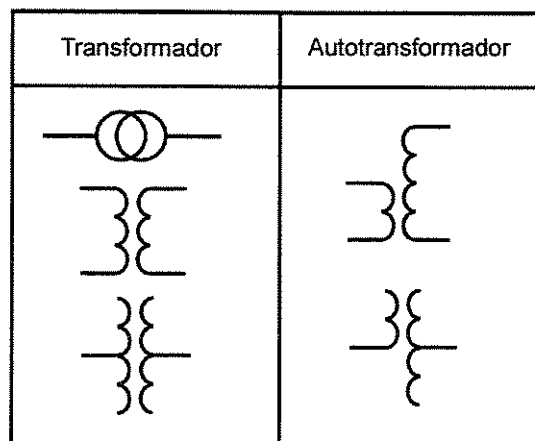


Figura 4.8: Exemplos da Representação de Transformadores e Autotransformadores

4.2.5. Representação de Dispositivos de Chaveamento

Os dispositivos de chaveamento no sistema compreendem chaves, disjuntores e similares. Suas formas de representação mais comuns estão descritas a seguir:

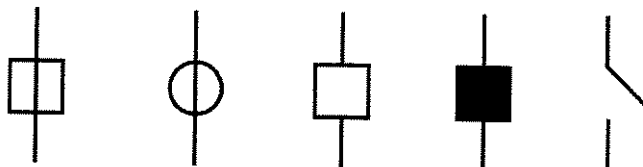


Figura 4.9: Representação de chaves e disjuntores

E pode-se ter diferentes funções para os seus contatos, de acordo com a ABNT [1, 2, 3]:

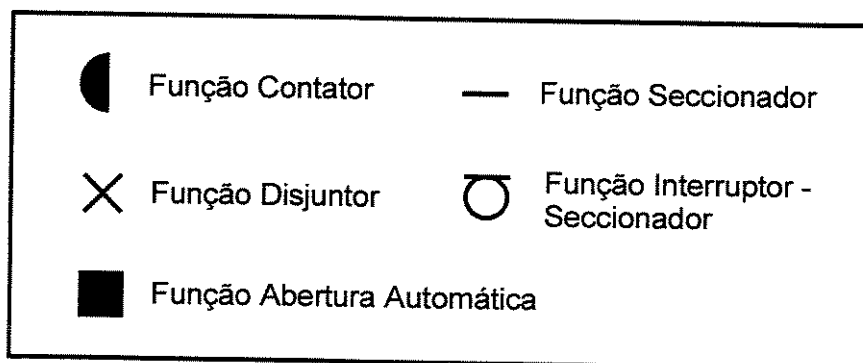


Figura 4.10: Representação de contatos de chaves e disjuntores

4.2.6. Representação de Bancos de Capacitores e Indutores

Bancos de capacitores e indutores, que têm por finalidade atuar na compensação de reativos do sistema, têm como simbologia mais usual as representações descritas na figura a seguir:

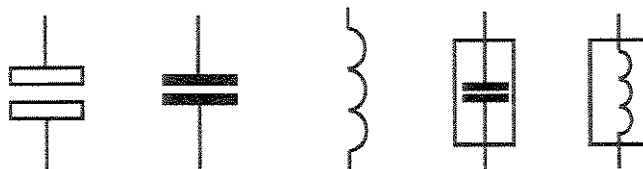


Figura 4.11: Representação de bancos capacitivos e indutivos

4.2.7. Representação de Usinas e Subestações

Quando o sistema é visualizado no nível de transmissão, usinas geradoras e subestações são representadas por símbolos gráficos, como os extraídos de normas técnicas da ABNT representados a seguir [1, 2, 3]:

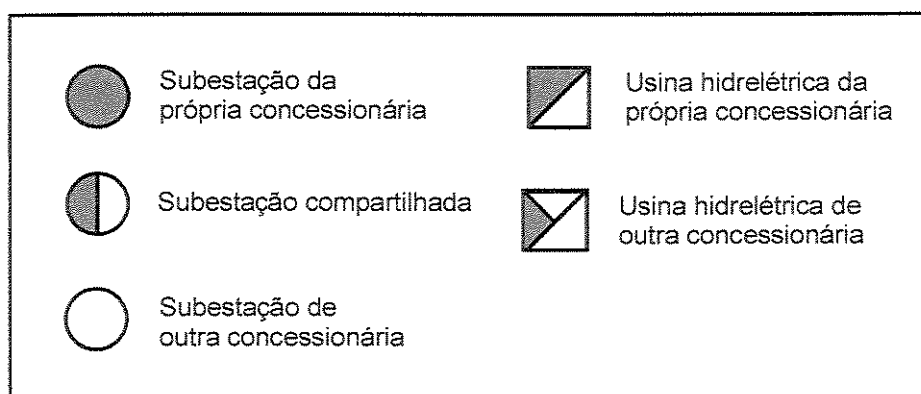


Figura 4.12: Representação de usinas e subestações

4.2.8. Outros Dispositivos e Equipamentos

A rede de energia elétrica é composta por diversos outros equipamentos e dispositivos, não citados anteriormente. Além disto, a representação dos equipamentos depende do nível de detalhamento desejado para a rede de energia. Um exemplo deste fato seria a eventual necessidade de representação de relés e dispositivos de proteção, além do posicionamento de transformadores de corrente e de potencial, quando o sistema fosse observado ao nível de uma subestação.

4.3. Representação do Estado do Sistema de Energia

4.3.1. Emprego de Escalas de Cores

Um importante aspecto a ser salientado com relação às representações gráficas diz respeito ao emprego de cores nas implementações. A percepção em dispositivos gráficos de elementos bidimensionais (como o diagrama unifilar do sistema) e de grandes quantidades de informação variável (tais como os valores telemedidos) é altamente facilitada se, em conjunto com a representação na tela, for utilizada uma escala de cores familiar ao usuário. Estas cores podem ser representadas matricialmente, através de escalas adequadas, segundo diversos modelos (Espectral, “Gray Scale”, RGB, HSV, etc.) [22, 25, 26, 39].

As cores na escala devem ser escolhidas com cuidado visando o significado específico com relação ao ambiente de operação e também considerando os aspectos dos modelos mentais implícitos de cores previamente existentes para o operador. Além disto, eventuais violações de limites e situações perigosas devem ser fáceis de detectar, bastando a inspeção visual. Não deve, também, ocorrer conflito quanto à representação de tais situações, como, por exemplo, a adoção de cores muito próximas para representar a violação dos limites superior e inferior de tensão em uma barra.

4.3.2. Representação Textual de Valores Telemedidos

A representação dos valores textualmente na tela é a maneira mais comum e antiga de representar-se as grandezas telemedidas do sistema de energia. Por se tratar de dados numéricos, demanda um esforço mental excessivo do operador, tornando impossível a aquisição do padrão da rede visualizada em um tempo pequeno. Deve-se, entretanto, salientar a importância da representação textual das grandezas do sistema para efeito de análise, projeto e estudos. Além disto, todos os parâmetros de equipamentos e valores telemedidos sempre podem ser representados por valores textuais [14, 18, 22].

4.3.3. Representação Gráfica com Medidores Analógicos

Em casos onde seja necessária a adoção de representações de diversos valores selecionados para os componentes da rede elétrica, ao mesmo tempo, a utilização de medidores gráficos analógicos agrega duas características que tornam sua aplicação vantajosa nestes casos: uma forma de representação gráfica e compacta. Além disto, sua interpretação é realizada muito mais eficientemente pelo operador quando comparada com dados numéricos. A figura a seguir representa alguns tipos destes medidores [5, 6]:

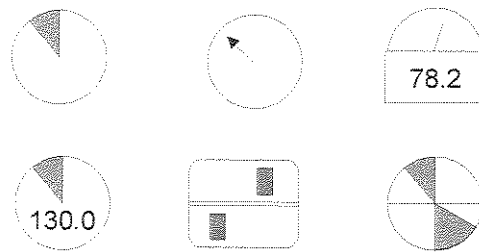


Figura 4.13: Representações de medidores analógicos

4.3.4. Representação da Magnitude da Tensão Nodal

O problema de representação da magnitude da tensão nodal nas barras do sistema, quando representada em separado dos ângulos de tensões nodais, pode ser visto como o problema de representação de uma grandeza escalar. Neste caso, algumas formas de representação possíveis são [18, 25, 26, 39]:

- a) Utilização de escala de cores: Além das características já descritas, o emprego de escalas de cores é vantajoso pois, para os sistemas reais, onde o número de barras é elevado, as limitações impostas pelos displays comprometem o desempenho da visualização do estado da rede, uma vez que o tamanho das representações unifilares deve ser reduzido, comprometendo a resolução.

- b) Utilização de figuras: Neste caso, a magnitude da tensão é representada pelo tamanho relativo de uma figura desenhada na tela, como uma linha, uma barra ou qualquer outra forma de representação que se deseje. No caso de representações tridimensionais, pode-se optar pela utilização da componente de altura da figura.

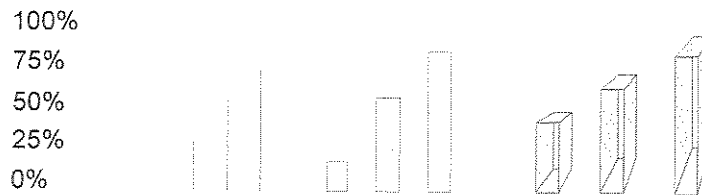


Figura 4.14: Representação escalar com gradação pela altura

4.3.5. Representação do Ângulo da Tensão Nodal

Se o operador estiver interessado apenas em visualizar os ângulos nodais, independentes do valor de magnitude das tensões (como em uma análise de FCDC, por exemplo), então o problema de representação dos mesmos pode ser visto como o de visualização de grandezas escalares, e podem ser utilizadas as técnicas de representação adotadas anteriormente para o caso das magnitudes das tensões nodais [18].

4.3.6. Representação Conjunta de Magnitude e Ângulo da Tensão Nodal

No caso em que existe a necessidade de representação de magnitudes juntamente com os ângulos das tensões nodais, pode-se adotar dois métodos:

- a) Considerar ambas as variáveis (magnitudes e ângulos) como escalares e separadas, adotando representações distintas, através de figuras e escala de cores

diferentes, ou da adoção de medidores angulares geometricamente localizados próximos às representações gráficas das barras do sistema.

- b) Considerar as variáveis conjuntamente, e utilizar técnicas de representação de vetores para a visualização.

4.3.7. Representação de Fluxo nos Ramos

Diversas técnicas são utilizadas para representar o fluxo de potência nos ramos da rede. As mais encontradas são a utilização de uma escala de cores similar a de representação de magnitude de tensão e/ou a modificação da espessura dos ramos no diagrama visualizado, para enfatizar o carregamento das linhas. O carregamento de potência também pode ser representado através da localização de medidores nos ramos, como os empregados no caso da representação dos ângulos das tensões nodais [25, 26].

Uma vez que a medida de fluxo é direcional, pode-se empregar setas para indicar a direção do mesmo. Linhas com sobrecarga ou em situações especiais podem ser tornadas mais brilhantes, salientadas ou desenhadas com emprego de diferentes tipos de traço. Finalmente, o emprego de animações pode enriquecer bastante o ambiente de visualização quando se trata da representação de fluxos em geral [25].

4.3.8. Representação das Injeções de Potência ou Carga nas Barras

As injeções de potência nodais, representadas pelos elementos de geração, compensação ou carga do sistema, podem adotar as formas de representação para os fluxos nos ramos da rede (uma vez que também são direcionais), mas com localização nas barras ao invés das linhas [25]. Uma possibilidade para efeito de estudos e análise é a utilização dos valores de injeção para construir um mapa tridimensional demonstrando o perfil de carregamento do sistema [30, 39].

4.3.9. Representação do Estado de Dispositivos de Chaveamento

Os dispositivos de chaveamento podem ser visualizados pelo operador juntamente com o diagrama unifilar da rede. Neste caso, o problema de sua representação torna-se relativamente simples, uma vez que podem apresentar apenas dois estados: aberto ou fechado. Para representar a diferença entre estes estados basta empregar figuras nitidamente distintas, além de uma escala de duas cores que não sejam próximas. Entretanto, se houver a necessidade de verificar o estado de chaves e disjuntores fora da representação unifilar do sistema, pode-se empregar recursos de superposição e impressão de figuras em modo de transparência [25, 26, 30, 39].

4.3.10. Representação do Valor dos Taps de Transformadores

Uma opção para a representação gráfica dos taps de transformadores seria o emprego de medidores e indicadores gráficos, como os que podem ser adotados para a representação dos ângulos das tensões nodais. Outra alternativa possível seria o emprego de uma escala de cores para representar a magnitude da relação de transformação através da mudança da cor do contorno do desenho do equipamento ou do fundo correspondente à sua representação [5, 6, 25].

4.4. Princípios de Visualização Científica

De acordo com a referência [36], o processo de visualização científica é definido como “uma nova abordagem ao problema de simulação numérica” e “que permite aos pesquisadores observar os resultados das mesmas utilizando representações gráficas complexas”. A seguir, serão abordados os aspectos de processos de animação, observando-se a comunicação de dados entre as funções de análise de rede e levando-se em conta o modelo de implementação de interfaces “dataflow”, segundo os princípios de visualização científica.

4.4.1. O Modelo “Dataflow”

Um dos fundamentos do processo de visualização científica é o de permitir ao usuário explorar a informação inerente ao conjunto de dados de que o mesmo dispõe [37].

Este propósito, traduzido para a aplicação em centros de controle de energia elétrica, pode ser visto como a capacidade do operador de visualizar as características das informações disponibilizadas pelo SCADA e pelas FARs, com certa flexibilidade, podendo realizar transformações e operações sobre os bancos de dados, especialmente na realização de estudos e simulações do sistema.

A maioria dos programas de visualização desenvolvidos, entretanto, apresentam limitações no sentido de que não podem ser reconfiguradas, reprogramadas ou estendidas (em geral, o usuário é apenas capaz de visualizar os dados, com uma limitada capacidade de calcular novos conjuntos de informação) [14]. Para contornar este problema, foi desenvolvido o modelo “dataflow”, onde o usuário pode interativamente “criar” a sua aplicação, na forma de uma rede de módulos. Cada um destes módulos é uma rotina de software que realiza uma operação específica em um conjunto de dados de entrada, gerando um novo conjunto de dados de saída. A rede criada pelo usuário controla a maneira pela qual os dados fluem de um módulo para outro, até a etapa final de visualização. Os módulos implementados podem desempenhar, de maneira geral, diversas funções:

- Carregamento de informações para a rede (acesso a bancos de dados, arquivos, outros aplicativos ou processos, etc.);
- Modificação ou filtragem de dados (como normalização ou aplicação de operadores, tais como derivadas, produtos, etc.);
- Transformação de dados em objetos a serem visualizados (objetos geométricos, como curvas e superfícies ou relacionamento com um banco de imagens geradas previamente);

- Determinação do mecanismo de visualização ou saída (redirecionamento da saída para impressoras e plotters, configuração das características do vídeo, etc.).

Uma característica interessante deste tipo de implementação é o fato de que os usuários podem, posteriormente, criar seus próprios módulos para realizar tarefas adicionais às tarefas do conjunto original. A figura a seguir demonstra a conexão entre os diferentes tipos módulos:

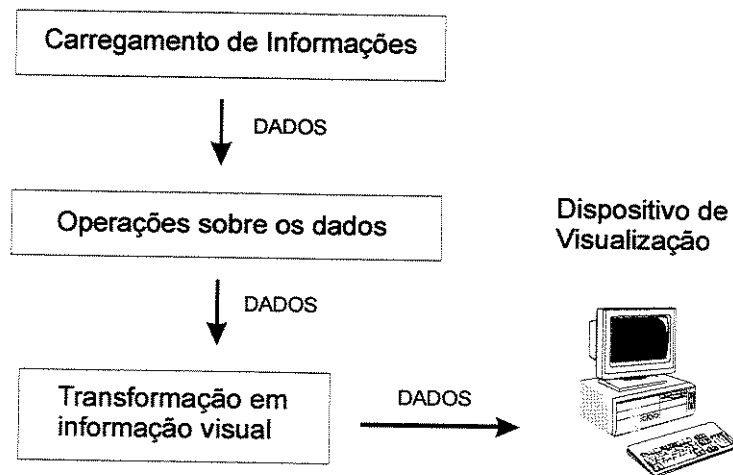


Figura 4.15: Modelo "Dataflow"

O enfoque principal deste trabalho situa-se nas três últimas etapas, onde são efetuados os processos de visualização e representação do sistema de energia.

4.4.2. Fluxo de Dados entre Funções de Análise de Rede e Visualização Científica

Em um centro de controle o objetivo das interfaces de visualização é fornecer ao operador uma visão imediata e o mais precisa possível do estado geral do sistema, a partir

dos dados da supervisão. Este processo pode ser visto como um problema de visualização científica, já que em tempo real o operador deve inferir de maneira correta o estado da rede, enquanto no modo de estudos ele deve ser capaz de explorar as capacidades do sistema (tais como expansão da rede ou análise de contingências). Pode-se realizar, ainda, algumas considerações:

- a) O armazenamento de informações no subsistema de análise de redes é feito através de bancos de dados estáticos e dinâmicos gerados segundo um formato padronizado, para que sejam acessíveis a diferentes aplicações;
- b) As funções de análise de rede desempenham transformações em um conjunto de dados de entrada, gerando um conjunto de dados de saída, que pode ou não alimentar uma outra FAR; desta maneira, elas podem ser vistas como módulos do modelo “dataflow”;
- c) O operador do centro de controle está interessado, em tempo real, apenas nas informações do subsistema de análise de redes e SCADA; entretanto, em modo de estudo e simulação do sistema, pode-se necessitar de outras informações a serem extraídas dos dados colhidos (como, por exemplo, a visualização da taxa de variação de demanda nas barras da rede para verificar a necessidade de adoção de modelos mais elaborados para a carga);
- d) O operador pode realizar, ainda, mudanças nas características de sua interface de visualização, para salientar melhor as propriedades da rede supervisionada em que esteja interessado.

Tendo-se em vista as considerações acima, pode-se afirmar que a maneira pela qual as funções de análise de rede realizam a troca de informações com o subsistema SCADA e entre si, aliada à arquitetura computacional usual de um centro de controle, torna a

implementação de interfaces para o subsistema de análise de rede adequada a ser realizada segundo o modelo “dataflow”.

4.4.3. Animação e Visualização Científica

A animação é importante para o processo de visualização científica em virtude do fato de que diversos fenômenos dentro dos campos de pesquisa na atualidade não podem ter resultados expressos em uma única imagem estática de maneira adequada, uma vez que a dinâmica envolvida nos mesmos impede, ou seja, são resultados variáveis no tempo. Exemplos destes fenômenos são [36]:

- Simulações de fluxo;
- Dinâmicas envolvendo movimento;
- Evolução de reações químicas;
- Imagens médicas.

De maneira análoga, as informações provenientes do SCADA como os bancos de dados resultantes das aplicações em tempo real das funções de análise de rede são dados dependentes do tempo. Assim, o emprego de animações para atender aos requisitos da visualização (ou seja, a exploração das habilidades visuais do operador para a extração de informação da imagem) pode ser vantajoso para enriquecer a qualidade da representação visual do estado do sistema supervisionado.

4.5. Animação em Centros de Controle

Uma importante característica a ser considerada sobre os centros de controle é o fato de que algumas informações acerca do comportamento dos componentes da rede podem ser previamente conhecidas, uma vez que é possível determinar os limites de variação das grandezas envolvidas com razoável exatidão. Um exemplo disto é o fato de que, por

exemplo, uma barra do sistema terá o módulo de sua tensão complexa, em operação normal, variando em torno de 1 p.u., ou o fato de que dispositivos de chaveamento devem apresentar dois estados apenas (abertos ou fechados) que são excludentes entre si. Outra propriedade neste aspecto é o fato de que os componentes da rede possuem um número reduzido de tipos básicos (barras, ramos, transformadores, disjuntores e chaves, etc.) que apresentam a mesma forma de representação para o operador. Além disto, o operador visualiza apenas uma pequena porção da rede supervisionada a cada instante. Normalmente, ele observa apenas uma região de interesse, como uma subestação, embora possua a capacidade (através de recursos de janelas, menus ou zoom) de visualizar qualquer parte do sistema. Tendo em vista estas considerações, pode-se concluir que:

- a) A quantidade de primitivas gráficas necessárias para representar todo o sistema é relativamente pequena, pois é preciso representar apenas as possibilidades de variação dos tipos básicos de componentes da rede (previamente conhecidos);
- b) A quantidade de informação a ser representada instantaneamente também é reduzida, pois o operador visualiza apenas uma parcela de interesse do sistema.

A animação conhecida tradicionalmente (empregada em cinema e vídeo) é baseada na exibição de imagens, previamente armazenadas, exibidas em seqüência. Esta técnica é conhecida por animação “frame-by-frame” e apresenta uma grande desvantagem relacionada ao fato de que todos os quadros devem ser conhecidos e gravados no computador, ocupando, desta maneira, um grande espaço no disco rígido e memória.

Já a animação no computador pode ser definida, da maneira mais genérica possível, como “uma técnica na qual a ilusão de movimento é criada representando-se na tela, ou armazenando-se em um dispositivo de gravação, uma série de estados individuais de uma cena dinâmica” [36].

Isto significa que é possível, em tempo real, visualizar na tela uma animação sem que seja necessário armazenar os quadros correspondentes à seqüência de exibição propriamente ditos, desenhando-se a tela através da realização de cálculos computacionais

dos polígonos necessários para a construção da imagem durante o intervalo entre a exibição de um quadro e outro (a velocidade de animação tipicamente empregada em cinema ou vídeo atualmente é da ordem de 25 a 30 frames por segundo) utilizando técnicas de computação gráfica. Entretanto, deve-se salientar que em centros de controle de energia elétrica mais antigos, com arquitetura computacional baseada em mainframes (um principal e um de backup), a alocação de recursos do processador para o cálculo de polígonos e componentes gráficos dos quadros para o processo de visualização pode afetar severamente o funcionamento das funções de análise de rede. Em centros mais modernos esta dificuldade já foi contornada através da alocação de estações para a realização de interfaceamento gráfico, configurando um sistema computacional separado da arquitetura do subsistema de análise de redes.

Por outro lado, a capacidade de armazenamento dos computadores vem crescendo muito nos últimos anos. É possível hoje encontrar em típicos microcomputadores pessoais, como nos quais é realizado este trabalho, discos rígidos da ordem de dezenas de gigabytes e capacidade de memória da ordem de centenas de megabytes. Pode-se, também, aumentar bastante estas capacidades de armazenamento a um custo relativamente baixo.

Além disto, com a popularização da rede mundial de computadores, a INTERNET, na qual a comunicação atual de dados relacionados à multimídia (som e imagem) representa a maior parte da demanda computacional requerida, o desenvolvimento e difusão de métodos de compactação de imagens possibilitou o aparecimento de formatos que ocupam um reduzido espaço de armazenamento.

Assim, uma vez que a capacidade de armazenamento tem aumentado bastante, aliada ao fato da difusão dos métodos de compactação de imagem, é possível o emprego tanto de técnicas de animação “frame-by-frame”, como das técnicas convencionais de computação gráfica, sem acarretar perdas de desempenho na arquitetura computacional principal. A escolha de implementação de uma ou outra técnica, ou de ambas, está condicionada ao tipo de tarefa à qual se deseja incorporar a interface, bem como aos efeitos visuais que se deseja implementar.

4.6. Modelo Conceitual de Animação

Levando-se em conta as considerações anteriores e as características do fluxo de dados entre as funções de análise de rede, pôde-se construir um modelo conceitual para o processo de animação em interfaces gráficas de visualização. Este modelo é dividido em base de dados, mecanismo de visualização e interface com o operador.

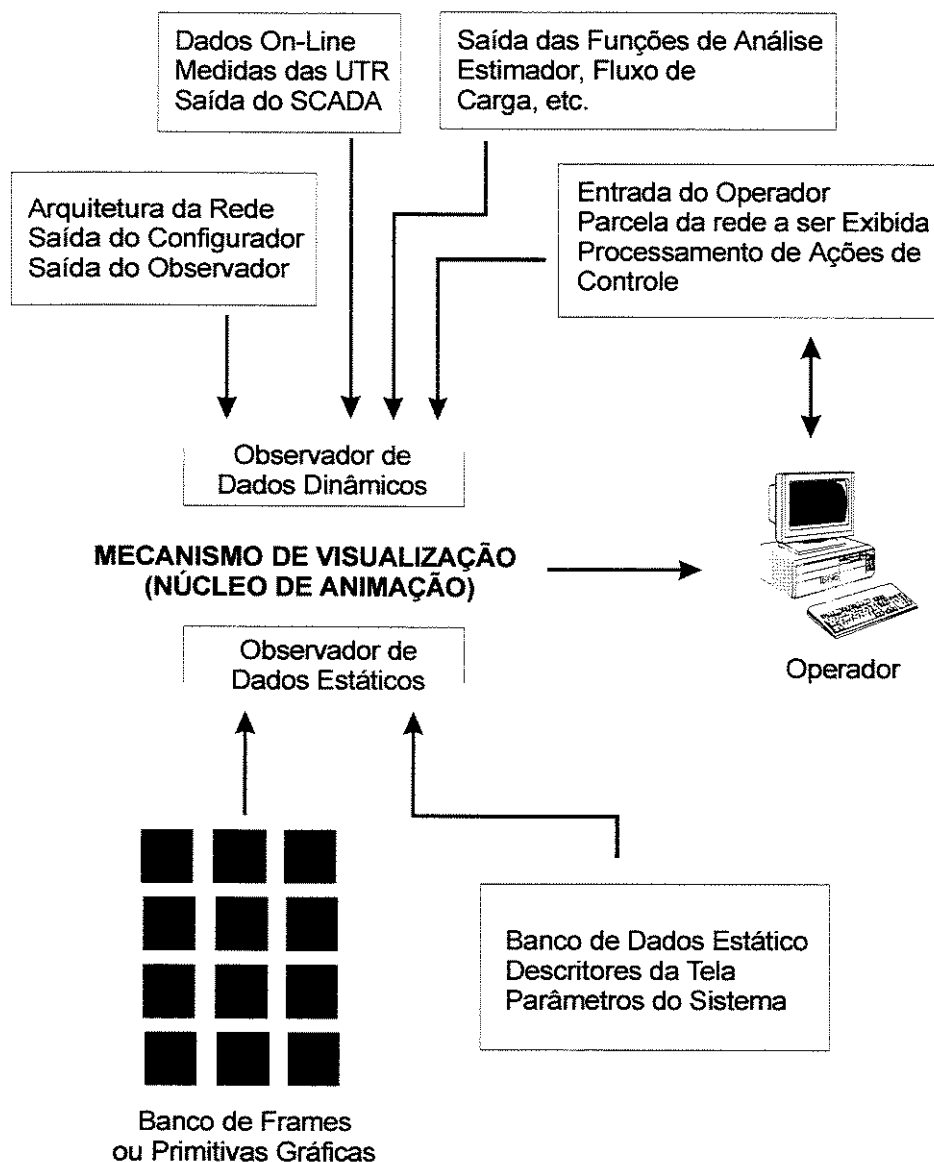


Figura 4.16: Modelo Conceitual do Processo de Animação em um Centro de Controle

A base de dados para a interface com mecanismo de animação implementado pode ser dividida em duas categorias gerais:

- a) **Dados dinâmicos para visualização:** representam os diferentes bancos de dados que alimentam as funções de análise de rede e que contém as grandezas de interesse na operação em tempo real.
- b) **Dados estáticos ou Descritores:** compreendem os bancos de dados de baixa frequência de atualização responsáveis pelo “design” da interface, isto é, que contém a localização, na tela, das informações a serem impressas ou das figuras a serem desenhadas, bem como os apontadores necessários para o processo de navegação ou zoom.

O mecanismo de visualização é responsável por interpretar os comandos que recebe da interface com o operador e então localizar as bases de dados adequadas, realizando o carregamento das informações corretas. Ele é dividido nas seguintes partes:

- a) **Observador de dados dinâmicos:** compreende um conjunto de algoritmos que são responsáveis pela coleta das informações dinâmicas junto às funções de análise de rede, convertendo-as para um formato adequado à utilização do núcleo de animação. Além disto, deve também realizar a captura de eventos do operador e o processamento necessário das ações de controle tomadas pelo mesmo.
- b) **Observador de dados estáticos:** compreende um conjunto de algoritmos que são responsáveis pela aquisição de informações pertinentes às características estáticas do quadro atual em exibição para o operador, como quantidade e tipos de figuras na tela, seu posicionamento e processamento primário da impressão dos mesmos.

- c) **Núcleo principal de animação:** compreende um conjunto de rotinas responsáveis pela coordenação temporal da exibição dos quadros para o operador, respeitando os ajustes preestabelecidos.

- d) **Mecanismo de Visualização:** compreende as rotinas que realizam o processamento gráfico propriamente dito, construindo de maneira definitiva as características principais das figuras, cores e ícones representadas na interface de visualização, através de informações e coordenação temporal dadas pelo núcleo principal de animação e levando em consideração as informações recebidas pelos observadores de dados estáticos e dinâmicos.

Finalmente, a interface com o operador tem como objetivo principal prover a este último um ambiente amigável, no qual as ações necessárias à supervisão e controle do sistema possam ser executadas de maneira mais intuitiva e confiável. É composta por um ambiente de janelas cujo aspecto depende comumente do sistema operacional executado na estação de trabalho do operador, muito embora, para aplicativos desenvolvidos segundo o conceito de sistemas abertos, as características gerais permaneçam as mesmas, conforme descrito anteriormente no capítulo 1.

Capítulo 5

Implementação e Resultados Obtidos

Nos capítulos anteriores foram abordadas técnicas para a construção de interfaces de usuário e representação de dados numéricos de um modo geral. Neste capítulo, são descritas, inicialmente, as implementações realizadas quanto à visualização de redes elétricas, para a representação gráfica de componentes, visando a aplicação em ambientes de supervisão de sistemas de energia. A seguir, é descrita a interface de usuário desenvolvida, tratando do seu funcionamento, mecanismo de aquisição de dados, características de animação e interação com o operador. Finalmente, são descritos os testes de desempenho realizados com a interface completa, utilizando-se dois sistemas elétricos: um sistema exemplo de cinco barras e o sistema IEEE-14, descritos no apêndice A.

5.1. Formas Adotadas para a Representação de Estado

5.1.1. Escalas de Cores

Na implementação realizada, foram adotadas diferentes escalas de cores para representar algumas das grandezas supervisionadas, que foram consideradas como sendo as

de maior interesse para o operador do sistema de potência baseadas nos trabalhos de Overbye [30, 39] e Christie [25, 26], dentre outros [4, 5, 11]. Estas grandezas são:

- Magnitude da tensão complexa nas barras;
- Ângulo da tensão complexa nas barras;
- Fluxo de potência ativa nos ramos;
- Fluxo de potência reativa nos ramos.

No caso da magnitude da tensão nas barras, foi implementada uma escala de cores baseada no significado desejado para cada estado, utilizando o sistema RGB. Neste caso, o conjunto de critérios adotados para a seleção das cores foi:

- Violações de tensão foram representadas por cores mais brilhantes;
- Situações normais de operação foram representadas pela cor verde;
- Sobretensões apresentam uma tendência para a cor branca;
- Subtensões apresentam uma tendência para a cor azul;
- Situações anormais (como, por exemplo, alarmes) são representadas pelas cores amarela, laranja e vermelha, que devem ser reservadas.

Neste trabalho, para uma barra com uma tensão V_{BARRA} dada em p.u., a cor de representação \mathbf{c}_B utilizada, composta por suas componentes vermelha, verde e azul (RGB), é calculada em tempo real utilizando interpolação linear, de acordo com os seguintes passos:

1. Definir as componentes (RGB) para as cores que representam os estados de operação e os seus valores correspondentes de tensão:

Tabela 5.1: Valores base para escala de cores

Estado da barra	Tensão (pu)	Vetor de componentes
Ponto de operação normal	V_N	$\mathbf{c}_N = [R_N, G_N, B_N]$
Sobretensão máxima representada	V_+	$\mathbf{c}_+ = [R_+, G_+, B_+]$
Subtensão mínima representada	V_-	$\mathbf{c}_- = [R_-, G_-, B_-]$

2. Se V_{BARRA} é maior ou igual a V_N , então:

$$K = \frac{V_{BARRA} - V_N}{V_+ - V_N} \quad (5.1)$$

$$c_B = c_N + K \cdot [c_+ - c_N] \quad (5.2)$$

3. De maneira similar, se V_{BARRA} é menor que V_N , então:

$$K = \frac{V_{BARRA} - V_-}{V_N - V_-} \quad (5.3)$$

$$c_B = c_- + K \cdot [c_N - c_-] \quad (5.4)$$

A figura a seguir apresenta a evolução das componentes RGB em função da tensão nodal para a escala padrão (de 0,8 a 1,2 p.u.) implementada nas interfaces deste trabalho:

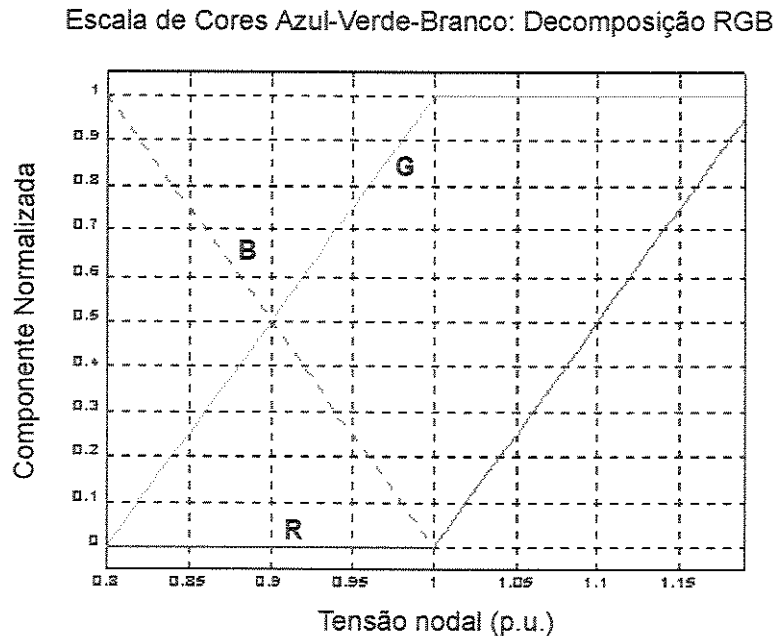


Figura 5.1: Escala de Cores Implementada

No caso da representação do fluxo de potência (ativa, reativa ou complexa) nas linhas da rede elétrica, pode-se utilizar uma escala de cores baseada na variação da

transparência, visando dar uma idéia da densidade do fluxo no ramo. Assim, conforme o aumento do fluxo, menos transparente é a representação, tornando-se mais sólida.

Para as chaves e disjuntores, dada a característica mutuamente exclusiva dos estados que podem apresentar, foram empregadas opções de representação que utilizassem cores contrárias, ou seja, complementares quanto às suas componentes vermelha, verde e azul.

Para a representação de abertura angular nos nós do sistema, do estado de equipamentos e de geradores, optou-se por simplicidade pela utilização da mesma escala empregada para o módulo da magnitude da tensão complexa nas barras. Da mesma maneira, para a representação do fluxo de corrente, pode-se empregar a mesma escala utilizada para a representação dos fluxos de potência.

Em todos os casos, foram implementadas escalas de cores do tipo escala de cinza (“gray-scale”). Isto foi feito em virtude da facilidade de cálculo de um tom de cinza, pois neste caso as componentes vermelha, verde e azul apresentam o mesmo valor, favorecendo o desempenho da interface em situações onde seja necessário visualizar apenas diferenças marcantes no quadro gráfico (como, por exemplo, quando se está interessado apenas nas violações de tensão nas barras). Nesta situação, o cálculo das componentes é dado pelos mesmos passos descritos anteriormente para escala colorida, aplicando-se a tabela a seguir:

Tabela 5.2: Valores base para escala de tons de cinza

Estado da barra	Tensão (pu)	Vetor de componentes
Ponto de operação normal	V_N	$\mathbf{c}_N = [R_N, R_N, R_N]$
Sobretensão máxima representada	V_+	$\mathbf{c}_+ = [R_+, R_+, R_+]$
Subtensão mínima representada	V_-	$\mathbf{c}_- = [R_-, R_-, R_-]$

5.1.2. Representação Textual

A representação textual das variáveis supervisionadas foi implementada, visando favorecer a interpretação numérica dos resultados, quando apresentados visualmente na tela juntamente com uma representação gráfica da rede de energia elétrica. Assim, por exemplo, os valores correspondentes às magnitudes das grandezas foram truncados, para não apresentar casas decimais em excesso, e os nomes dos seus componentes foram abreviados,

quando necessário. Entretanto, na implementação realizada, é possível verificar os dados pertinentes a um componente na sua totalidade, através da abertura de janelas de informação, que aparecem quando o componente é selecionado, clicando-se duas vezes na sua representação gráfica (ver item 5.6.3 adiante). A tabela a seguir apresenta a configuração padrão das representações textuais empregadas:

Tabela 5.3: Configuração padrão da fonte

Fonte	Arial
Tamanho	10
Cor Padrão (fundo preto)	Verde
Cor Padrão (fundo branco)	Preta
Dígitos decimais no truncamento	3

5.1.3. Medidores Gráficos Analógicos

Neste trabalho, foram implementados dois tipos de medidores gráficos, similares aos implementados por Azevedo [5, 6] e Mitsui e Christie [26]. O primeiro deles é utilizado para a representação conjunta de módulo e ângulo da tensão complexa nas barras e é construído a partir de uma circunferência preenchida por uma cor de fundo, onde uma seção angular correspondente ao ângulo da tensão que se deseja representar é preenchida por uma cor diferente. A figura a seguir apresenta uma versão ampliada deste medidor:

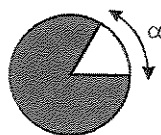


Figura 5.2: Medidor angular

Uma vez que, normalmente, as aberturas angulares dos nós da rede são relativamente reduzidas, elas podem ser normalizadas para que as seções angulares dos medidores possam ser representativas visualmente, isto é:

$$\alpha_i = K \cdot \theta_i \quad (5.5)$$

$$K \cdot \theta_i^{\text{máx}} < 2\pi \text{ radianos}$$

onde θ_i é a abertura angular da i -ésima barra da rede.

O segundo tipo de medidor implementado é utilizado para a representação do nível de carregamento nos ramos da rede elétrica. Estes medidores funcionam visualmente de maneira a simular antigos medidores de temperatura e pressão, com uma escala dada pelas cores amarela, azul e vermelha para indicar situações de baixo, médio e alto carregamento respectivamente. O ponto no qual o nível de carregamento é considerado normal corresponde ao preenchimento do medidor pela cor azul por inteiro (figura 5.3.a). Conforme a situação do fluxo no ramo se desloca deste ponto, começam a aparecer regiões de outras cores. Caso a linha esteja com pouco carregamento, uma região de cor amarela aparece a partir da parte de baixo do medidor, dando uma idéia do seu nível de “folga” (figura 5.3.b). De maneira similar, se a linha estiver muito carregada, aparece uma região de cor vermelha na parte de cima do medidor, representando a sua sobrecarga relativa ao nível considerado normal (figura 5.3.c).

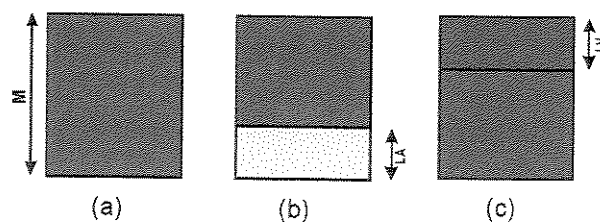


Figura 5.3: Medidor de carregamento

Pode-se definir, então, os seguintes índices:

$$\text{Folga relativa} = \frac{LA}{M} \quad (5.6)$$

$$\text{Sobrecarga relativa} = \frac{LV}{M} \quad (5.7)$$

5.2. Formas Adotadas para a Representação de Componentes

A seguir, serão descritas algumas das formas de representação implementadas para os componentes da rede elétrica e também as maneiras de representação do estado ou das variáveis supervisionadas, específicas para cada um dos mesmos.

5.2.1. Representação de Barras

Para as barras do sistema, foram adotadas as formas de representação bidimensional e tridimensional exemplificadas na figura a seguir:

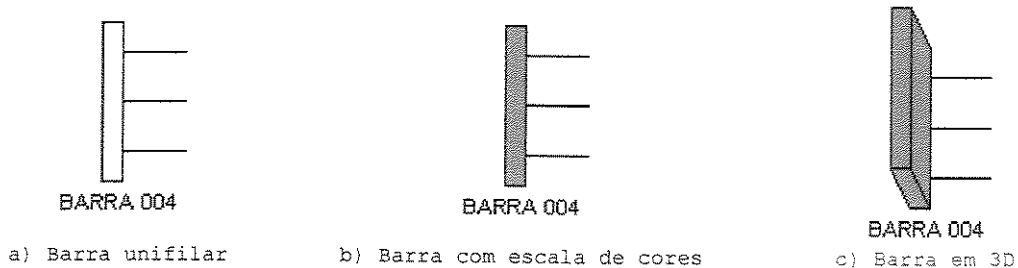


Figura 5.4: Representação adotada para barras

No caso unifilar, a magnitude e o ângulo da tensão nodal das barras do sistema são representados pela informação textual correspondente aos valores teledados. A informação correspondente ao ângulo pode ainda ser representada por um pequeno medidor angular localizado na parte superior direita da barra:

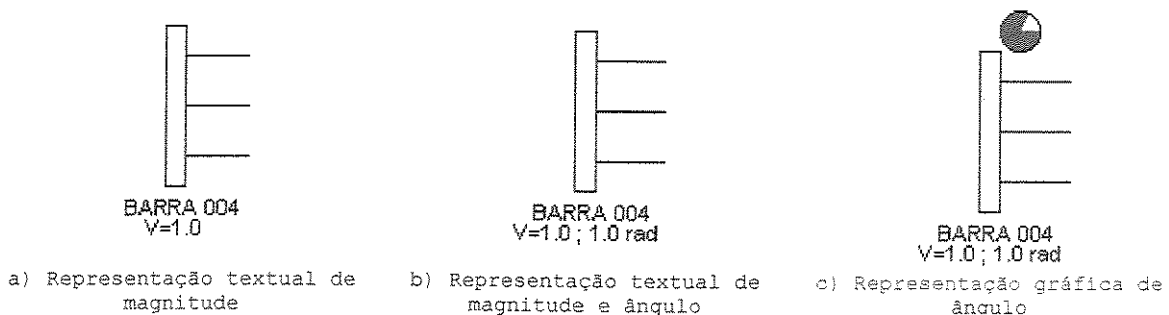


Figura 5.5: Representação de tensão nodal no caso unifilar

No caso da barra com escala de cores, a magnitude da tensão nodal também pode ser representada pela gradação visual da cor de preenchimento da barra. A figura 5.3 exemplifica um trecho de um sistema com 5 barras utilizado nos testes da interface com diferentes magnitudes de tensão nodal em três barras:

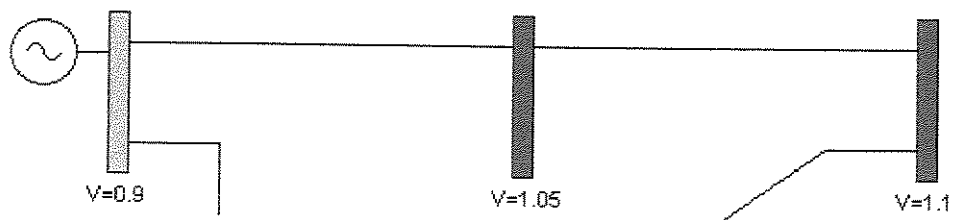


Figura 5.6: Representação de tensão nodal no caso com escala de cores

Além disto, no caso da barra em 3 dimensões, a magnitude da tensão nodal é também representada pela altura relativa da figura. A figura 5.4 exemplifica o mesmo trecho do sistema anterior com barras tridimensionais:

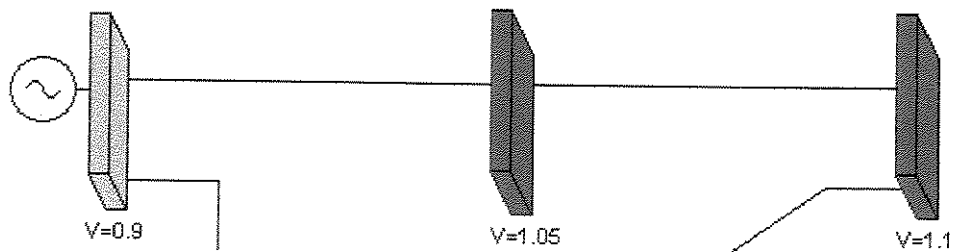


Figura 5.7: Representação de tensão nodal no caso em 3 dimensões

5.2.2. Representação de Ramos

Os ramos do sistema foram inicialmente representados na sua forma unifilar conectando dois nós.

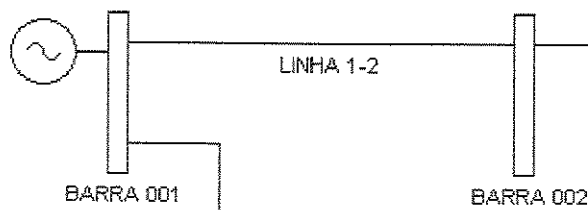


Figura 5.8: Representação de ramos no caso unifilar

Como anteriormente, também é possível representar o fluxo de potência no ramo através de seus valores telemedidos via informação textual.

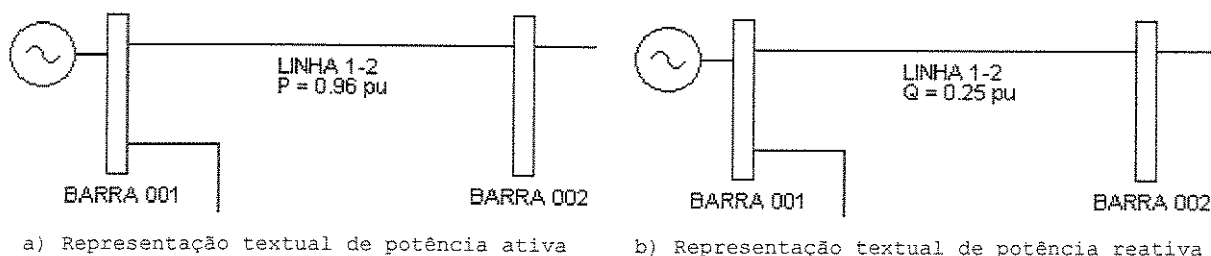


Figura 5.9: Representação textual de fluxos

Existe, ainda, a possibilidade de exibição de pequenos medidores de fluxo que interseccionam os ramos, normalmente próximos ao centro.

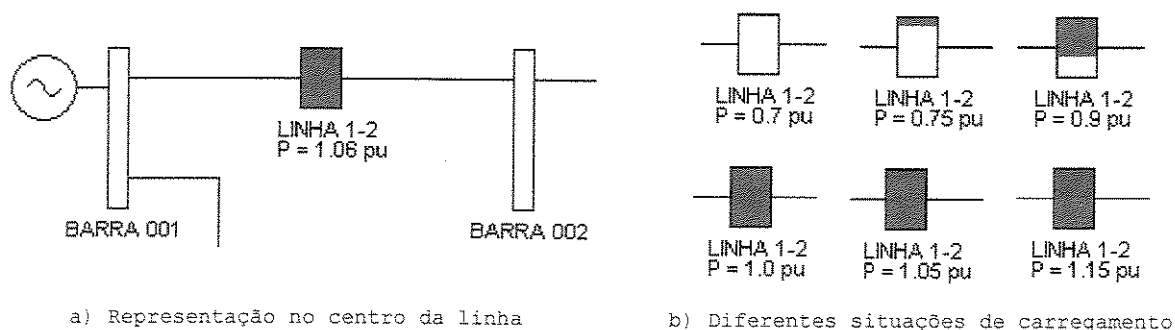


Figura 5.10: Medidores de fluxo

Pode-se, também, representar o carregamento relativo entre os ramos, aumentando-se a espessura do mesmo (ou a espessura de uma região de cor diferente em torno da linha unifilar), como implementado por Azevedo [5, 6] e Christie [25, 26].

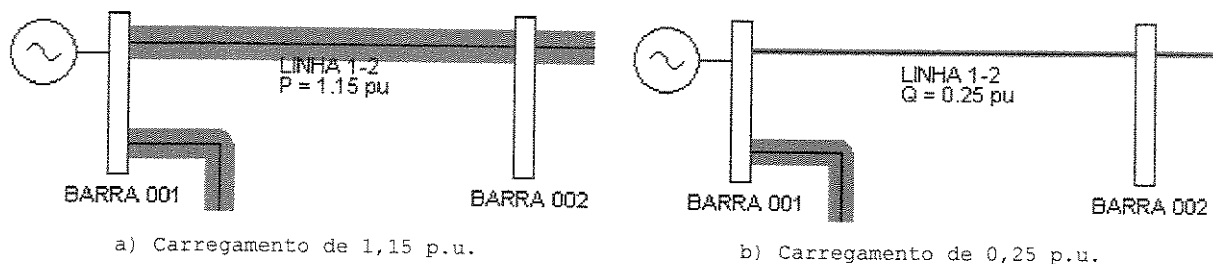


Figura 5.11: Carregamento bidimensional

Finalmente, pode-se combinar qualquer uma das representações acima com uma representação direcional para o fluxo nos ramos [25, 26]. Este tipo de representação foi implementado como uma seqüência de setas que “fluem”, através do emprego de animações, no sentido do fluxo de potência na linha.

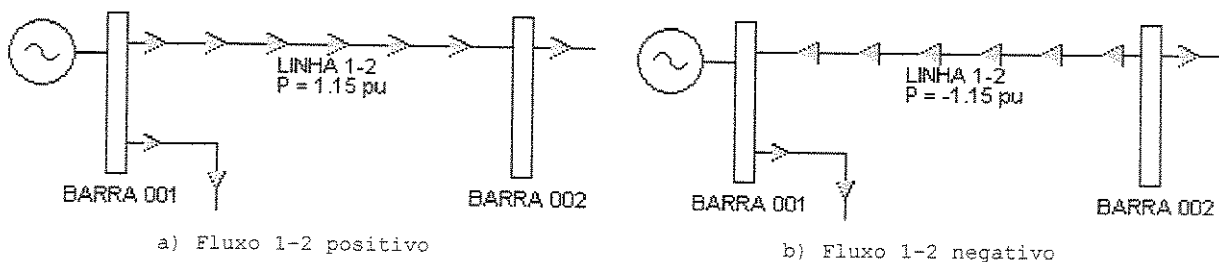


Figura 5.12: Direcionamento dos fluxos

As setas podem, também, ser representadas em três dimensões, como exemplificado na figura a seguir.

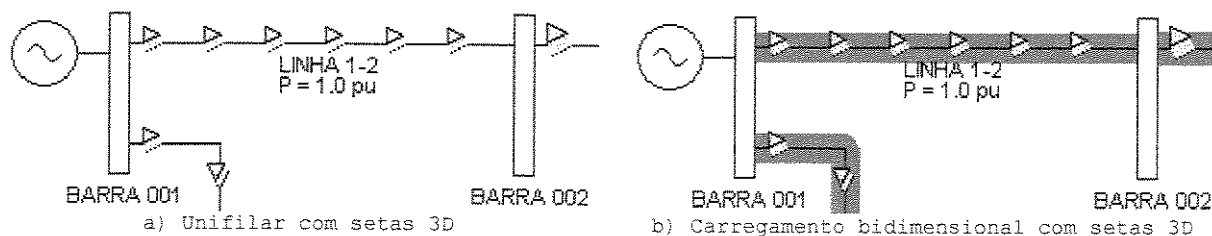


Figura 5.13: Setas tridimensionais

Além disto, o tamanho relativo das setas pode também indicar o grau de carregamento do ramo (assim como a altura da seta no caso tridimensional).

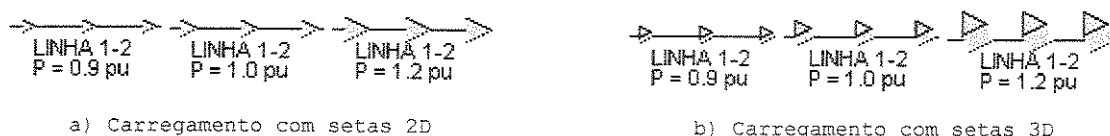


Figura 5.14: Tamanho relativo ao carregamento

5.2.3. Representação de Equipamentos

Os equipamentos da rede de energia elétrica estão implementados segundo as suas representações unifilares e possibilitam a visualização das variáveis telemedidas segundo representações textuais e da mudança de suas cores de contorno e preenchimento. Todas as implementações foram realizadas empregando-se primitivas gráficas de desenho básicas. Esta escolha está associada à maior velocidade obtida para o desenho dos componentes. A seguir, são apresentadas as representações unifilares horizontais implementadas para componentes de diferentes tipos.

A) Transformadores

Os transformadores foram implementados para representações unifilares em duas diferentes posições (horizontal e vertical) para enrolamentos do tipo delta-estrela, delta-delta, estrela-estrela e estrela-delta [1, 2, 3].

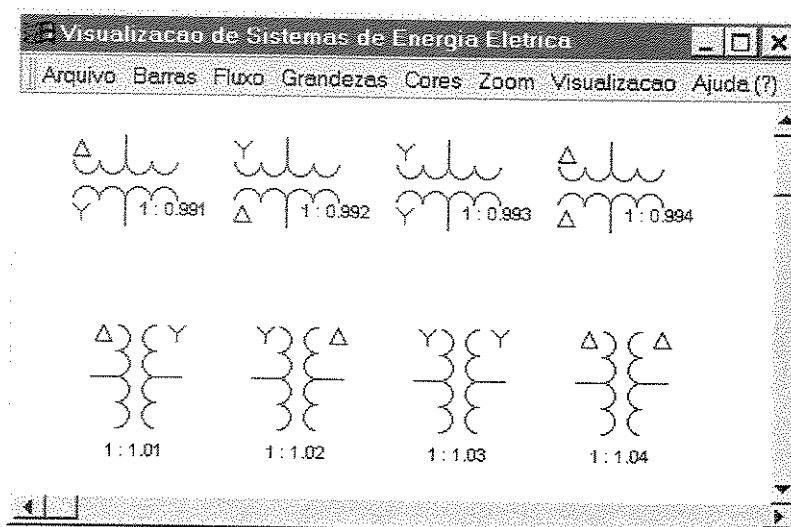


Figura 5.15: Representação de transformadores

B) Autotransformadores

Os transformadores foram implementados para representações unifilares em duas diferentes posições (horizontal e vertical) para enrolamentos do tipo delta-estrela, delta-delta, estrela-estrela e estrela-delta, e para relações de transformação de elevação ou abaixamento [1, 2, 3].

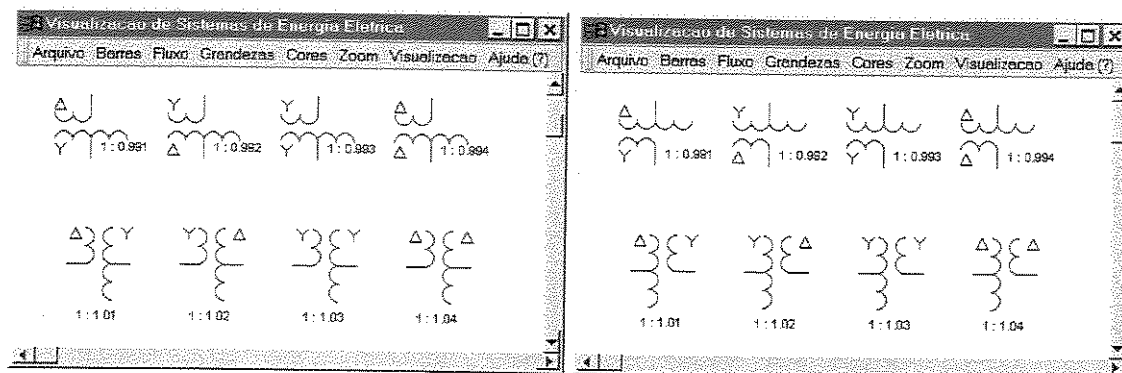


Figura 5.16: Representação de autotransformadores

C) Geradores

Os geradores foram implementados para representações unifilares em quatro diferentes orientações, podendo estar associados a barras horizontais ou verticais [1, 2, 3].

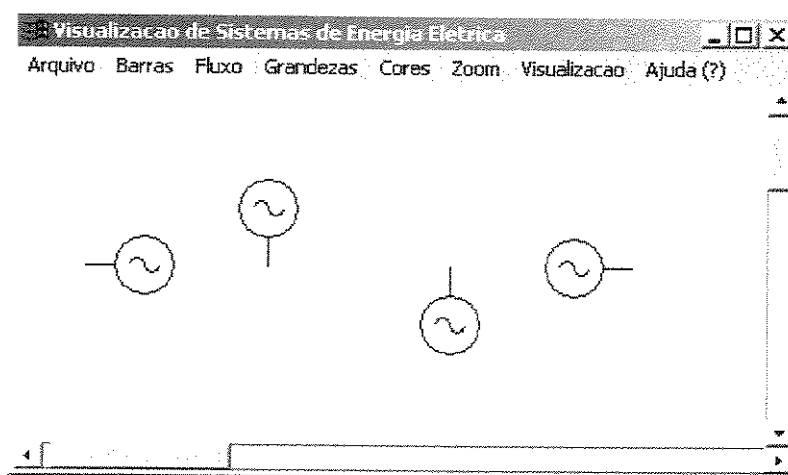


Figura 5.17: Representação de geradores

D) Chaves e Disjuntores

Os dispositivos de chaveamento foram implementados segundo suas representações unifilares, mas podem ser representados segundo qualquer ângulo de orientação, o que permite maior flexibilidade no desenho das linhas da rede elétrica [1, 2, 3].

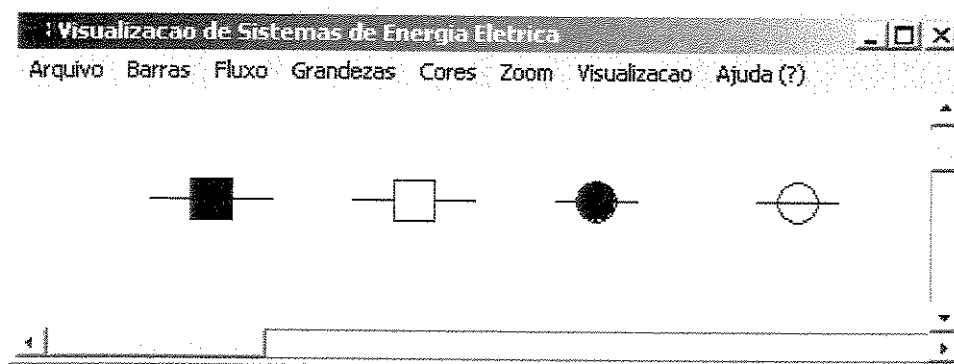


Figura 5.18: Representação de chaves e disjuntores

5.2.4. Representação da Rede Elétrica

A rede elétrica pode ser representada pela interface desenvolvida em diferentes níveis, descritos a seguir:

A) Diagrama Elétrico:

Este nível corresponde ao diagrama unifilar, que é o modo de representação de redes elétricas de potência mais difundido na área, acrescentado das opções de representação descritas anteriormente. A figura a seguir apresenta a janela principal da interface de usuário implementada, com o sistema do IEEE-14, visto na representação barras-ramos, que é o nível empregado pelas funções de análise e estudo da rede elétrica:

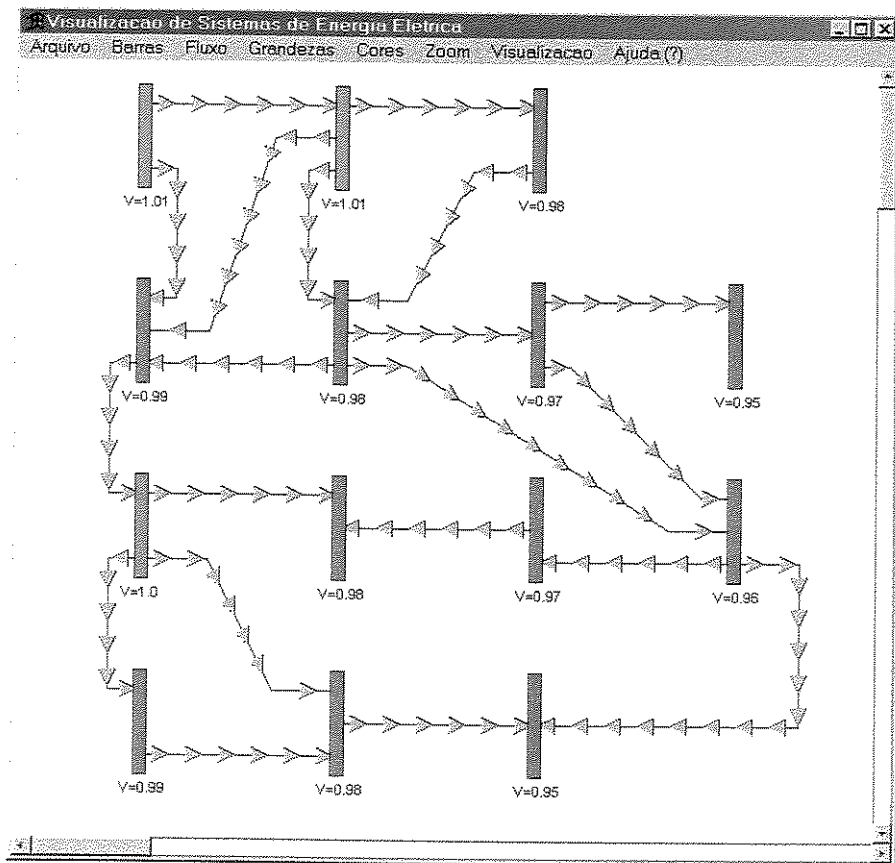


Figura 5.19: Diagrama unifilar do sistema IEEE-14

B) Diagrama Geográfico:

Este diagrama corresponde apenas à representação das barras da rede elétrica, com uma escala de cores para a magnitude da tensão, segundo uma disposição geográfica sobre um mapa simplificado da região de atuação do sistema elétrico.

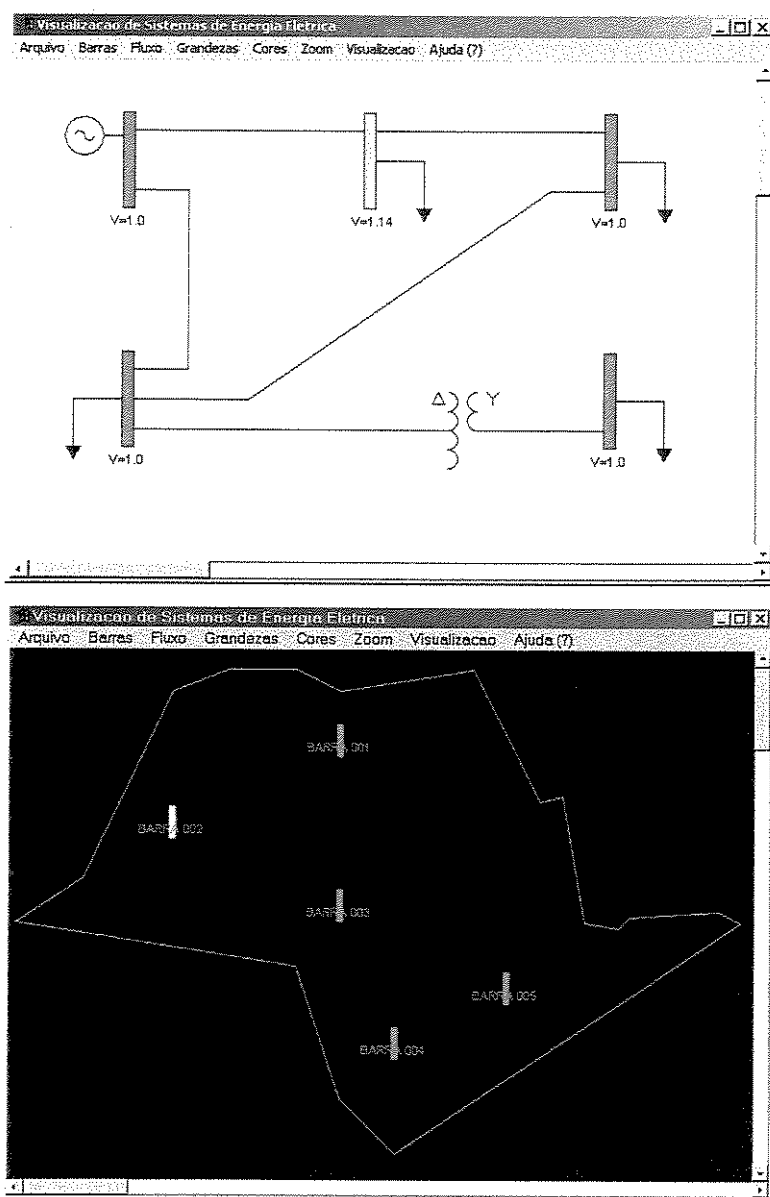


Figura 5.20: Diagramas elétrico e geográfico para a rede de 5 barras

C) Contorno Elétrico:

Outro nível de representação diz respeito à utilização de diagramas de contorno em função da tensão, levando-se em conta a posição das barras no diagrama elétrico unifilar. Conforme o trabalho de Weber e Overbye [39], estes diagramas podem ser calculados segundo uma taxa de decrescimento exponencial a partir da barra de origem, resultando em contornos que permitem identificar mais facilmente eventuais pontos de violação de tensão.

Neste tipo de desenho, é definida inicialmente uma malha de contorno, onde o espaço de desenho da interface é dividido em pequenos elementos retangulares cujo centro possui uma posição fixa com relação ao canto superior esquerdo da janela da interface. Para cada um dos elementos desta malha, é calculada a contribuição de tensão de cada barra do sistema elétrico, dada em função da distância existente entre o centro do elemento específico e o centro da barra em questão:

$$V_e = \sum_{i=1}^{NB} V_i \cdot \exp\left(-\frac{d_{ie}}{\beta}\right), \quad (5.8)$$

onde:

- V_e representa a tensão do elemento e ;
- V_i representa a tensão na barra i ;
- d_{ie} representa a distância entre a barra i e o elemento e ;
- NB é o número total de barras da rede elétrica;
- β é o coeficiente de amortecimento.

Para aumentar a eficiência da interface, pode-se amenizar a carga computacional da realização do cálculo acima para os elementos da malha, aplicando-se as seguintes restrições, descritas também em [39]:

1. Aproveitar a característica simétrica da função de decaimento exponencial, calculando a contribuição de cada barra apenas em um dos quadrantes da sua região de influência e extrapolando este resultado para os demais;

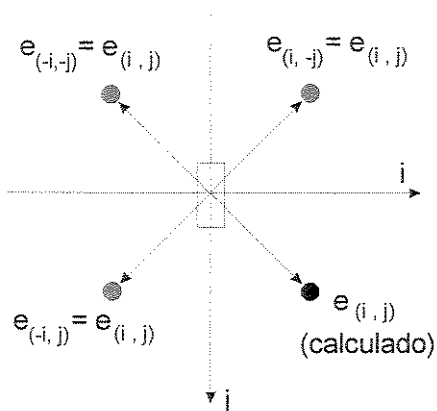


Figura 5.21: Cálculo do contorno por quadrante

2. Limitar a região de influência de cada barra, calculando sua contribuição nos elementos situados até uma distância máxima $d_{ie}^{MÁX}$.

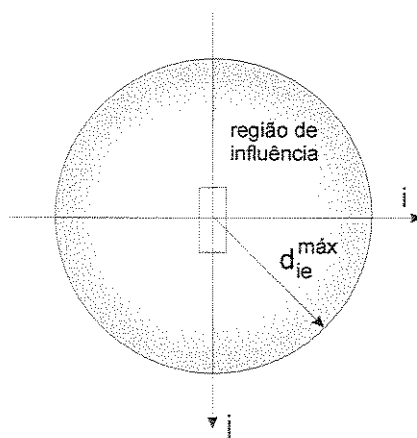


Figura 5.22: Região de influência de uma barra

A figura a seguir apresenta este diagrama para a mesma rede de 5 barras anterior, utilizando diferentes escalas de cores:

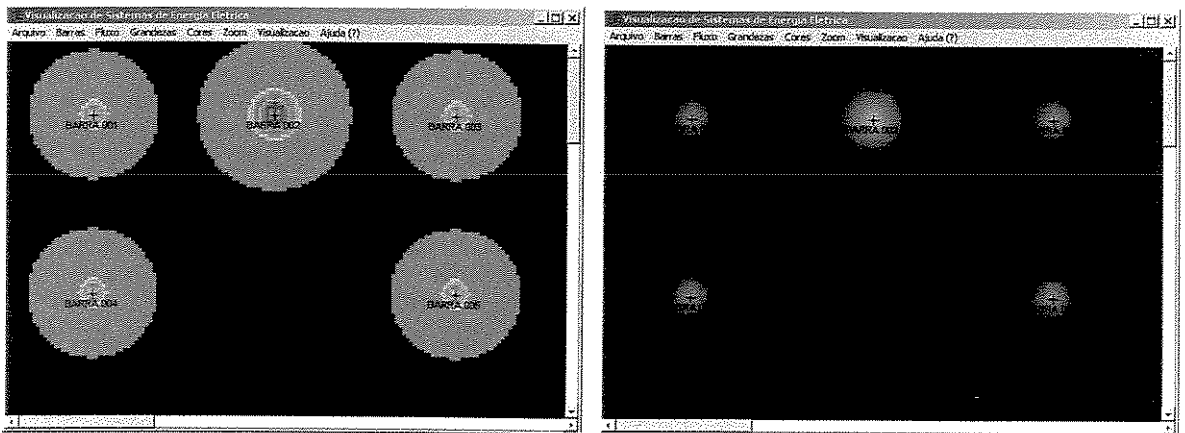
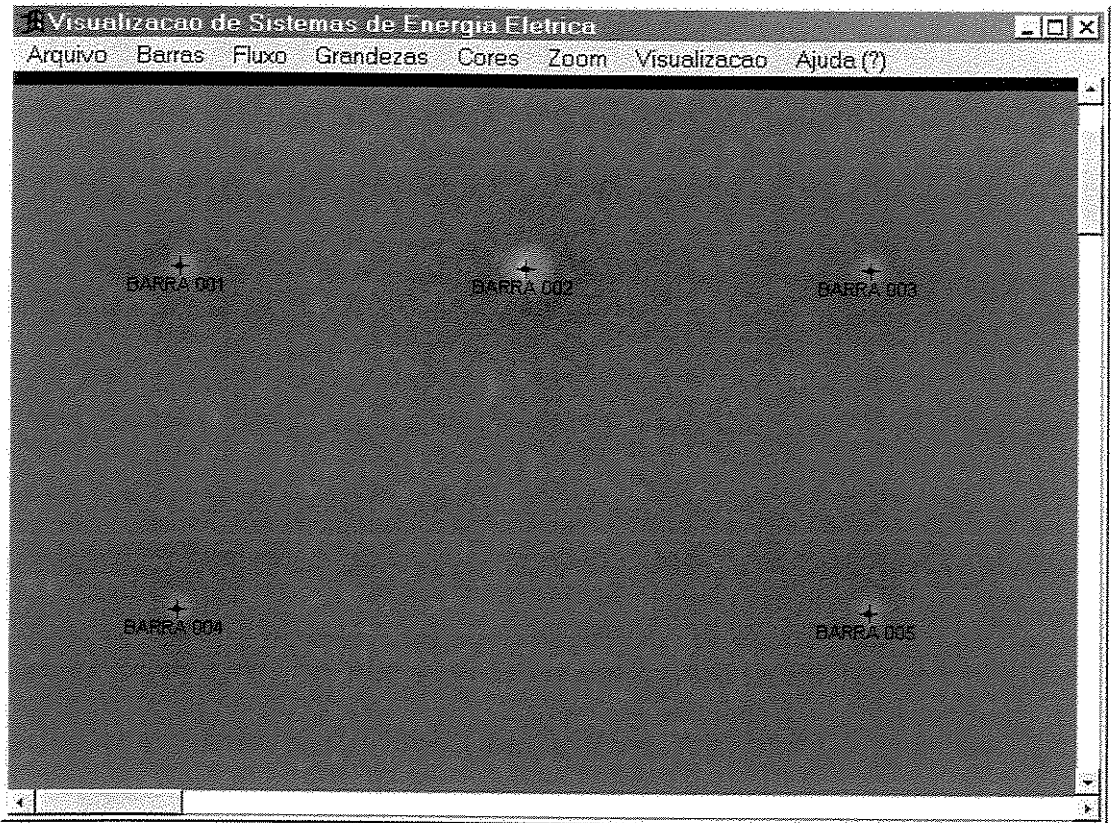


Figura 5.23: Diagramas de contorno elétrico para a rede de 5 barras

E a figura a seguir apresenta o mesmo diagrama de contorno para a rede elétrica do sistema IEEE-14:

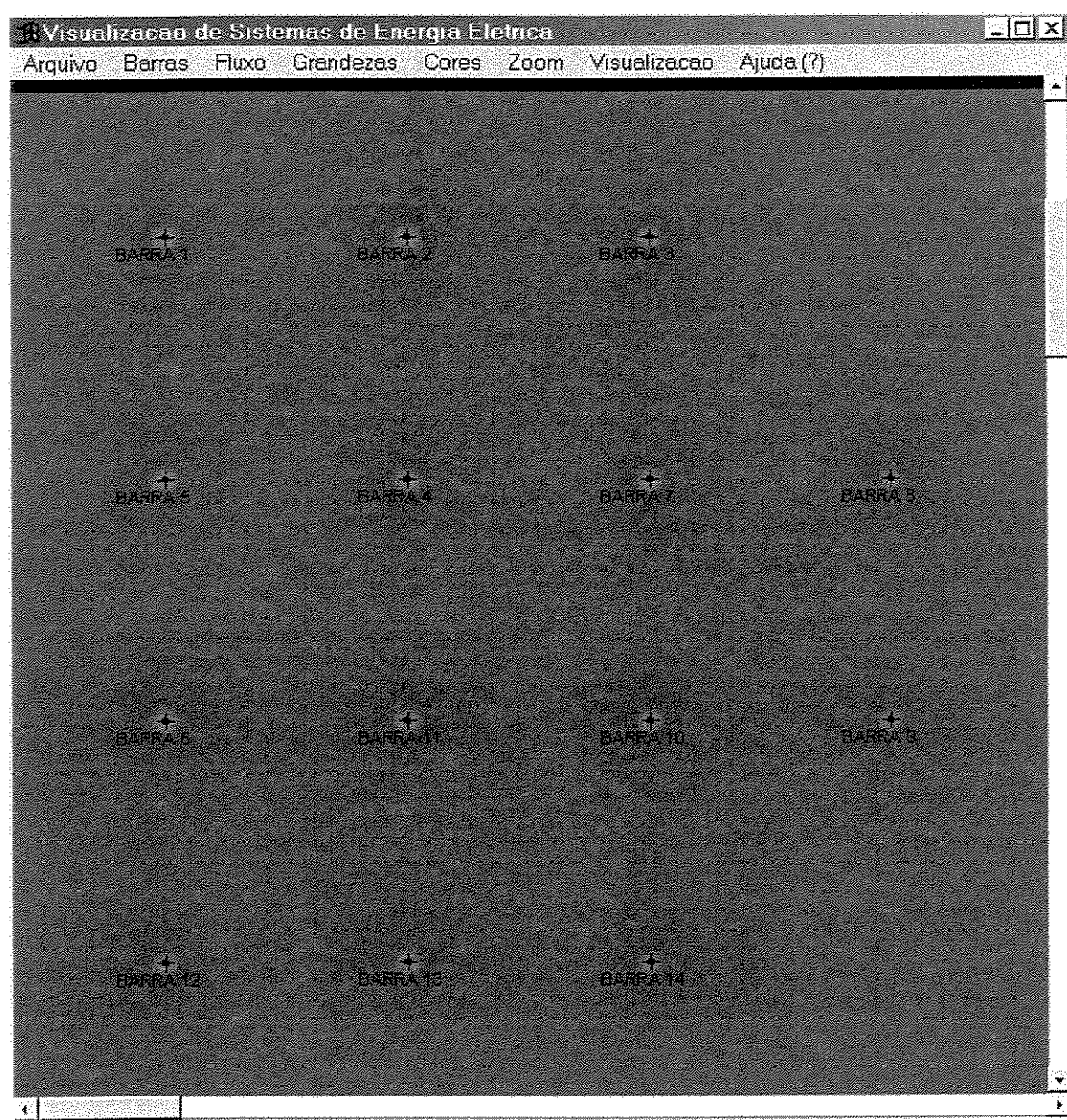


Figura 5.24: Diagramas de contorno elétrico para a rede IEEE-14

D) Contorno Geográfico:

Como o item anterior, mas agora levando-se em conta as coordenadas geográficas do sistema elétrico.

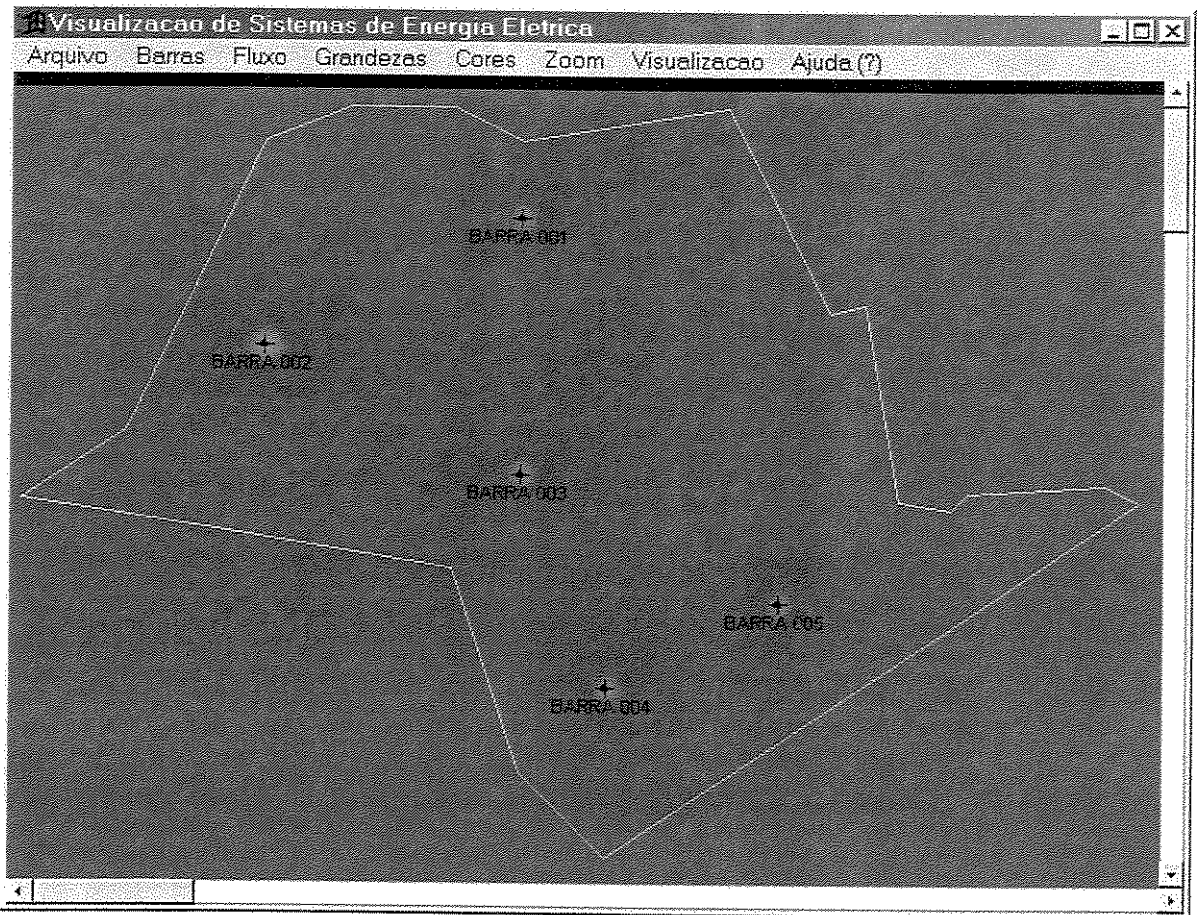


Figura 5.25: Diagrama de contorno geográfico

E) Perfil Tridimensional Elétrico:

A implementação de perfis tridimensionais foi realizada utilizando-se os mesmos resultados obtidos para o caso dos diagramas de contorno. Neste trabalho, o valor de magnitude para cada elemento foi utilizado para obter uma projeção, adaptando-se um algoritmo comumente utilizado na geração de paisagens fractais [21], conforme os passos a seguir:

1. Obtenção da malha de contorno e dos valores de tensão V_e associados a cada elemento, definido pelas coordenadas de seu centro $\{x_e, y_e\}$.

2. Escalamo da tensão de cada elemento para obter o valor da coordenada z_e associada ao centro do elemento:

$$z_e = K.V_e \quad (5.9)$$

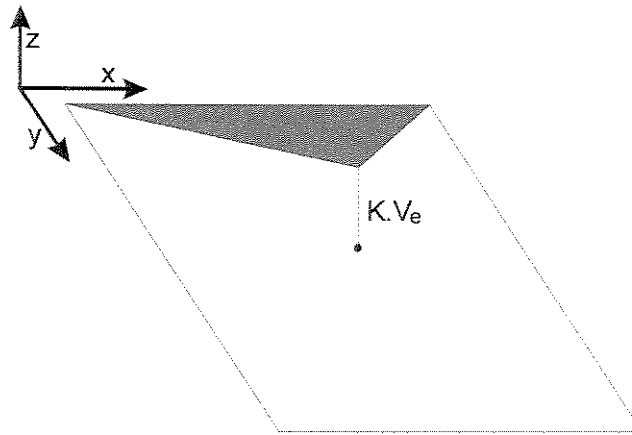


Figura 5.26: Projeção da coordenada z

3. Modificação das coordenadas do elemento, de acordo com o valor de sua coordenada z_e :

$$\begin{aligned} x_{\text{screen}} &= x_e + D.y_e \\ y_{\text{screen}} &= y_e - z_e \end{aligned} \quad (5.10)$$

4. Desenho do elemento projetado na tela.

As figuras a seguir apresentam os resultados obtidos para a rede de 5 barras, através da utilização do algoritmo de Weber e Overbye descrito anteriormente para a determinação das tensões nos diferentes nós da projeção, com diferentes definições para a malha dos elementos:



Figura 5.27: Perfil tridimensional para elementos com dimensão de 2 pixels, rede de 5 barras

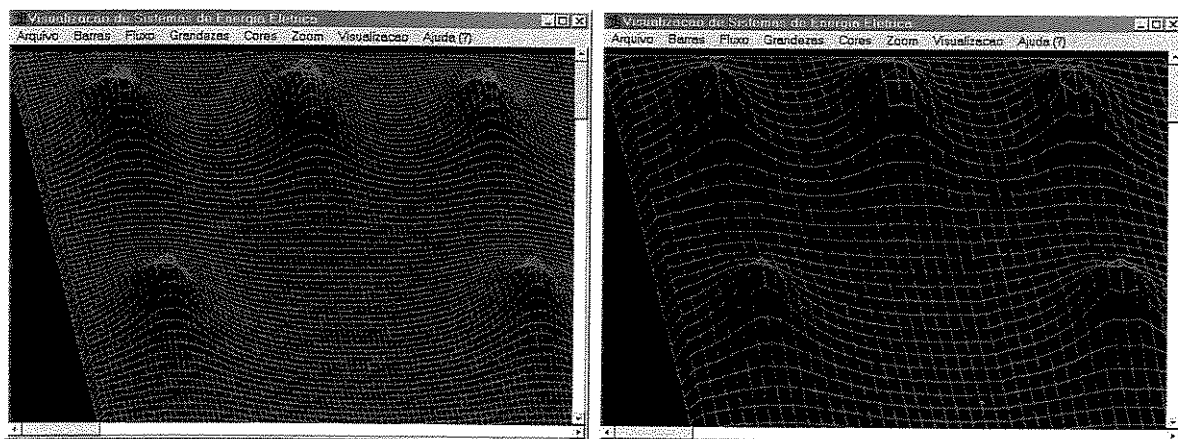


Figura 5.28: Perfil tridimensional para elementos com dimensão de 5 e de 15 pixels para a rede de 5 barras

E a figura a seguir apresenta o perfil tridimensional elétrico para a rede do sistema IEEE-14, nas mesmas condições:

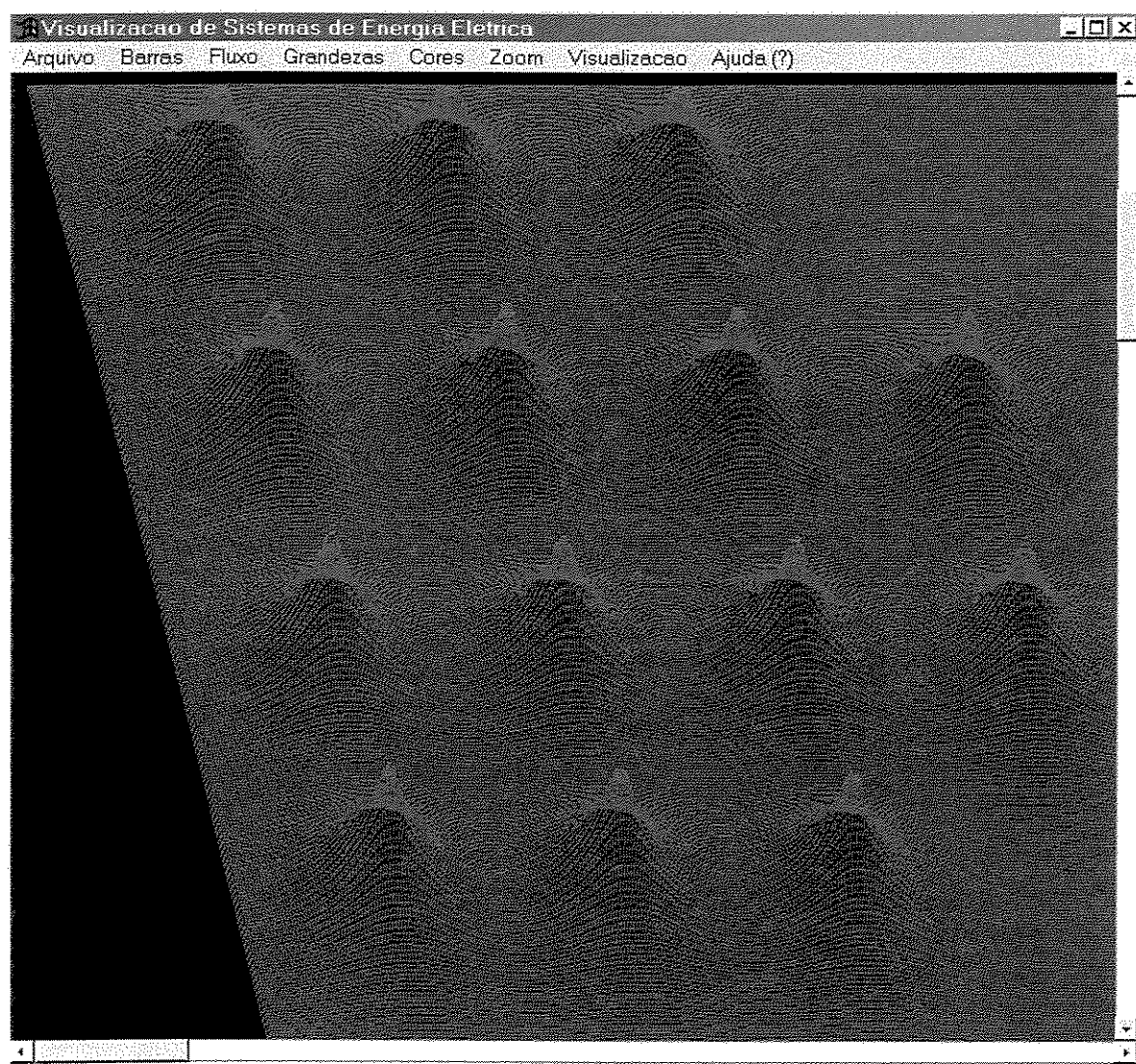


Figura 5.29: Perfil tridimensional para elementos com dimensão de 2 pixels para o sistema IEEE-14

F) Perfil Tridimensional Geográfico:

Como o item anterior, mas levando-se em conta as coordenadas geográficas do sistema elétrico para o cálculo dos elementos. A figura a seguir demonstra este tipo de diagrama para a rede elétrica de 5 barras, obtido a partir dos resultados para o contorno geográfico:

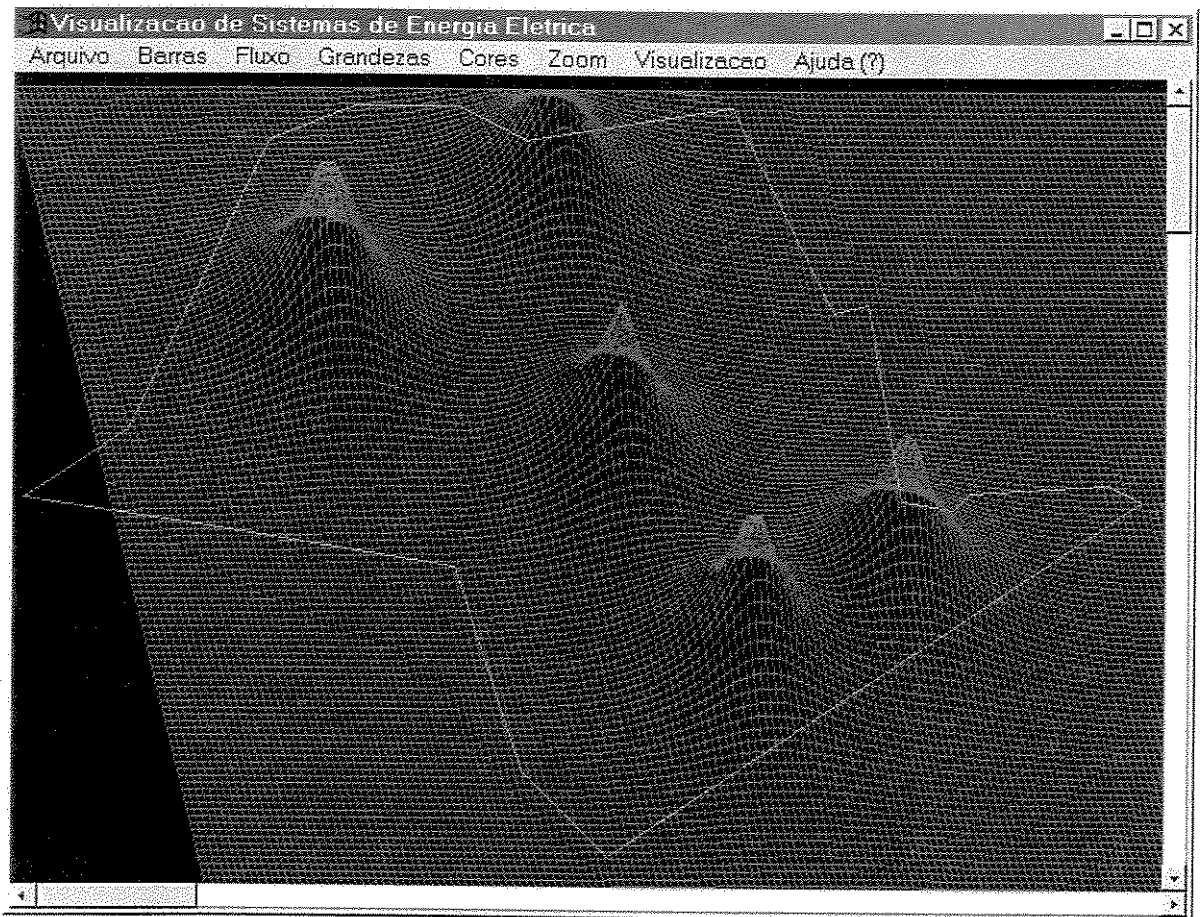


Figura 5.30: Perfil tridimensional geográfico para elementos com dimensão de 2 pixels para o sistema de 5 barras

5.2.5. Ajuste de Parâmetros na Representação da Rede Elétrica

Dos resultados obtidos no item anterior, pode-se verificar que, no caso dos perfis tridimensionais, a simples projeção dos resultados obtidos através dos cálculos de contorno, utilizando as expressões de decaimento exponencial relacionado à distância, não traz contribuições significativas para o operador no tocante à análise do estado da rede. Observando as figuras 5.29 e 5.30, pode-se perceber somente que nos pontos especificados para as barras do sistema existe ou não tensão, sendo difícil avaliar tanto a sua magnitude quanto a diferença relativa entre as barras.

Para contornar esta dificuldade e explorar melhor a capacidade de representação da rede elétrica com estes perfis, é possível realizar o ajuste dos parâmetros envolvidos tanto no cálculo das tensões nos nós dos elementos da malha de contorno quanto na projeção tridimensional. Estes parâmetros e a sua influência na representação final estão descritos a seguir:

A) Coeficiente de amortecimento β :

O coeficiente de amortecimento controla a taxa de decrescimento da tensão na vizinhança associada a uma barra, no cálculo das tensões associadas aos centros dos elementos da malha de contorno. Este parâmetro pode tornar o perfil geral bastante abrupto ou suave, dependendo do seu valor.

B) Distância de influência máxima $d_{ic}^{MÁX}$:

A distância de influência máxima, no cálculo das tensões de contorno, controla a quantidade de elementos da malha afetada pela tensão de uma barra. Este parâmetro deve ser ajustado em conjunto com o coeficiente de amortecimento, para que a intersecção entre diferentes regiões de influência não ocasione o aparecimento de perfis espúrios pelo acúmulo de contribuições das barras da rede elétrica. Neste trabalho, uma estimativa automática da região de influência média de cada barra é calculada pela expressão:

$$d_{ic}^{MÁX} = \frac{\sqrt{h.L}}{2.N} \quad (5.11)$$

onde:

- h é a altura da janela em pixels;
- L é a largura da janela em pixels;
- N é o número de barras visíveis na tela;

C) Fator de Escalamento K:

O fator de escalamento K controla a altura relativa das projeções tridimensionais. Através do ajuste deste parâmetro, os perfis tridimensionais podem se tornar mais proeminentes, mas passam a ocupar também um espaço de desenho maior na tela gráfica.

D) Ajuste das Tensões dos Elementos:

É possível normalizar as tensões dos elementos em torno de um valor escolhido pelo usuário. Neste caso, no cálculo do perfil tridimensional, são empregados valores de tensão diferentes dos calculados para os elementos na malha de contorno, obtidos através da expressão:

$$z_e = K \cdot (V_e - V_{\text{médio}}) \quad (5.12)$$

onde:

- z_e é a coordenada z associada ao elemento;
- K é o fator de escalamento;
- V_e é a tensão associada ao centro do elemento;
- $V_{\text{médio}}$ é o valor médio de ajuste da tensão dos elementos.

E) Fator de Deslizamento D:

O fator de deslizamento controla o deslocamento da projeção dos elementos na direção horizontal. O ajuste deste parâmetro muda a perspectiva com a qual o operador visualiza a projeção, podendo variar desde o valor nulo, quando temos uma vista superior, até valores elevados (dependendo da resolução da tela), quando a projeção torna-se truncada e indefinida.

As figuras a seguir apresentam alguns resultados obtidos para o ajuste independente de parâmetros. Inicialmente, vamos considerar o sistema IEEE-14 com o perfil de tensão demonstrado no diagrama unifilar abaixo:

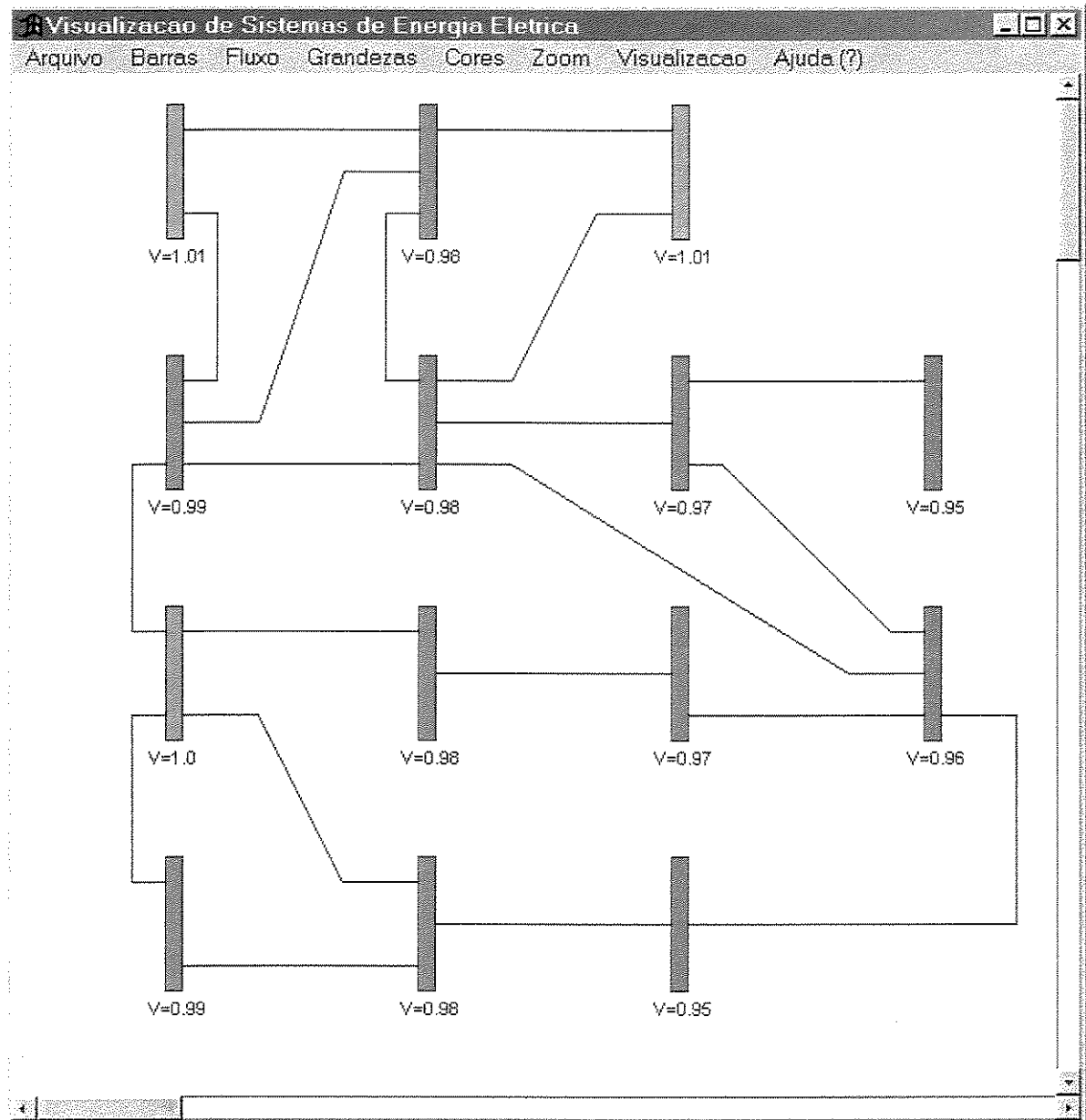


Figura 5.31: Estado da Rede IEEE-14

Ajustando os componentes de tensão em torno de 1 p.u. e realizando um escalamento das componentes obtidas, tem-se como resultado o perfil representado na figura a seguir:

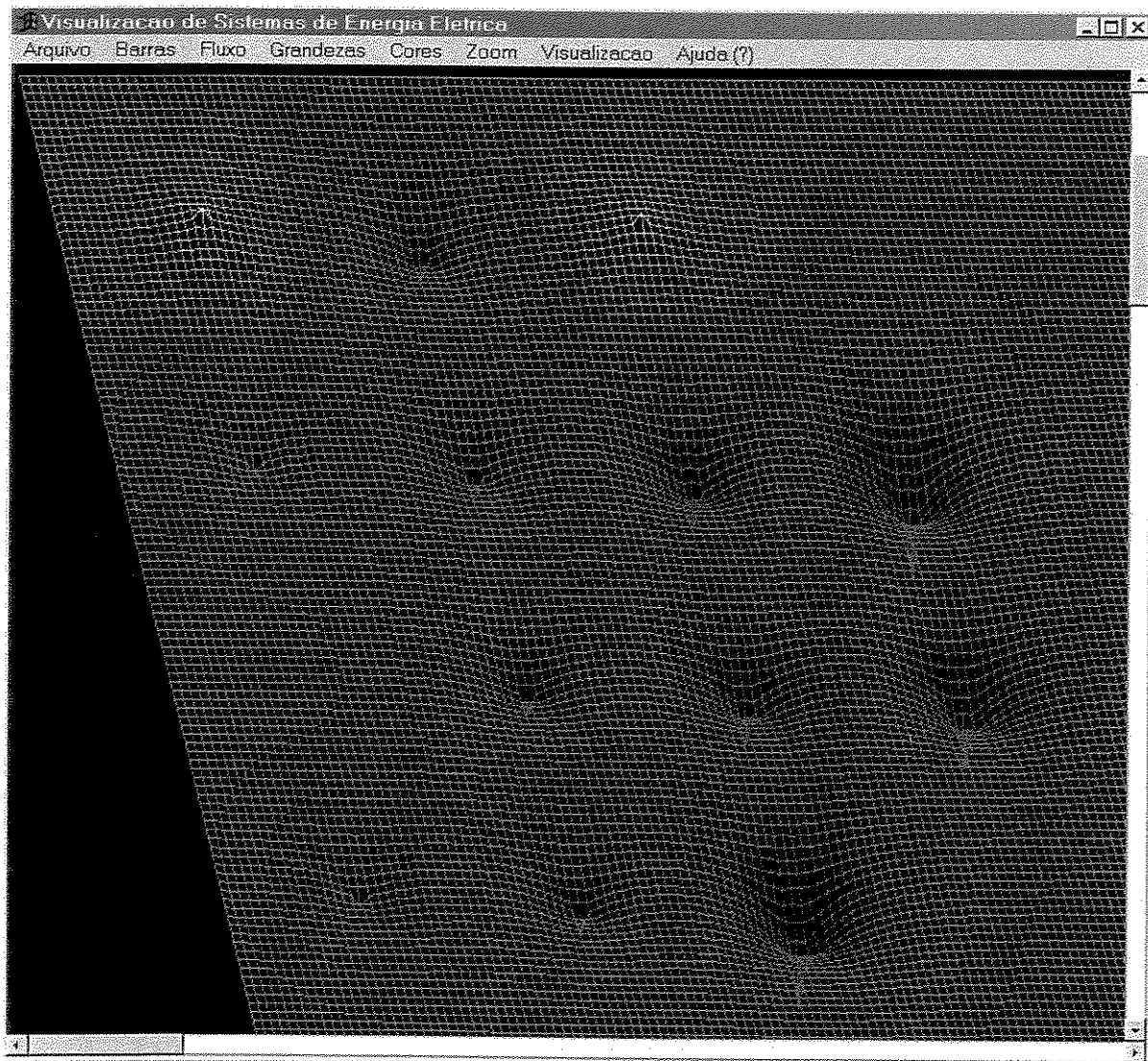


Figura 5.32: Perfil Tridimensional ajustado para a rede IEEE-14

Pode-se observar neste tipo de representação a facilidade em identificar as barras com tensão superior e inferior a 1 p.u. e também de se realizar uma estimativa do quanto a tensão nodal se afasta da condição média e do seu estado com relação às demais barras. As figuras a seguir apresentam este tipo de representação para a rede de 5 barras:

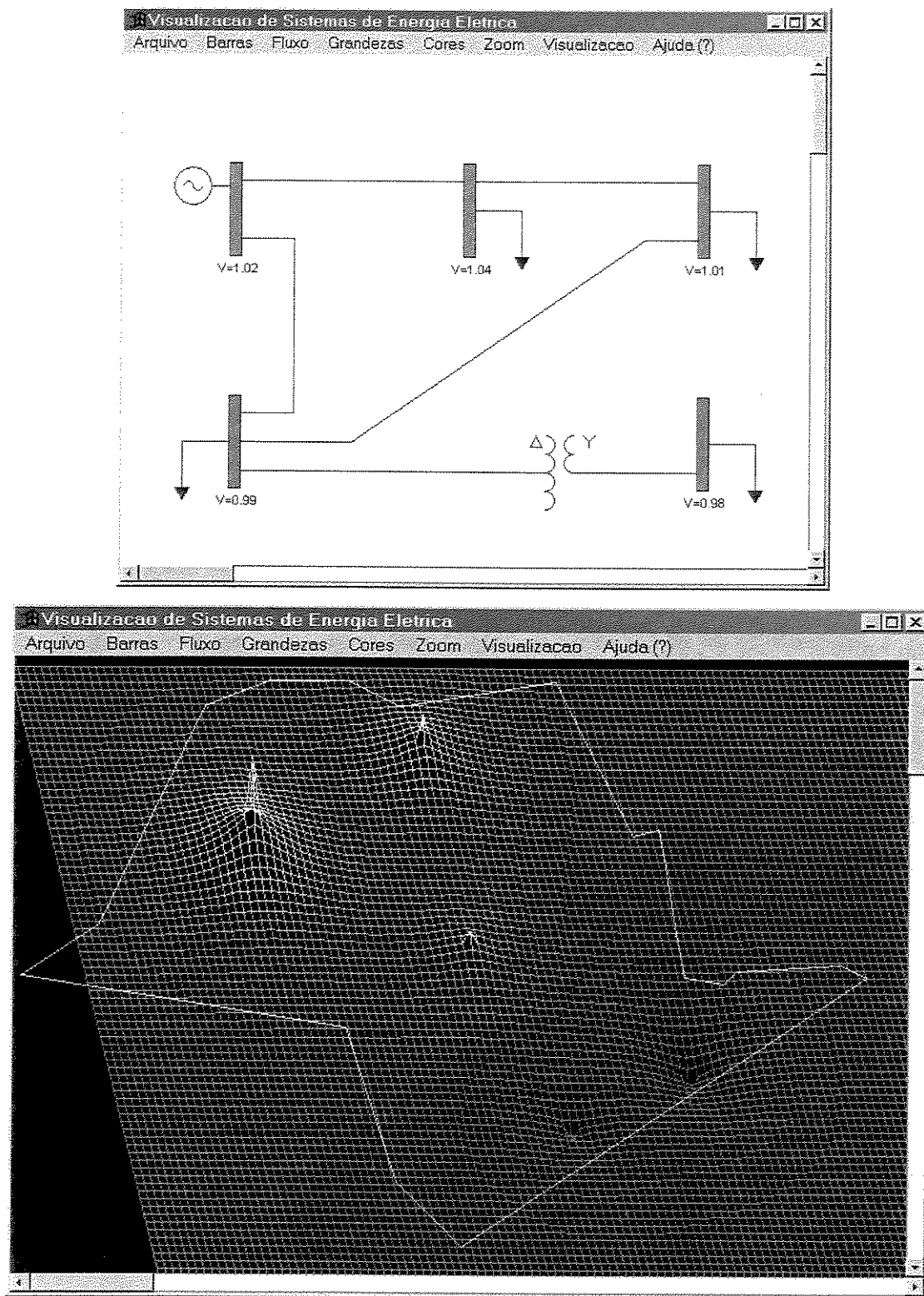


Figura 5.33: Perfil Tridimensional Geográfico ajustado para a rede de 5 barras

A seguir, ajustando-se o coeficiente de amortecimento para um decaimento suave, tem-se um perfil do sistema IEEE-14, gerando uma superfície:

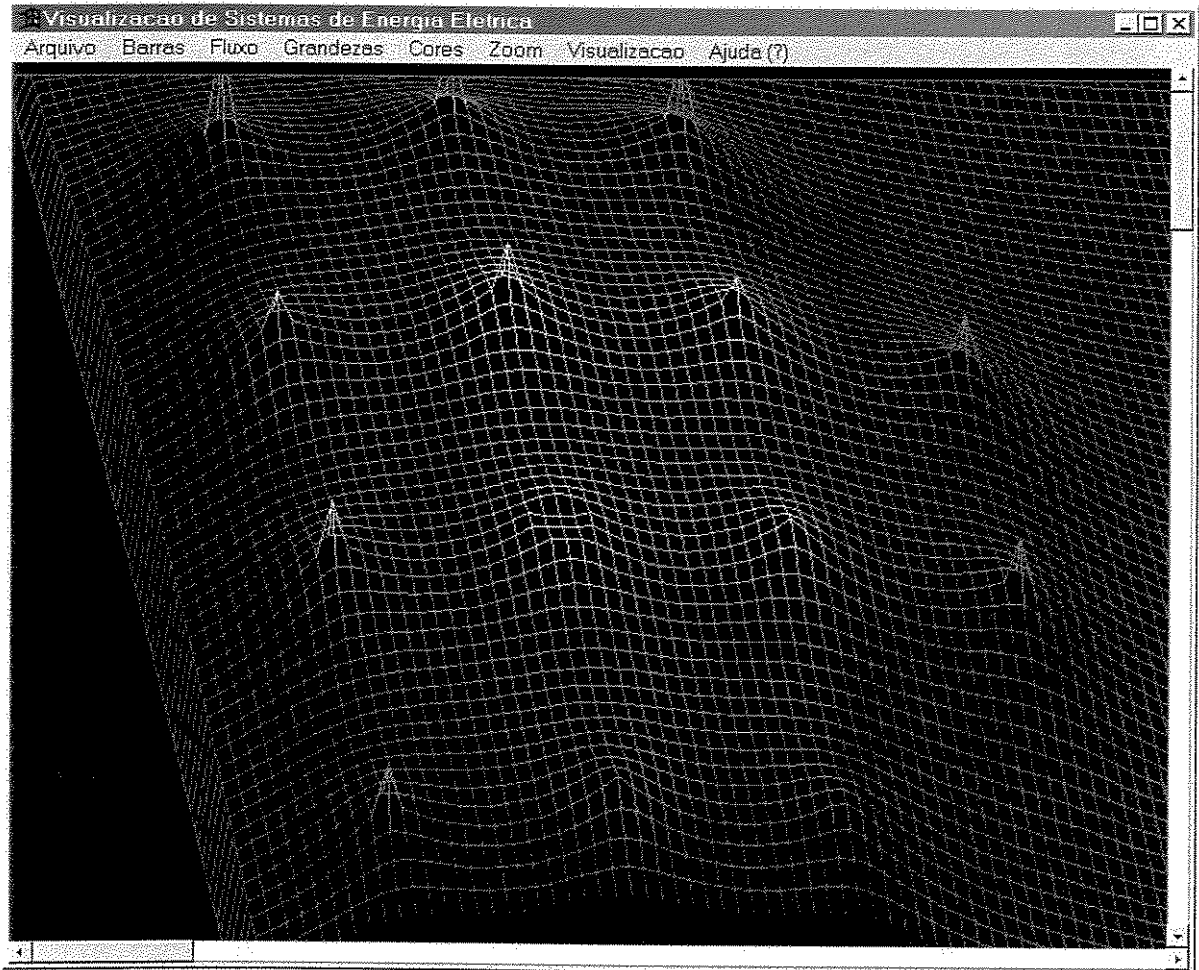


Figura 5.34: Perfil suave para a rede IEEE-14

Neste tipo de representação é possível inferir o estado relativo entre as barras através do formato da superfície que interpola as mesmas, podendo evidenciar as regiões onde existe uma tendência à queda de tensão. Mais ainda, é possível detectar imediatamente regiões não atendidas, como demonstrado na figura a seguir, onde três das barras do sistema possuem tensão quase nula:

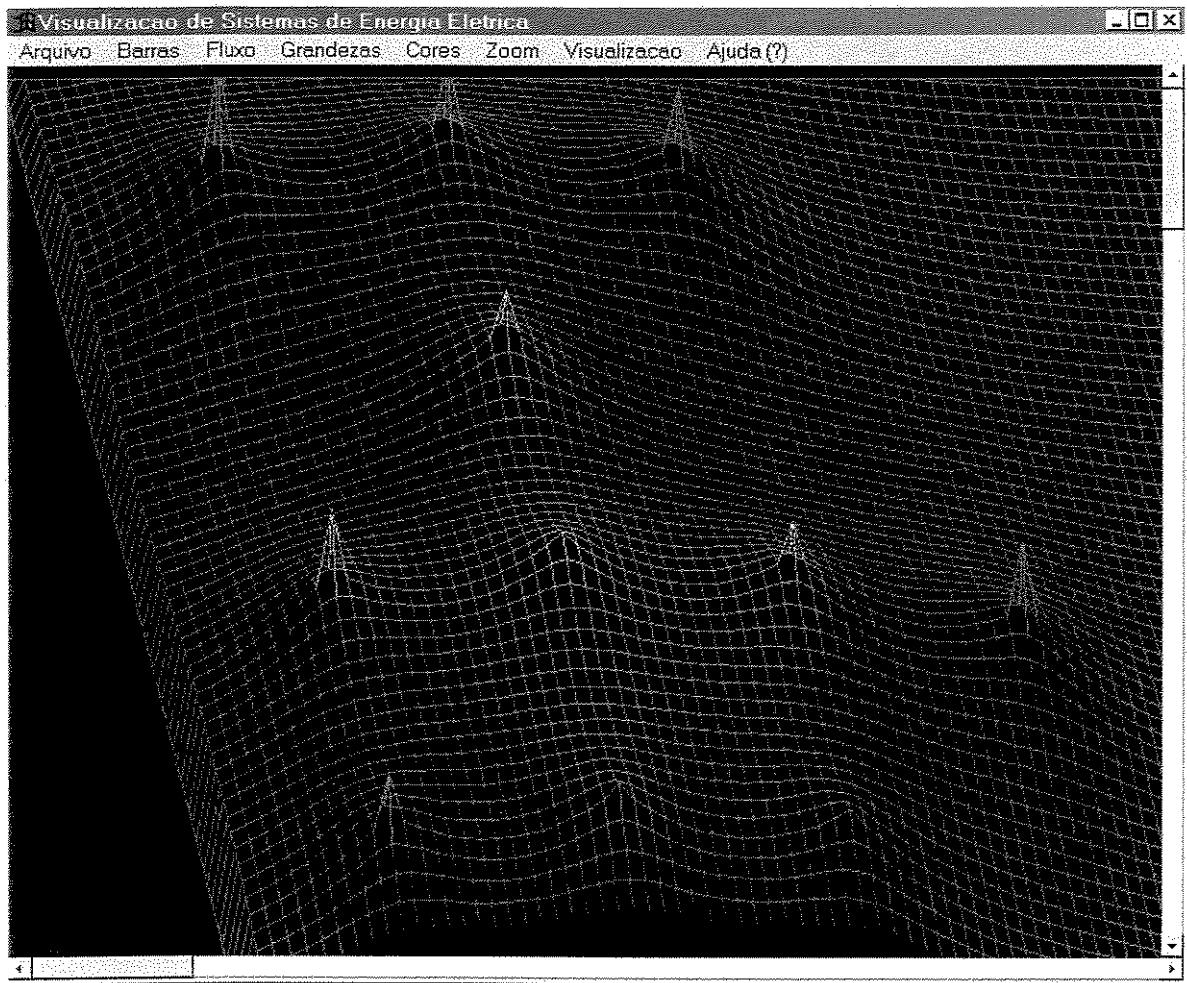


Figura 5.35: Tensão reduzida em 3 barras

5.3. Projeto Orientado a Objetos

Neste trabalho, o projeto das classes que compõem a interface foi realizado visando otimizar o processamento e execução das rotinas que realizam desenhos e são responsáveis pela parte gráfica da rede elétrica em estudo. Isto foi feito através do instanciamento do menor número possível de objetos para realizar as operações de interfaceamento gráfico, visando a redução do espaço em memória e do tempo necessário para realizar os métodos inerentes a cada objeto, durante o ciclo de vida da interface. Em muitos casos, também optou-se pela deterioração parcial da propriedade de encapsulamento, implementando os objetos segundo uma interface pública e permitindo o acesso direto aos seus atributos, sem

a necessidade de invocar um método próprio, com o objetivo de aumentar o desempenho da interface. Um exemplo de interação entre os objetos obtidos a partir dos modelos ao final da etapa de projeto (ver apêndice B) para os componentes de desenho da rede elétrica está descrito a seguir:

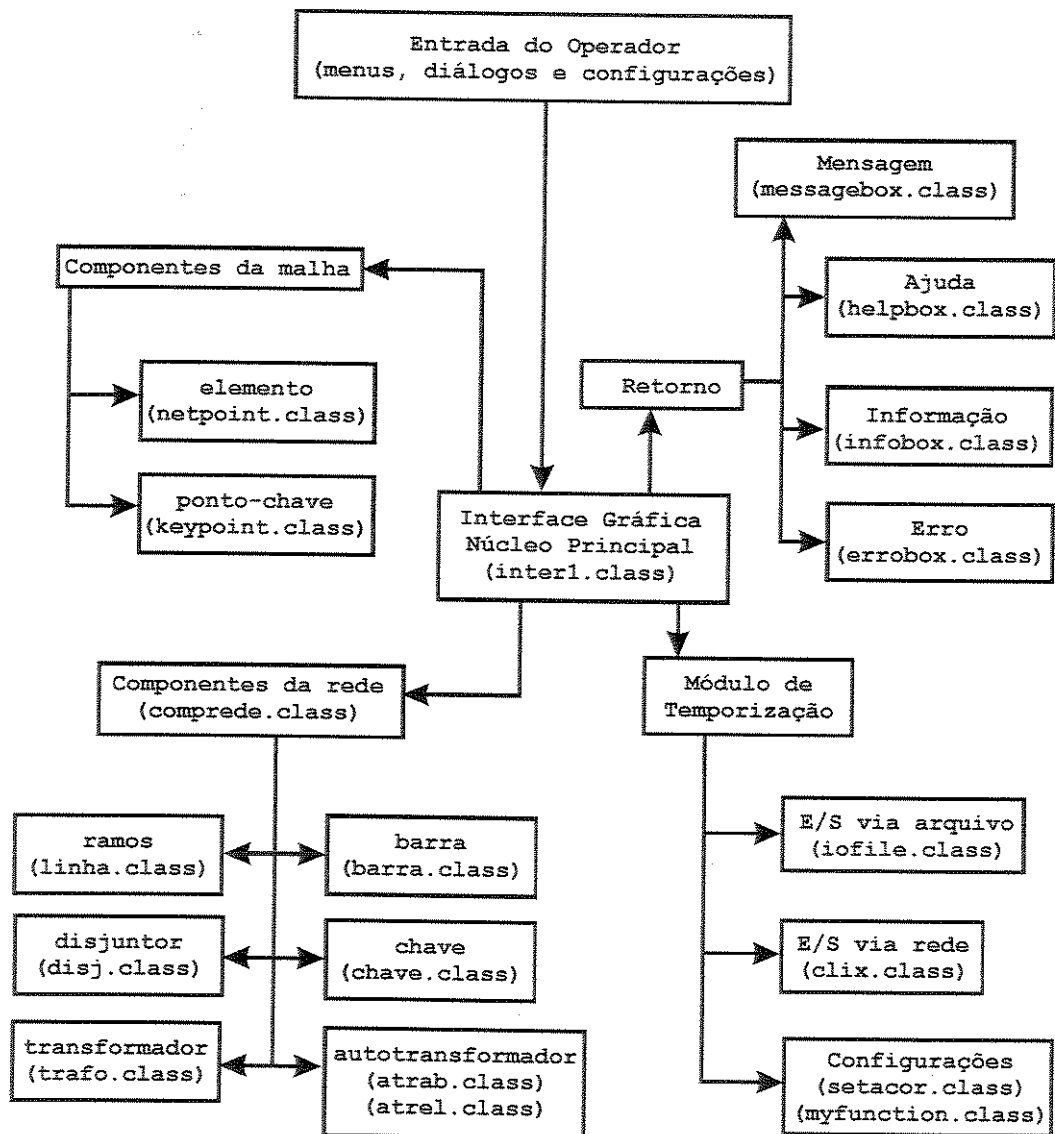


Figura 5.36: Interação entre objetos

5.4. Mecanismo de Animação Implementado

A interface desenvolvida conta com um núcleo de animação que utiliza recursos como o emprego de canais auxiliares para realizar a temporização e atualização no processo de exibição seqüencial dos quadros para animação e o emprego de buffer duplo, para reduzir os efeitos de oscilação visual (“flickering”) resultantes da ineficiência em se atualizar os quadros na tela. O processamento principal da interface é constituído por uma seqüência de ações responsáveis pelo carregamento das configurações e variáveis do ambiente, tomadas a partir do instante da inicialização do programa, seguida por um estágio de espera pelas ações do usuário. Este procedimento é representado na figura a seguir:

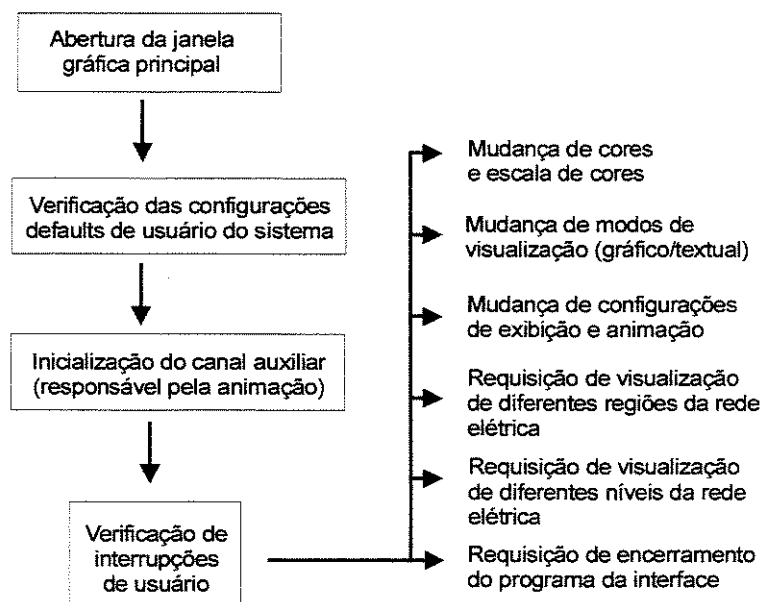


Figura 5.37: Processamento principal da interface

5.4.1. Utilização de Canal Auxiliar

Para a implementação do mecanismo de temporização entre os quadros foi utilizado um canal auxiliar, que realiza a ativação temporizada dos mecanismos de atualização. Este

fato não acarreta problemas ao andamento dos processos, pois o canal é dependente do processo principal, sendo automaticamente encerrado quando a interface é finalizada. Este canal pode apresentar diversos níveis de prioridade e foram obtidos resultados satisfatórios mesmo quando operando em prioridade mínima. O processamento do canal auxiliar pode ser representado pela figura a seguir:

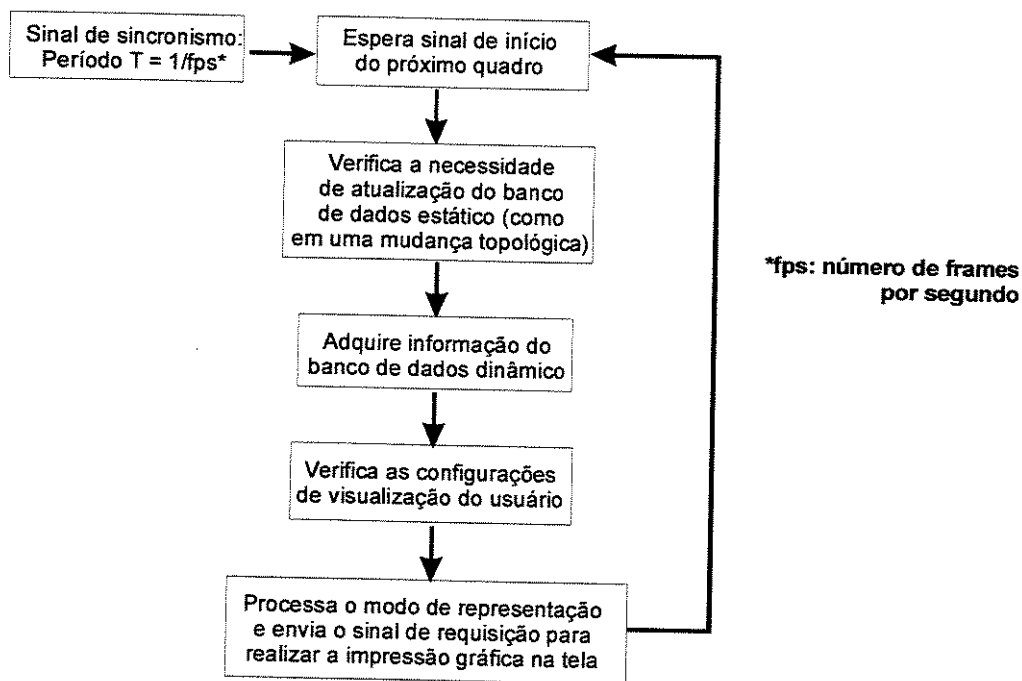


Figura 5.38: Processamento do canal auxiliar

5.4.2. Buffer Duplo

Esta técnica consiste na utilização de um buffer de memória para substituir a impressão das imagens diretamente no vídeo. As vantagens que ela apresenta são:

- a) O tempo necessário para a impressão de todas as representações gráficas correspondentes aos equipamentos e grandezas monitoradas do sistema elétrico sob

supervisão é diminuído drasticamente, uma vez que o acesso a um buffer de memória requer um tempo bastante inferior que o acesso direto ao vídeo.

- b) Elimina o efeito de “flickering”, oscilação visual causada pela baixa eficiência na atualização dos quadros na tela.
- c) Com o ganho de tempo na atualização dos quadros, é possível realizar a atualização de quadros a uma taxa superior, permitindo a obtenção de animações com uma maior qualidade visual.

A figura a seguir representa o processo de impressão de imagens em um buffer duplo similar ao implementado na interface deste projeto:

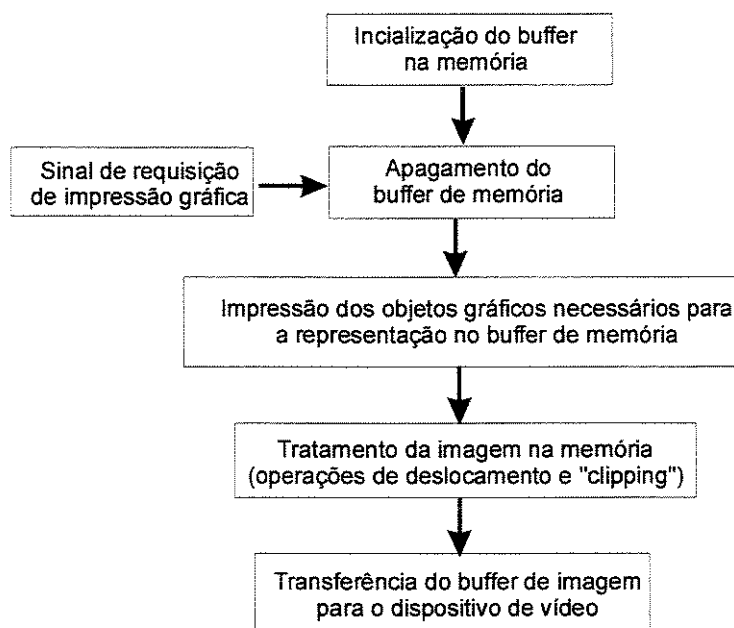


Figura 5.39: Impressão em buffer duplo

5.5. Bancos de Dados

Neste trabalho, foram implementados mecanismos para o reconhecimento de dados, de três diferentes maneiras:

- a) Informações de um único caso estático armazenado, como aquelas obtidas de uma única varredura passada do sistema de telemedição ou da simulação da rede elétrica através de uma FAR;
- b) Uma seqüência de casos estáticos, correspondentes à organização temporal de dados históricos, isto é, medidas previamente armazenadas de um conjunto de varreduras do sistema de telemedição ou obtidas das FARs;
- c) Informações em tempo real provenientes do SCADA ou das FARs.

Os bancos de dados necessários para a interface são compostos através de observadores de dados, que acessam as informações provenientes de uma das três fontes descritas anteriormente e as reagrupam em um formato padrão reconhecido pela interface.

5.5.1. Visualização de um Único Caso Estático

Neste caso, a aquisição da informação pela interface é feita preferencialmente através de arquivos de dados representando os bancos estático e dinâmico. Estes arquivos são do tipo texto, podendo ser editados pelo usuário ou construídos a partir de algoritmos da maioria das linguagens de implementação computacional utilizadas atualmente na área de engenharia, como o C, C++ ou FORTRAN.

As informações estáticas presentes no arquivo de entrada correspondem aos componentes da rede elétrica a ser representada (seu número e tipo), suas coordenadas gráficas para o dispositivo de visualização (no caso, a tela) e a representação padrão desejada (por exemplo, com ou sem escalas de cores). O arquivo correspondente ao banco de dados dinâmico descreve as grandezas monitoradas para os componentes da rede, embora neste caso estas grandezas não mudem com o passar do tempo. Foi adotado também um terceiro arquivo, de configuração, contendo informações sobre a identificação e localização dos arquivos anteriores, de forma a facilitar a interação com o usuário.

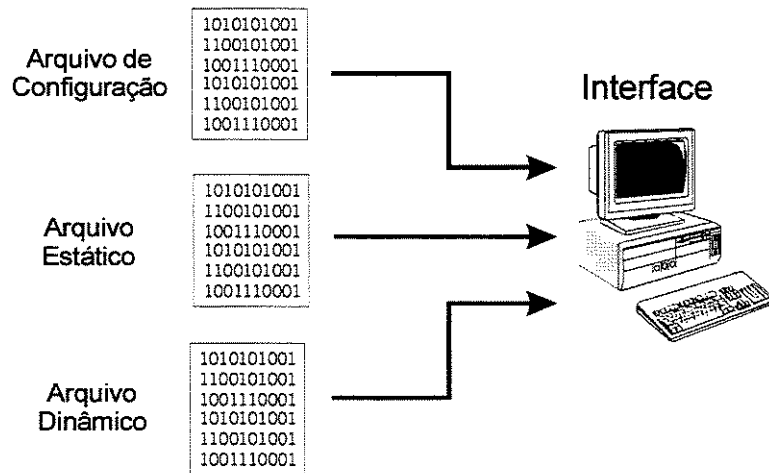


Figura 5.40: Visualização de caso estático

5.5.2. Visualização de Dados Históricos

Neste caso, a aquisição da informação pela interface também é feita através de arquivos de dados do tipo texto representando os bancos estático e dinâmico, podendo, como anteriormente, ser editados pelo usuário ou construídos a partir de algoritmos computacionais. A diferença aqui é que as informações dinâmicas da rede observada têm a sua evolução no tempo determinada a partir de uma seqüência de arquivos históricos.

Uma vez adquiridos os dados históricos, o núcleo de animação realiza uma interpolação linear entre as variáveis observadas para a rede elétrica durante o tempo compreendido entre as amostras armazenadas. O resultado final é visualizado como uma evolução linear e contínua do sistema, apresentado em uma escala de tempo ajustável pelo usuário, ao invés de mostrar apenas a sucessão discreta dos arquivos históricos.

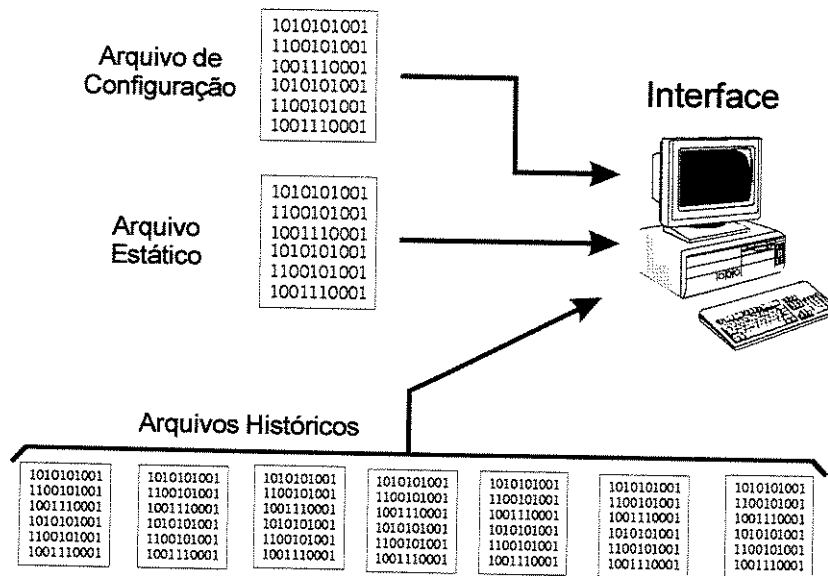


Figura 5.41: Visualização de dados históricos

5.5.3. Informações em tempo real

Neste caso, a aquisição da informação foi implementada de duas maneiras:

- Através de arquivos de dados, como nos casos anteriores.
- Através de uma conexão de rede, sendo alimentada por outros processos.

Na primeira situação, o mecanismo de funcionamento assemelha-se muito à situação de representação de um único caso estático, com a interface atuando também através de arquivos de dados do tipo texto representando os bancos de dados e onde o arquivo correspondente ao banco dinâmico é sobrescrito freqüentemente pela rotina responsável pelo envio dos dados dinâmicos. Neste caso, podem ocorrer problemas de sincronização entre a aquisição dos dados do arquivo pela interface e a escrita de novos dados pelo aplicativo dinâmico, causando a perda de quadros na exibição e limitações na taxa de frames exibidos por segundo. A grande vantagem deste tipo de aquisição dos dados é a sua facilidade de implementação. A figura a seguir ilustra este mecanismo:

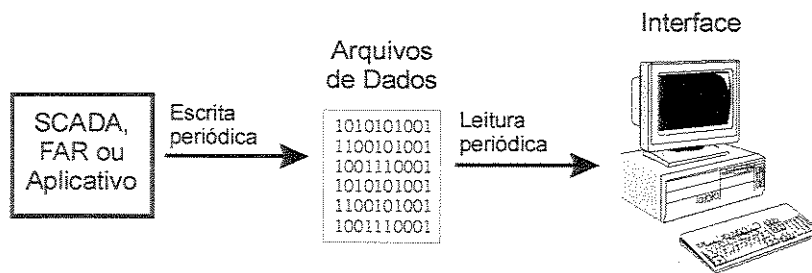


Figura 5.42: Visualização através de escrita de arquivos

Na segunda situação, a interface comunica-se diretamente com o aplicativo responsável pelo envio dos dados (estáticos e dinâmicos) através de uma conexão de rede, segundo uma arquitetura do tipo cliente-servidor. Assim, os problemas referentes ao sincronismo nas trocas de informação e velocidade de exibição são eliminados, mas, em contrapartida, a implementação das rotinas de comunicação é mais trabalhosa e delicada. A figura a seguir exemplifica este caso:

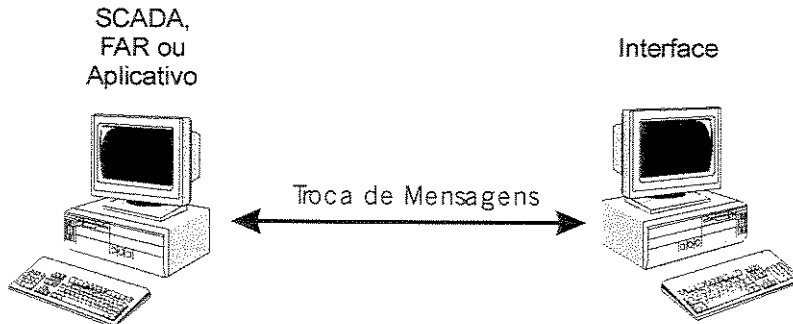


Figura 5.43: Visualização através de comunicação de processos

5.5.4. Detalhamento dos Observadores de Dados

Os observadores de dados foram implementados utilizando uma formatação padrão para os bancos de dados estáticos e dinâmicos. No caso de leitura dos dados para visualização diretamente de arquivos armazenados na própria estação de trabalho do operador, estes observadores já estão totalmente incorporados às rotinas da interface

desenvolvida, bastando realizar o acesso aos arquivos através das caixas de diálogo padrão, conforme o caso que se deseja visualizar.

Já no caso de comunicação entre processos, a interface possui apenas as rotinas que possibilitam sua conexão a um observador remoto, na condição de cliente. Nesta situação, é necessário incorporar à função de análise de rede ou de estudo, que será a fonte de informações, um aplicativo servidor para enviar os dados para a interface. A figura a seguir ilustra este caso e apresenta as telas dos observadores que servem como servidores da interface gráfica para os testes realizados com o sistema IEEE-14:

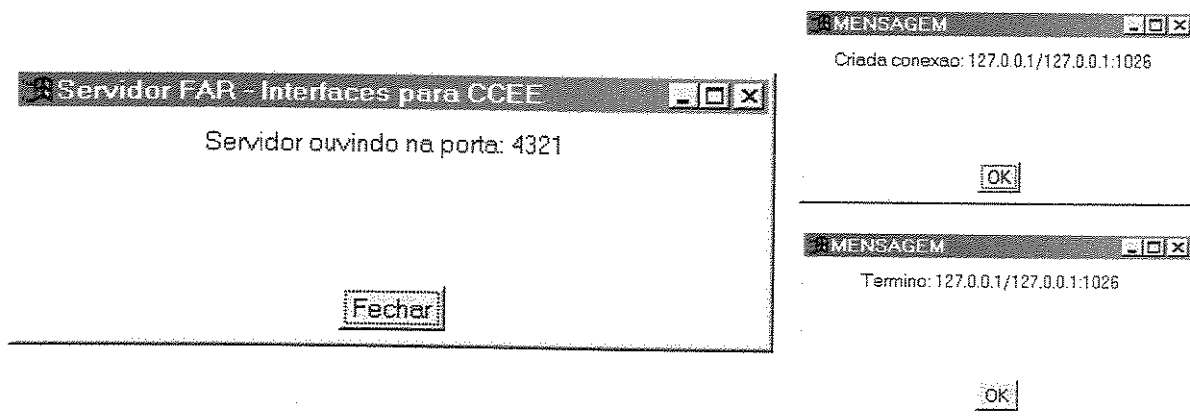


Figura 5.44: Aplicativo servidor da interface

Em ambos os casos, é possível para o usuário aplicar suas próprias funções de transformação sobre os conjuntos de dados, respeitando os conceitos de visualização científica. Na primeira situação, o aplicativo do usuário atua sobre os arquivos armazenados em disco, gerando sua saída em outro arquivo ou sobrescrevendo o arquivo original, desde que respeitada a formatação padrão de entrada de dados da interface.

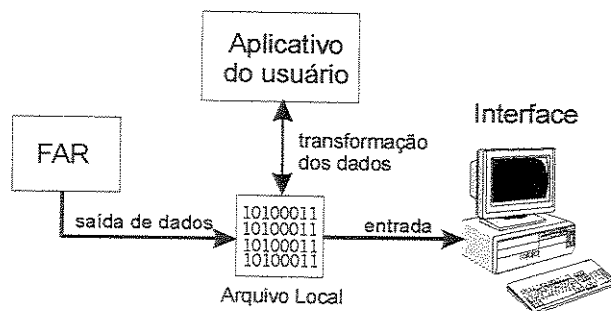


Figura 5.45: Aplicativo do usuário via operação com arquivo

Na segunda situação, o usuário pode escrever suas rotinas de transformação de dados, inserindo-as entre a função de geração de dados e os observadores, de maneira a realizar a transformação segundo um mesmo fluxo de dados.

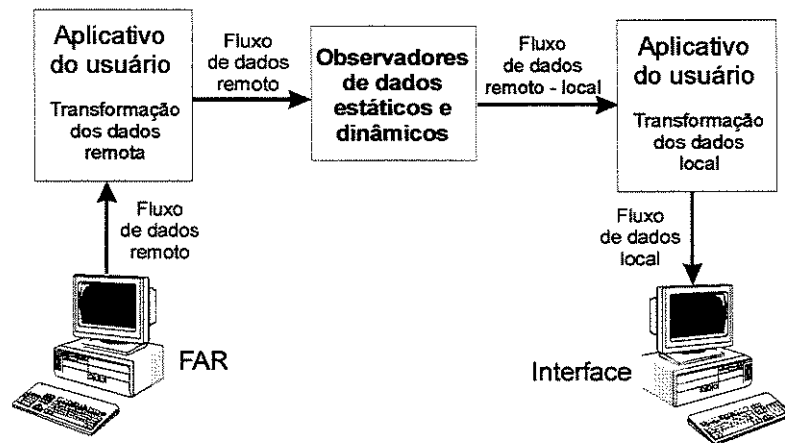


Figura 5.46: Aplicativo do usuário via comunicação entre processos

5.6. A Interface de Usuário

A interface de usuário foi projetada com o principal objetivo de possibilitar a avaliação das características principais do processo de visualização da rede de energia, dando atenção especial aos seguintes aspectos:

- Avaliar o desempenho do núcleo de animação desenvolvido e a necessidade de se identificar os erros presentes no seu código, antes de se partir para uma otimização do layout e dispositivos de interação do usuário com a interface.
- A adequação das formas de representação dos componentes e estado da rede elétrica sob estudo, tanto para casos estáticos (como simulações do sistema), quanto para casos dinâmicos (por exemplo, na supervisão em tempo real), com a presença ou não de animações.

- c) As dependências entre as classes quanto ao projeto orientado a objetos dos componentes da rede elétrica a ser visualizada.
- d) Avaliar os efeitos visuais decorrentes da utilização de diferentes escalas de cores para representar as variáveis monitoradas, para a representação unifilar da rede elétrica, para o fundo da tela e para a fonte dos caracteres impressos no vídeo.
- e) Permitir ao usuário final a possibilidade de explorar as diferentes formas de visualização implementadas com o menor esforço possível.

A seguir, são descritas as principais ações permitidas ao usuário na versão final da interface. Em seguida, é descrito o menu principal da mesma, onde estão presentes os rótulos necessários para a execução das ações do usuário. Finalmente, são descritos os demais componentes de interfaces de usuário implementados.

5.6.1. Ações do Usuário

Uma vez que o principal objetivo deste trabalho é a construção de uma interface para a visualização do estado da rede de energia, as principais ações possíveis implementadas para o usuário foram:

- a) Explorar saídas de dados formatadas de outros aplicativos na forma de arquivos texto.
- b) Explorar saídas de outros aplicativos em tempo real através de conexões do tipo cliente-servidor.
- c) Navegar pela rede elétrica de forma hierárquica através da seleção dos ícones gráficos diretamente na tela.
- d) Visualizar o estado da rede em diversos níveis, utilizando diferentes configurações de cores e representações.
- e) Armazenar os resultados gráficos da visualização através da janela principal da interface.

5.6.2. Menus Implementados

A) Menu Principal

O menu principal da interface, localizado diretamente na borda superior da janela gráfica da mesma, possui os seguintes itens de menu:

- a) **ARQUIVO**: este item de menu dá acesso às operações de arquivo.
- b) **BARRAS**: este item dá acesso às operações com as barras da rede elétrica.
- c) **FLUXO**: este item dá acesso às operações com os fluxos da rede elétrica.
- d) **GRANDEZAS**: este item dá acesso aos controles de visualização das variáveis monitoradas na interface.
- e) **CORES**: este item dá acesso aos controles de cores da interface.
- f) **ZOOM**: este item dá acesso aos controles de zoom da interface.
- g) **VISUALIZAÇÃO**: este item dá acesso aos controles de nível de visualização da rede elétrica na interface.
- h) **AJUDA**: este item dá acesso ao mecanismo de ajuda da interface.

B) Menu ARQUIVO

Este menu é responsável pelas operações de arquivo e possui os seguintes itens:

- a) **ABRIR ARQUIVO**: este item é responsável pelo carregamento de um arquivo de dados proveniente de um outro aplicativo (como uma FAR ou um banco de dados).
- b) **ABRIR HISTÓRICO**: este item é responsável pelo carregamento de uma sequência de arquivos de dados históricos armazenados, provenientes de um outro aplicativo (como uma FAR ou um banco de dados).
- c) **ABRIR CONEXÃO**: este item é responsável pelo carregamento de dados provenientes de um outro aplicativo (como uma FAR ou um banco de dados), a partir de uma conexão de rede ou através de troca de mensagens.

- d) FECHAR: este item é responsável pelo fechamento da entrada de dados, previamente aberta, proveniente de um outro aplicativo (como uma FAR ou um banco de dados).
- e) IMPRIMIR TELA: este item é responsável pela impressão do conteúdo da tela em um arquivo de saída, no formato bitmap de 24 bits.
- f) SAIR: este item é responsável pelo encerramento do programa da interface e fechamento de sua janela.

C) Menu BARRAS

Este menu é responsável pelas mudanças na maneira de representação das barras do sistema e possui os seguintes itens:

- a) BARRAS UNIFILAR: este item seleciona o modo de representação unifilar (bidimensional sem escala de cores) para as barras da rede elétrica representada pela interface.
- b) BARRAS COM ESCALA DE CORES: este item seleciona o modo de representação bidimensional, similar à unifilar, mas agora com a presença de escala de cores para representação dos valores telemedidos, para as barras da rede elétrica representada pela interface.
- c) BARRAS EM 3 DIMENSÕES: este item seleciona o modo de representação tridimensional com escala de cores para as barras da rede elétrica representada pela interface.

D) Menu FLUXO

Este menu é responsável pelas mudanças na maneira de representação dos fluxos nos ramos do sistema e possui os seguintes itens:

- a) LINHA UNIFILAR: este item seleciona o modo de representação unifilar para os ramos da rede elétrica representada pela interface.
- b) LINHA UNIFILAR COM SETAS 2D: este item seleciona o modo de representação unifilar para os ramos da rede elétrica representada pela interface, com setas bidimensionais para indicar o sentido do fluxo em questão.
- c) LINHA UNIFILAR COM SETAS 3D: este item seleciona o modo de representação unifilar para os ramos da rede elétrica representada pela interface com setas tridimensionais para indicar o sentido do fluxo em questão.
- d) CARREGAMENTO BIDIMENSIONAL: este item seleciona o modo de representação bidimensional, com emprego de escala de cores na representação do carregamento, para os ramos da rede elétrica representada pela interface.
- e) CARREGAMENTO BIDIMENSIONAL COM SETAS 2D: este item seleciona o modo de representação bidimensional, com emprego de escala de cores na representação do carregamento, para os ramos da rede elétrica representada pela interface, com setas bidimensionais para indicar o sentido do fluxo em questão.
- f) CARREGAMENTO BIDIMENSIONAL COM SETAS 3D: este item seleciona o modo de representação bidimensional, com emprego de escala de cores na representação do carregamento, para os ramos da rede elétrica representada pela interface com setas tridimensionais para indicar o sentido do fluxo em questão.
- g) VELOCIDADE: Este item permite a seleção da velocidade padrão de deslocamento das setas indicadoras de sentido de fluxo no caso animado para valores entre 1 e 5 pixels por frame.
- h) ESPAÇAMENTO: Este item permite a seleção do espaçamento entre as setas indicadoras de sentido de fluxo no caso animado para valores entre 10 e 50 pixels.
- i) ANIMAÇÃO: Este item permite a seleção do movimento das setas indicadoras de sentido de fluxo para o caso animado ou estático.

E) Menu GRANDEZAS

Este menu é responsável pelas mudanças na maneira de visualização dos equipamentos e estado do sistema elétrico e possui os seguintes itens:

- a) ESTADO DAS BARRAS: este item é responsável pelas mudanças na maneira de visualização do estado das barras da rede elétrica e possui os seguintes sub-itens:
 - a-1) EXIBIR/ESCONDER MÓDULO: este item é responsável por exibir ou esconder a informação textual acerca do módulo da tensão nodal das barras da rede elétrica.
 - a-2) EXIBIR/ESCONDER FASE: este item é responsável por exibir ou esconder a informação textual acerca da fase da tensão nodal das barras da rede elétrica.
 - a-3) EXIBIR/ESCONDER MEDIDORES ANGULARES: este item é responsável por exibir ou esconder os medidores angulares gráficos que representam a fase da tensão nodal das barras da rede elétrica.
- b) FLUXO DE POTÊNCIA: este item é responsável pelas mudanças na maneira de visualização do fluxo nos ramos da rede elétrica e possui os seguintes sub-itens:
 - b-1) EXIBIR P / EXIBIR Q / EXIBIR S: este item é responsável pela seleção do fluxo a ser exibido nos ramos da rede elétrica.
 - b-2) EXIBIR/ESCONDER TELEMEDIÇÃO DE POTÊNCIA: este item é responsável por exibir ou esconder a informação textual acerca do módulo da potência ativa, reativa ou complexa nos ramos da rede elétrica.
 - b-3) EXIBIR/ESCONDER MEDIDORES DE CARREGAMENTO: este item é responsável por exibir ou esconder os medidores de carregamento gráficos que representam o carregamento percentual dos ramos da rede elétrica.
- c) IDENTIFICADORES: este item controla a exibição da informação textual acerca dos identificadores dos equipamentos, barras e ramos da rede elétrica e possui apenas um sub-item:

- c-1) EXIBIR/ESCONDER IDENTIFICADORES: este item é responsável por exibir ou esconder a informação textual acerca dos identificadores dos equipamentos, barras e ramos da rede elétrica.
- d) EQUIPAMENTOS: este item controla a exibição da informação textual acerca das variáveis dos equipamentos da rede elétrica (como, por exemplo, o valor de tap de transformadores com regulação) e possui apenas um sub-item:
 - c-1) MOSTRAR/ESCONDER VALORES TELEMEDIDOS: este item é responsável por exibir ou esconder a informação textual padrão acerca das variáveis dos equipamentos da rede elétrica.

F) Menu CORES

Este menu é responsável pelas mudanças de cores das características da interface, equipamentos e estado do sistema elétrico representado e possui os seguintes itens:

- a) LINHAS: este item é responsável pelas mudanças na escala de cores da representação bidimensional dos ramos da rede elétrica e possui os seguintes sub-itens:
 - a-1) FLUXOS EM ESCALA CINZA: este item é responsável por exibir os fluxos nos ramos da rede elétrica em escala de cores graduada em tons de cinza.
 - a-2) FLUXOS EM ESCALA COLORIDA: este item é responsável por exibir os fluxos nos ramos da rede elétrica em escala de cores normal (padrão RGB).
- b) BARRAS: este item é responsável pelas mudanças na escala de cores da representação das barras da rede elétrica e possui os seguintes sub-itens:
 - b-1) BARRAS EM ESCALA CINZA: este item é responsável por exibir as barras da rede elétrica em escala de cores graduada em tons de cinza.
 - b-2) BARRAS EM ESCALA COLORIDA: este item é responsável por exibir as barras da rede elétrica em escala de cores normal (padrão RGB).
- c) FUNDO: este item é responsável pela mudança de cor do fundo da interface, segundo as opções de cor preta, azul, cinza, branca, amarela, verde e vermelha.

- d) **CONTORNO E EQUIPAMENTOS:** este item é responsável pela mudança de cor dos contornos e representação de equipamentos dos componentes gráficos da rede elétrica, segundo as opções de cor preta, azul, cinza, branca, amarela, verde e vermelha.
- e) **FONTE:** este item é responsável pela mudança de cor das fontes das informações textuais, segundo as opções de cor preta, azul, cinza, branca, amarela, verde e vermelha.

G) Menu ZOOM

Este menu é responsável pelas mudanças de zoom na visualização do sistema elétrico representado e possui os seguintes itens:

- a) **ZOOM 100%:** Representação a 100% do tamanho original em pixels.
- b) **ZOOM 125%:** Representação a 125% do tamanho original em pixels.
- c) **ZOOM 150%:** Representação a 150% do tamanho original em pixels.
- d) **ZOOM 200%:** Representação a 200% do tamanho original em pixels.
- e) **ZOOM 250%:** Representação a 250% do tamanho original em pixels.
- f) **ZOOM 300%:** Representação a 300% do tamanho original em pixels.

H) Menu VISUALIZAÇÃO

Este menu é responsável pelas mudanças do nível de visualização do sistema elétrico representado e possui os seguintes itens:

- a) **DIAGRAMA ELÉTRICO:** Representação da rede elétrica em modo unifilar.
- b) **DIAGRAMA GEOGRÁFICO:** Representação da rede elétrica em coordenadas geográficas, sobre o mapa da área correspondente ao sistema de energia.
- c) **CONTORNO ELÉTRICO:** Representação da rede elétrica em modo unifilar, com a tensão nas barras apresentada segundo um mapa de contorno.

- d) **CONTORNO GEOGRÁFICO:** Representação da rede elétrica em coordenadas geográficas, sobre o mapa da área correspondente ao sistema de energia, com a tensão nas barras apresentada segundo um mapa de contorno.
- e) **REDE 3D ELÉTRICA:** Representação da rede elétrica em modo unifilar, com a tensão nas barras apresentada segundo uma projeção tridimensional.
- f) **REDE 3D GEOGRÁFICA:** Representação da rede elétrica em coordenadas geográficas, sobre o mapa da área correspondente ao sistema de energia, com a tensão nas barras apresentada segundo uma projeção tridimensional.

I) Menu AJUDA

Este menu é responsável por disponibilizar informações de ajuda para o usuário, tais como versão da interface, funcionamento dos menus e dados de entrada.

5.6.3. Caixas de Informação

Foram implementados diálogos que funcionam como caixas de informação para retorno de dados ao operador da interface. Em especial, estas caixas são ativadas quando uma representação gráfica de um componente é selecionada, através da ação de um clique duplo com o mouse sobre a mesma. Estes diálogos de informação retornam dados textuais pertinentes ao componente correspondente de forma mais completa que a disponibilizada de maneira padrão pela interface. A figura a seguir exemplifica uma caixa padrão de informação para uma barra da rede elétrica:

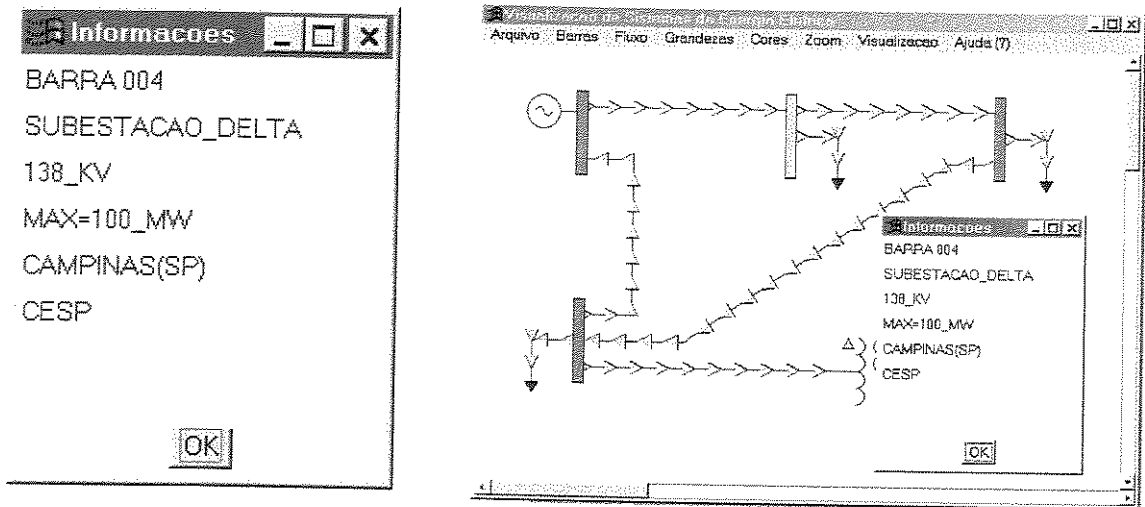


Figura 5.47: Caixas de Informação

5.6.4. Processamento de Alarmes e Eventos

O alarme visual consiste de uma pequena janela auxiliar que surge à direita da janela da interface, alertando o operador se o sistema está operando em um estado não seguro. Dependendo da implementação, a interface pode sugerir uma infinidade de ações de controle que podem ser tomadas para levar o sistema a operar novamente em um ponto seguro. A seguir, temos um exemplo de alarme que pode surgir quando o operador deseja visualizar a tela referente a uma subestação:

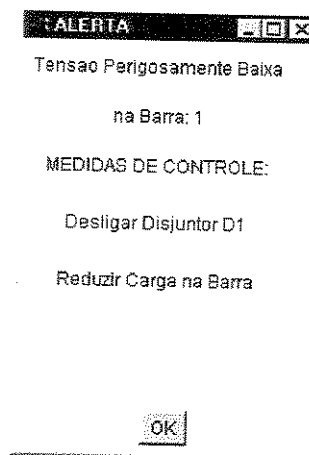


Figura 5.48: Exemplo de janela para alarmes e eventos

5.6.5. Caixas de Ajuda

As caixas de ajuda, acessíveis através do menu, foram implementadas utilizando diálogos nos quais é possível rolar o texto disponível, contando com um botão de encerramento. A figura a seguir apresenta a caixa de ajuda relativa aos menus de usuário:

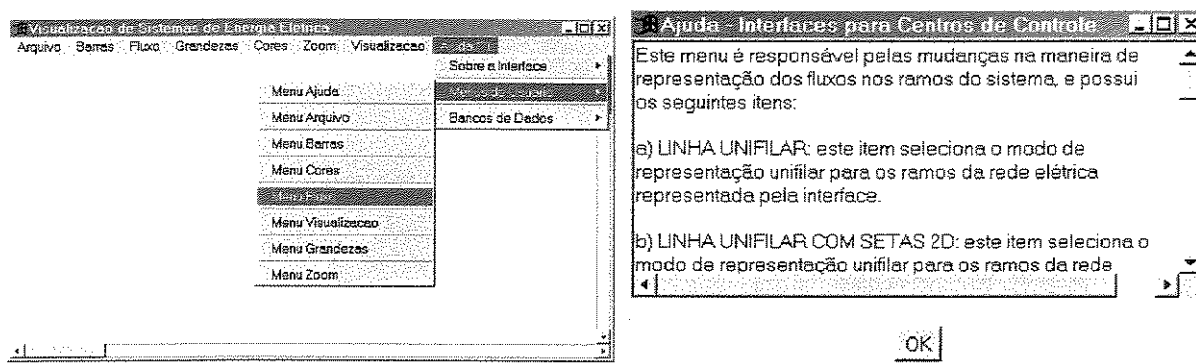


Figura 5.49: Menu e caixa de ajuda

5.7. Ambiente Computacional

O desenvolvimento deste projeto foi realizado em dois ambientes computacionais distintos. As versões finais do compilador JAVA utilizado no projeto, as configurações das máquinas envolvidas e outros aspectos computacionais relacionados ao desenvolvimento estão descritos na tabela a seguir:

Tabela 5.4: Configuração dos Ambientes Computacionais de Desenvolvimento

	AMBIENTE A	AMBIENTE B
Processador	Intel Pentium III de 450 MHz.	Intel Pentium III de 450 MHz.
Memória	128 Mbytes SDRAM.	128 Mbytes SDRAM.
Sistema Operacional	Red-Hat LINUX 6.2	Windows 98/2000
Versão da máquina virtual JAVA	1.2, JDK para LINUX (SUN)	1.3, JDK para Win32 (SUN)

Para os testes de visualização de dados “on-line”, foram desenvolvidos dois conjuntos de rotinas computacionais diferentes. O primeiro é constituído de uma rotina, utilizando o ambiente MATLAB, responsável pelo cálculo do fluxo de potência desacoplado rápido (BX) de uma rede elétrica. A saída desta rotina é escrita periodicamente em um arquivo do tipo texto que é utilizado como entrada de dados dinâmica da interface, após o estado da rede ser calculado para diferentes configurações de carga.

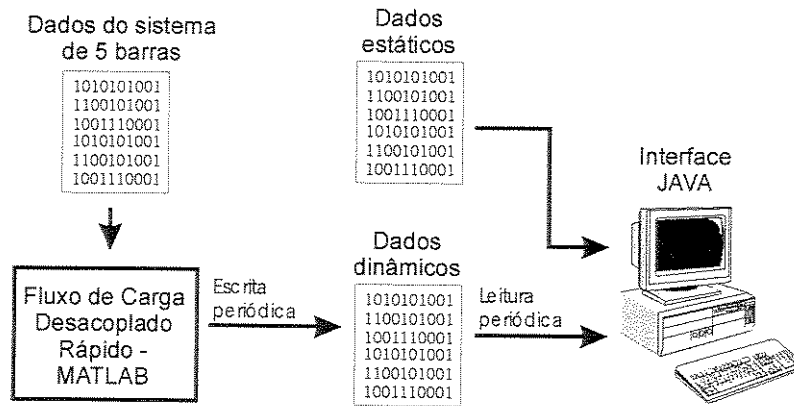


Figura 5.50: Aplicação de Fluxo de Carga via arquivo

O segundo conjunto, desenvolvido em JAVA, realiza uma série de funções de análise de rede sobre dados hipotéticos para o sistema IEEE-14 e então envia os resultados periodicamente para a interface através de uma conexão de rede segundo a arquitetura cliente-servidor.

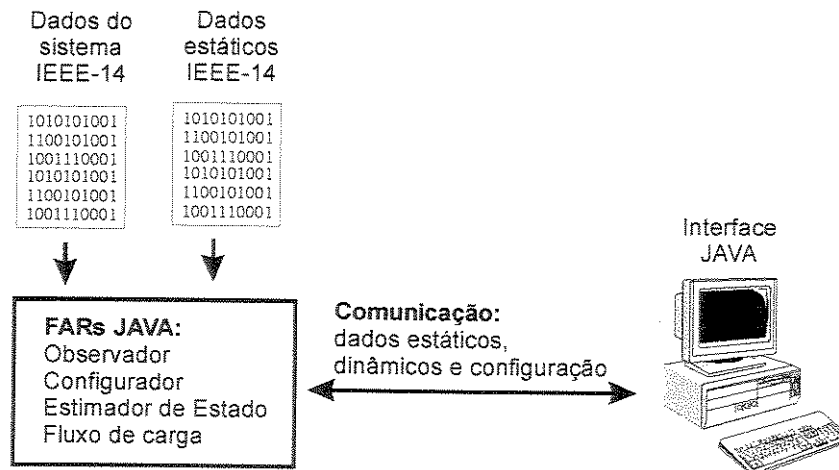


Figura 5.51: Aplicação de estimação de estado via comunicação entre processos

5.8. Testes de Desempenho da Interface

5.8.1. Requisição de Memória

As requisições de memória, com relação ao espaço necessário em disco rígido, são as mesmas e estão representadas na tabela a seguir:

Tabela 5.5: Requisição de espaço de armazenamento

Espaço em disco rígido: arquivos da interface	80,7 kbytes
Espaço em disco rígido total: arquivos e interpretador	615 kbytes
Banco de dados estático – rede de 5 barras (um caso)	1137 bytes
Banco de dados dinâmico – rede de 5 barras (um caso)	928 bytes

5.8.2. Taxa de Exibição Máxima Atingida

Este teste foi realizado eliminando-se a temporização entre os quadros de exibição, através da exclusão do mecanismo de temporização do canal auxiliar (fazendo o atraso correspondente igual a zero, ou seja, uma taxa de frames por segundo limitada pelo tempo computacional requerido pelos algoritmos implementados). A tabela a seguir demonstra os resultados médios obtidos para diferentes tipos de carregamento, utilizando a rede do IEEE-14. Foram determinadas as taxas máxima, mínima e média de exibição de quadros por segundo atingidas na ausência do temporizador para cada caso, após a exibição de 50.000 quadros.

Tabela 5.6: Taxa de frames por segundo, rede IEEE-14

APLICATIVO	TAXA MÁXIMA	TAXA MÍNIMA	TAXA MÉDIA
Apenas diagrama unifilar	302 f.p.s.	289 f.p.s.	295 f.p.s.
Diagrama da rede elétrica em 3D	178 f.p.s.	140 f.p.s.	143 f.p.s.
Diagrama da rede com fluxo animado	172 f.p.s.	127 f.p.s.	135 f.p.s.
Diagrama de contorno	49 f.p.s.	28 f.p.s.	34 f.p.s.
Perfil tridimensional	52 f.p.s.	32 f.p.s.	38 f.p.s.

5.8.3. Taxa de Atualização do Arquivo de Dados Dinâmicos - Fluxo de Carga

Foi realizada uma simulação da atualização em tempo real da base de dados da interface através da utilização da rotina de fluxo de carga, que sobrescrevia os arquivos de entrada do programa periodicamente. Quando o programa da interface tenta fazer um acesso de leitura à base de dados no momento de sua atualização, deve verificar se ela está ocupada. Neste caso, deve aguardar até que o programa de atualização termine suas tarefas para proceder à leitura. Entretanto, o programa principal pode perder alguns quadros em virtude desta espera, dando a impressão de uma quebra na animação. A tabela a seguir demonstra os resultados obtidos para diferentes taxas de atualização da base de dados, em termos do percentual de quadros perdidos, para um total de 1.000 acessos seqüenciais:

Tabela 5.7: Atualização da Base de Dados

Taxa de atualização da base de dados	Percentual de Quadros perdidos
Atualização a cada 1s	0,18%
Atualização a cada 0,5s	0,97%
Atualização a cada 0,25s	5,43%

5.8.4. Gerenciamento de Múltiplas Janelas

A tabela a seguir demonstra os resultados obtidos para a execução de múltiplas janelas através da abertura de múltiplas interfaces, utilizando o diagrama unifilar com animação de fluxos, com relação à taxa média de exibição de quadros atingida.

Tabela 5.8: Gerenciamento de múltiplas janelas

Número de janelas abertas	Taxa de frames atingida
1	141 f.p.s.
2	112 f.p.s.
3	93 f.p.s.
4	71 f.p.s.

É importante salientar que, apesar de em todos os casos os programas efetuarem atualizações periódicas dadas pelas taxas acima, somente na janela com o processo de interesse (janela selecionada pelo usuário) a animação permanece intacta. Nas demais, ela é deteriorada, perdendo quadros ou parcelas de exibição gráfica na tela.

5.8.5. Comunicação entre Processos - Estimação de Estado

Na aplicação de comunicação entre processos, implementada em conjunto com a rotina de estimação de estado para o sistema IEEE de 14 barras, foram realizados testes de velocidade de transferência de informação e sincronismo da interface em estudo. Os resultados obtidos estão demonstrados na tabela a seguir:

Tabela 5.9: Transferência de informação

Taxa mínima	34 kbps
Taxa média	57 kbps
Taxa máxima	93 kbps

Tabela 5.10: Atualização da Base de Dados para comunicação entre processos

Taxa de atualização da base de dados	Percentual de Quadros perdidos
Atualização a cada 1s	0,01%
Atualização a cada 0,5s	0,14%
Atualização a cada 0,25s	0,42%

5.8.6. Número de Componentes no Diagrama Unifilar

O número máximo de componentes do diagrama unifilar é limitado pela forma de representação, escala de cores utilizada e tipo dos componentes. Este teste foi realizado desenhando-se a rede do IEEE-14 repetidas vezes por ciclo de impressão e medindo-se a taxa de frames por segundo resultante da mesma maneira que o item 5.8.2. A tabela a seguir demonstra os resultados médios obtidos para cada caso:

Tabela 5.11: Número de componentes do diagrama unifilar

Número de Componentes	Taxa de frames média atingida
34	152 f.p.s
68	81 f.p.s
340	24 f.p.s

Deve-se salientar aqui que a rede IEEE-14 apresenta, do ponto de vista barras-ramos, 34 componentes, ou seja, 14 barras e 20 ramos.

5.8.7. Dimensão das Malhas de Contorno e Tridimensional

Neste teste, foi verificado o tempo médio requerido para a exibição de um quadro, com relação à definição do elemento utilizado para os cálculos das malhas de contorno e perfil tridimensional. A tabela a seguir demonstra os resultados obtidos para sistema exemplo de 5 barras, em uma janela de 640 por 480 pixels:

Tabela 5.12: Dimensão das malhas e tempo de exibição por quadro

Dimensão do elemento	Tempo médio de um quadro
15 pixels	17,8 ms
10 pixels	38,2 ms
5 pixels	153,7 ms
2 pixels	907,4 ms
1 pixel	2056,3 ms

Capítulo 6

Conclusões

Neste trabalho, foram estudadas técnicas para a implementação de interfaces de usuário no ambiente de supervisão e controle de sistemas de energia, com o objetivo principal de visualizar o estado da rede elétrica quanto a sua topologia, variáveis supervisionadas e dados pertinentes às funções de análise de redes.

Foi proposto um modelo conceitual para agregar ao ambiente de centros de controle interfaces que façam o uso de animações, através da implementação de "observadores de dados". Ainda através dos mesmos, é possível agregar ao sistema de análise de rede funções de transformação dos dados supervisionados que permitam ao operador obter maiores informações sobre o sistema elétrico do que as fornecidas pelo subsistema de análise de redes.

Foi obtida, ao final do trabalho, uma interface gráfica com a capacidade de representar a rede de energia elétrica de diferentes formas, baseada em alguns dos modelos propostos por diversos pesquisadores da área ao longo da última década para visualização de sistemas de potência [4, 5, 11, 25, 26, 30 39, 40], com elementos gráficos que fazem o uso de técnicas de orientação a objetos. A aplicação destas técnicas favorece não só as etapas de projeto e desenvolvimento das interfaces, mas também possibilita a atualização rápida das formas de representação, aparência geral, mecanismos de funcionamento e de aquisição de dados nos códigos compilados.

Em especial, no caso da representação da tensão nodal, obteve-se um procedimento para representar o estado da rede através de perfis tridimensionais a partir dos diagramas de contorno propostos por Weber e Overbye [39], adaptando um algoritmo comumente empregado em computação gráfica para a geração de paisagens fractais. Este algoritmo é flexível, no sentido em que poderá ser empregado com outros algoritmos de determinação do contorno de tensão que não o descrito em [39].

Esta interface também tem a capacidade de manipular dados provenientes de diferentes fontes, local ou remotamente, podendo ser executada sem a necessidade de recompilar o seu código em diferentes sistemas operacionais, agregando, assim, os conceitos de sistemas abertos.

Finalmente, através dos resultados obtidos, pode-se verificar que a etapa de desenho dos componentes gráficos representa grande parte da demanda computacional dos softwares de interfaceamento. Assim, os esforços de otimização quanto ao desempenho de interfaces gráficas também devem ser concentrados neste ponto.

Como proposta para futuros trabalhos nesta área, são sugeridos os seguintes temas:

1. A pesquisa de novas maneiras de representação das variáveis da rede elétrica, para a aplicação tanto na etapa de análise e simulação, quanto na supervisão e controle do sistema de energia.
2. A pesquisa e implementação de métodos para a construção de interfaces, visando não somente a visualização do sistema de energia, mas que também possam reconhecer comandos do operador da rede e repassá-los para o subsistema de análise de redes e controle de maneira eficiente. Tais interfaces podem fazer uso, também, do modelo conceitual proposto, incorporando aos observadores de dados a capacidade de atuar sobre os componentes do subsistema de análise de redes.
3. A realização, junto a operadores de concessionárias de energia elétrica, engenheiros eletricitas e profissionais da área de sistemas de potência, de maiores pesquisas sobre as características desejadas pelos mesmos para as interfaces de usuário nos seus ambientes de trabalho.

Referências Bibliográficas

- [1] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Norma SB-112: Símbolos Gráficos de Usinas Geradoras, Subestações e Linhas para Sistemas Energéticos e para Sistemas de Telecomunicação”, Dez.1991.
- [2] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Norma NBR-12523: Símbolos Gráficos de Equipamentos de Manobra e Controle e de Dispositivos de Proteção”, Abr.1992.
- [3] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Norma NBR-12522: Símbolos Gráficos de Produção e Conversão de Energia Elétrica”, Abr.1992.
- [4] Anderson, M.D., “Advanced Graphics Zoom in on Operations”, IEEE Computer Applications and Power, vol.6, n.2, Apr.1996, p.25-28.
- [5] Azevedo, G., Souza, C., Feijó, B., “Enhancing the Human-Computer Interface of Power System Applications”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.11, no.2, May 1996.
- [6] Azevedo, G., “Agentes Reativos para Centros de Controle de Energia Elétrica”, Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Agosto de 1998.
- [7] Azevedo, G., Feijó, B., Costa M., “Control Centers Evolve with Agent Technology”, IEEE Computer Applications in Power, pp. 48-53, Jul. 2000.
- [8] Ball, B. - “Usando Linux – Soluções simples, técnicas essenciais”, Editora Campus, Rio de Janeiro, R.J., 1999.

- [9] Bose, A., Clements, K.A., "Real Time Modeling of Power Networks" (Invited Paper), Proceedings of the IEEE, vol.75, no.12, Dez.1987.
- [10] Campione, M., Walrath, K., "The Java™ Tutorial - Object-Oriented Programming for the Internet". Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1996.
- [11] Cease, T.W., Feldhaus, B., "Real Time Monitoring of the TVA Power System", IEEE Computer Applications in Power, vol.7, n.3, Jul.1994, p.47-51.
- [12] Dalheimer, M. K., "Programação em QT – Como Desenvolver Aplicações Portáteis em UNIX & WIN32", Ed. Ciência Moderna, Rio de Janeiro, R.J., 1999.
- [13] Damasceno Jr., A., "Aprendendo JAVA: Programação na Internet", Ed. Érica, São Paulo, S.P., 1996.
- [14] Earnshaw, R.A., Watson, D., "Animation and Scientific Visualization – Tools and Applications", Academic Press, London, 1993.
- [15] Elgerd, O. I., "Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica", McGraw Hill do Brasil, São Paulo, S.P., 1976.
- [16] Flynn, J, Clarke, B., "Visual J++ - Programando em Java". Makron Books, São Paulo, S.P., 1998.
- [17] Foley, J. D., "Computer Graphics: Principles and Practice", Adison-Wesley, 1990.
- [18] Gallagher, R.S., "Computer Visualization – Graphics Techniques for Scientific and Engineering Analysis". CRC Press, London/Tokyo, 1994.
- [19] Gaushell, D.J., Darlington, H.T., "Supervisory Control And Data Acquisition" (Invited Paper), Proceedings of the IEEE, vol.75, no.12, Dez.1987.

- [20] Gross, G., Galiana, F.D., "Short-Term Load Forecasting" (Invited Paper), Proceedings of the IEEE, vol.75, no.12, Dez.1987.
- [21] Heiny, L., "Programação Gráfica para Windows com Borland C++", JC Livros Técnicos e Científicos Editora, 1993.
- [22] Jones, C. V., "Visualization and Optimization", Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 1997.
- [23] Kent, P., Kent, J., "JavaScript para Netscape: Guia Oficial", Makron Books, São Paulo, S.P., 1997.
- [24] Lucena, F., Liesenberg, H., "Interfaces Homem-Computador: Uma Primeira Introdução", Tutorial, Jan. 2000.
- [25] Mahadev, P., Chistie, R., "Envisioning Power System Data: Concepts and a Prototype System State Representation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.8, no.3, Aug. 1993.
- [26] Mitsui, H., Chistie, R., "Visualizing Voltage Profiles for Large Scale Power Systems", IEEE Computer Applications in Power, Vol.10, no.3, Jul. 1997, p.32-37.
- [27] Mizhari, Vistorine V., "Treinamento em Linguagem C - Módulos I e II", McGraw Hill, São Paulo, S.P., 1990.
- [28] Monticelli, A., "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica", Edgard Blücher Ltda, São Paulo, S.P., 1983.
- [29] Monticelli, A., "State Estimation in Electric Power Systems – A Generalized Approach", Kluwer Academic Publishers, 1ª edição, 1999.
- [30] Overbye, T. J., Gross G., Laufenberg M.J., Sauer P.W., "Visualizing Power System Operations in an Open Market". IEEE Computer Applications in Power, V.10, No 1 pp. 53-58, Jan. 1997.

- [31] Ricarte, I.L.M., “Análise, Projeto e Desenvolvimento de Software Orientado a Objetos”, DCA/FEEC/UNICAMP, set. 1998.
- [32] Rumbaugh, J., “Object Oriented Modeling and Design”, Prentice-Hall, 1991.
- [33] “SCO Visual Tcl Programmer's Guide and Reference, Appendix D, User interface style conventions”, 1998.
- [34] Siever, E. - “Linux in a Nutshell – A desktop quick reference”, O'Reilly & Associates, USA, 1999.
- [35] Stott, B., Alsac, O., Monticelli, A.J., “Security Analysis and Optimization” (Invited Paper), Proceedings of the IEEE, vol.75, no.12, Dez.1987.
- [36] Thalmann, D., ”Scientific Visualization and Graphics Simulation”, John Wiley & Sons, New York/Brisbane/Toronto/Singapore, 1990.
- [37] Thalmann, N.M., Thalmann, D., ”New Trends in Animation and Visualization”, John Wiley & Sons, New York/Brisbane/Toronto/Singapore, 1991.
- [38] Wutka, M., ”Java – Técnicas Profissionais”, Editora Berkeley, São Paulo/Berkeley, 1997.
- [39] Weber, J. D., Overbye, T. J., “Voltage Contours for Power System Visualization”. IEEE Transactions on Power Systems, V. 15, No 1, pp. 404-409, Feb. 2000.
- [40] Yu, D. C. et al. “A GUI Based Visualization Tool for Sequence Networks”. IEEE Transactions on Power Systems, V. 13, No 1, pp. 34-39, Feb. 1998.

Apêndice A

Sistemas Utilizados nos Testes

A) Sistema IEEE de 14 barras simplificado

As tabelas A1 e A2 a seguir descrevem simplificadaamente o sistema IEEE de 14 barras (IEEE14). É explicitado o tipo da barra (PQ, PV e “slack”) e são sugeridos valores de tensão (em p.u.) e injeções de potência ativa e reativa. Além disto, são fornecidos os parâmetros das linhas da rede elétrica, calculados na base de potência de 100 MVA.

BARRA	TIPO	TENSÃO (p.u.)	FASE (radianos)	P	Q
1	Slack	1.000	0.00	0.0	0.0
2	PV	1.000	0.00	25.0	0.0
3	PQ	1.000	0.00	15.0	5.0
4	PQ	1.000	0.00	15.0	5.0
5	PQ	1.000	0.00	15.0	5.0
6	PV	1.000	0.00	25.0	0.0
7	PQ	1.000	0.00	15.0	5.0
8	PQ	1.000	0.00	15.0	5.0
9	PQ	1.000	0.00	15.0	5.0
10	PQ	1.000	0.00	15.0	5.0
11	PQ	1.000	0.00	15.0	5.0
12	PQ	1.000	0.00	15.0	5.0
13	PQ	1.000	0.00	15.0	5.0
14	PQ	1.000	0.00	15.0	5.0

Tabela A.1: Dados das barras do sistema IEEE-14

BARRA ORIGEM	BARRA DESTINO	R (%)	X (%)	Y (%)
1	2	1,94	59,20	5,28
1	5	5,40	22,30	4,92
2	3	4,70	19,80	4,38
2	4	5,81	17,60	3,74
2	5	5,70	17,40	3,40
3	4	6,70	17,10	3,46
4	5	1,34	4,20	1,28
4	7	0,00	20,9	0,00
4	9	0,00	55,60	0,00
5	6	0,00	25,20	0,00
6	11	9,50	19,90	0,00
6	12	12,30	25,60	0,00
6	13	6,61	13,00	0,00
7	8	0,00	17,60	0,00
7	9	0,00	11,00	0,00
9	10	3,18	8,50	0,00
9	14	12,70	27,40	0,00
10	11	8,20	19,20	0,00
12	13	22,10	20,00	0,00
13	14	17,10	34,80	0,00

Tabela A.2: Dados das linhas do sistema IEEE-14

B) Sistema de 5 barras

As tabelas A3 e A4 descrevem o sistema de teste de 5 barras. Também são explicitados os tipos das barras (PQ, PV e “slack”) e são fornecidos os parâmetros das linhas da rede elétrica, calculados na base de potência de 100 MVA.

BARRA	TIPO	TENSÃO (p.u.)	FASE (radianos)
1	Slack	1.000	0.00
2	PQ	1.000	0.00
3	PQ	1.000	0.00
4	PQ	1.000	0.00
5	PQ	1.000	0.00

Tabela A.3: Dados das barras da rede de 5 barras

BARRA ORIGEM	BARRA DESTINO	R (%)	X (%)	Y (%)
1	2	5	10	0,00
1	4	5	20	0,00
2	3	10	10	0,00
3	4	5	10	0,00
4	5	10	25	0,00

Tabela A.4: Dados das linhas da rede de 5 barras

Apêndice B

OMT – Object Modeling Technique

Uma das metodologias mais difundidas durante o desenvolvimento de projetos orientado a objetos tem sido a OMT – Object Modeling Technique [7, 23]. Durante o desenvolvimento empregando esta técnica, são construídos três diferentes modelos do sistema no decorrer da etapa de análise, descritos a seguir:

- a) **Modelo de Objetos:** Este modelo representa as características estáticas do sistema, capturando os aspectos estruturais. Ele é obtido através dos seguintes passos:
- Identificação e descrição das classes necessárias ao projeto;
 - Implementação de associações entre as classes;
 - Implementação de atributos para os objetos e links;
 - Simplificação e organização dos objetos baseadas nos conceitos de herança e agrupamento das classes em módulos.
- b) **Modelo Dinâmico:** Este modelo representa as características dinâmicas de comportamento ou controle do sistema, pertinentes aos aspectos temporais. Ele é obtido através dos seguintes passos:

- Preparação das seqüências e cenários de interação mais comuns;
- Identificação e previsão de eventos entre objetos;
- Preparação de um diagrama de eventos para o sistema;
- Desenvolvimento de um diagrama de estados para as classes mais importantes;
- Realização de testes de consistência para os eventos previstos.

c) **Modelo Funcional:** Este modelo representa as características funcionais do sistema, através dos aspectos de transformação de dados pertinentes às suas restrições e interação dos seus componentes. Ele é obtido através dos seguintes passos:

- Identificação de variáveis e dados de entrada e saída;
- Construção de diagramas de fluxo de dados para explicitar as dependências entre os componentes;
- Descrição das funções necessárias;
- Identificação das restrições e especificação dos critérios de otimização relacionados.

Em especial, o modelo de objetos foi o que mais contribuiu para a popularização desta metodologia, em virtude de possuir uma notação para atingir o seu propósito de realizar a descrição dos objetos do sistema. Para tanto, são empregados diferentes diagramas de representação.

Obter os diagramas de classes é o principal objetivo deste modelo. Estes diagramas descrevem o padrão de relacionamento entre as diversas possibilidades de interação entre as instâncias (objetos). A notação de uma classe segue o padrão representado na figura a seguir. O nome da classe é apresentado primeiramente. Em seguida, são listados os atributos e campos pertencentes aos objetos desta classe, explicitando-se o seu nome, tipo e valor de inicialização. Finalmente, são apresentados os métodos da classe, descrevendo o seu nome, lista de argumentos e tipo de valor retornado. Estes campos devem ser separados por uma linha horizontal.

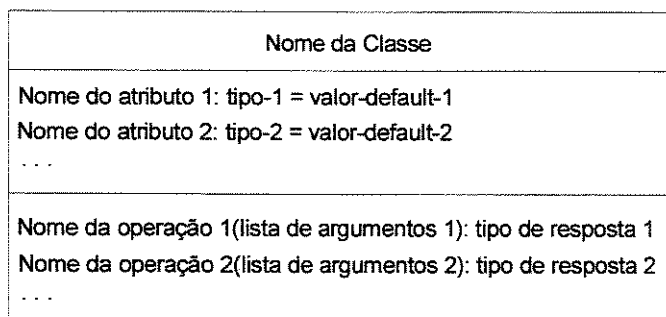


Figura B.1: Representação de Classes

Os diagramas de instâncias são utilizados para descrever objetos específicos e o seu tipo de interação em particular. Eles são especialmente úteis para documentar cenários de teste e exemplos. A figura a seguir representa um exemplo de um diagrama de uma classe simples com dois diagramas de instâncias correspondentes:

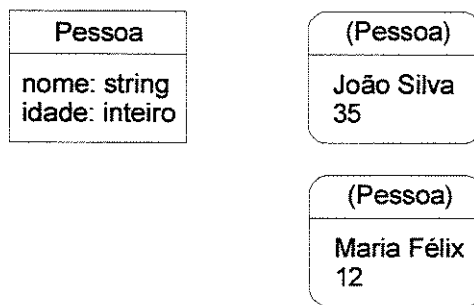


Figura B.2: Diagramas de Instâncias

Para estabelecer as relações entre objetos e classes pode-se utilizar associações. Elas são representadas por linhas conectando duas classes ou objetos e são inerentemente bidirecionais. As terminações destas linhas representam os aspectos de multiplicidade da relação. Nenhum símbolo presente indica multiplicidade um. A presença de uma circunferência preenchida indica multiplicidade um ou mais, enquanto uma circunferência vazia representa multiplicidade um ou zero. Um rótulo localizado próximo a uma circunferência é utilizado para representar tipos especiais de multiplicidade. A figura a seguir apresenta algumas associações entre classes:

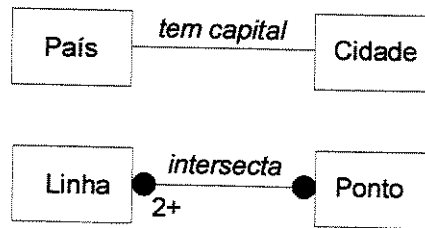


Figura B.3: Representação de Associações

Em alguns casos, pode ser necessário implementar atributos para as associações [23]. Estas propriedades se comportam da mesma maneira que os atributos de classe e são representadas por um símbolo especial e a descrição dos nomes dos atributos relacionados no meio da ligação, como exemplificado na figura a seguir:



Figura B.4: Atributos de associações

Apêndice C

Formulação Básica das Funções de Análise de Rede Implementadas

C.1. Fluxo de Carga

O cálculo do fluxo de carga determina o estado de uma rede elétrica, dado pela magnitude e ângulo de suas tensões nodais, os fluxos de corrente, os fluxos de potência e as perdas nas linhas, assumindo-se conhecidas as demandas nas barras de carga e os níveis de tensão nas barras de geração. Desta forma, a princípio, este cálculo não está preocupado em distribuir a geração entre as diferentes unidades geradoras. Subseqüentemente, entretanto, é possível incluir, no processo de resolução iterativo, mecanismos que permitam o ajuste das variáveis do problema (tais como a transformação de barras PV em PQ, por exemplo) para atender a restrições econômicas, de segurança ou a limites dos equipamentos [28].

Assim, deseja-se obter o estado do sistema dado por:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \theta \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (\text{C.1})$$

Tem-se o vetor de medidas das injeções no sistema:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}^{esp} \\ \mathbf{Q}^{esp} \end{bmatrix} \quad (C.2)$$

Onde:

- θ representa o ângulo das barras PV e PQ.
- V representa a magnitude da tensão para as barras PQ.
- P_i^{esp} representa a injeção de potência ativa especificada na barra i , para barras PV e PQ.
- Q_i^{esp} representa a injeção de potência reativa especificada na barra i , para barras PQ.

Sabendo-se que os mismatches de potência são definidos por:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}(\theta, V) \\ \Delta \mathbf{Q}(\theta, V) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}^{esp} \\ \mathbf{Q}^{esp} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{P}(\theta, V) \\ \mathbf{Q}(\theta, V) \end{bmatrix} \quad (C.3)$$

e que a correção no estado é obtida através da expressão:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial V} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial V} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}(\theta, V) \\ \Delta \mathbf{Q}(\theta, V) \end{bmatrix} \quad (C.4)$$

Pode-se demonstrar que o estado é obtido através da resolução do conjunto de equações recursivas [28]:

$$\begin{bmatrix} \theta^{v+1} \\ \mathbf{V}^{v+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^v \\ \mathbf{V}^v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \theta^v \\ \Delta \mathbf{V}^v \end{bmatrix} \quad (C.5)$$

O esquema geral do processo iterativo de obtenção da solução é:

- i. Escolha de valores iniciais para o estado; fazer o contador de iterações $v = 0$;
- ii. Cálculo dos mismatches de potência;
- iii. Teste de convergência, pelo valor absoluto dos mismatches; Se convergir, ir para o passo (viii). Se não, continuar.
- iv. Montar e fatorar a matriz Jacobiana para o estado da iteração atual

$$J(\theta^v, \theta^v) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix};$$

- v. Obter as correções $\Delta\theta^v$ e ΔV^v e o novo estado;
- vi. Incrementar o contador de iterações ($v = v + 1$) e testar a convergência, calculando os mismatches;
- vii. Se não convergir, retornar para (ii);
- viii. Calcular as demais incógnitas do problema e terminar.

Deve-se salientar que existem variações para o processo iterativo e cálculo do fluxo de carga, através da introdução de aproximações como desacoplamento e inclusão de controles e limites. Maiores detalhes podem ser encontrados nas referências [28] e [29].

C.2. Estimação de Estado

O objetivo da função de estimação de estado é obter a melhor estimativa para o estado do sistema de energia, assumido desconhecido, através de um conjunto de medidas do sistema. Isto se faz, usualmente, através do método dos quadrados mínimos ponderados [29]. Neste caso, tem-se a expressão:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{w} \quad (\text{C.6})$$

Onde \mathbf{z} é um vetor de medidas, dado por:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}^{\text{med}} \\ \mathbf{P}^{\text{med}} \\ \mathbf{U}^{\text{med}} \\ \mathbf{Q}^{\text{med}} \\ \mathbf{V}^{\text{med}} \end{bmatrix} \quad (\text{C.7})$$

Na formação deste vetor, as parcelas são:

- $T_i^{\text{med}} = P_{ki}$ representa o fluxo de potência ativa da barra k para a barra i ;
- P_i^{med} representa a injeção de potência ativa na barra i ;
- $U_i^{\text{med}} = Q_{ki}$ representa o fluxo de potência reativa da barra k para a barra i ;
- Q_i^{med} representa a injeção de potência reativa na barra i ;
- V_i^{med} representa a magnitude da tensão na barra i .

O vetor \mathbf{x} , do estado verdadeiro, é definido como:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \theta \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (\text{C.8})$$

O vetor \mathbf{w} representa os erros nas medidas, determinando uma matriz covariância do erro \mathbf{Rz} tal que:

$$\mathbf{Rz}_{ii} = \sigma_i^2 \quad (\text{C.9})$$

Onde os desvios padrão σ_i são determinados a partir da precisão dos medidores. O estado estimado $\hat{\mathbf{x}}$ é obtido pela minimização da função:

$$J(\mathbf{x}) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^t \cdot \mathbf{W} \cdot [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \quad (\text{C.10})$$

Pode-se mostrar que, para um conjunto de funções $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ não lineares, o estado estimado $\hat{\mathbf{x}}$ pode ser obtido através da aplicação do processo iterativo a seguir [29]:

$$\hat{\mathbf{x}}^{v+1} = \hat{\mathbf{x}}^v + \Delta \mathbf{x}^v \quad (\text{C.11})$$

$$\mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^v) \Delta \mathbf{x}^v = \mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^v) \cdot \mathbf{W} \cdot (\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^v)) \quad (\text{C.12})$$

$$\mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^v) = \mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^v) \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^v) \quad (\text{C.13})$$

onde \mathbf{H} é a matriz Jacobiana dada por:

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \quad (\text{C.14})$$

O esquema geral do processo iterativo de obtenção da solução é:

- i. Escolha de valores iniciais para o estado; fazer o contador de iterações $v = 0$;
- ii. Cálculo da matriz \mathbf{G} para o estado atual;
- iii. Obtenção da correção do estado $\Delta \mathbf{x}^v$ e do estado corrigido $\hat{\mathbf{x}}^{v+1}$;
- iv. Incrementar o contador de iterações ($v = v + 1$) e testar a convergência, através do valor absoluto da correção do estado;
- v. Se não convergir, retornar para (ii);

Existem, ainda, outros aspectos importantes sobre a função de estimação de estado, como a filtragem de erros grosseiros e desacoplamento, que estão descritos mais completamente na referência [29].