

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Implementação Orientada para Objeto de um Simulador para a
Dinâmica Lenta de um Sistema de Energia Elétrica**

Dissertação submetida como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

Márcia Regina Vianna Vanti

FLORIANÓPOLIS, NOVEMBRO DE 1994

**IMPLEMENTAÇÃO ORIENTADA PARA OBJETO DE UM SIMULADOR
PARA A DINÂMICA LENTA DE UM SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA**

MÁRCIA REGINA VIANNA VANTI

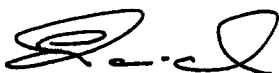
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA, E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Aginaldo Silveira e Silva, Ph. D.
ORIENTADOR



Prof. Enio Valmor Kassick, Dr.
COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA




Prof. Aginaldo Silveira e Silva, Ph. D. - Presidente
Orientador



Prof. Luiz Jairo Branco Machado, Dr. Ing.
Co-Orientador



Prof. Ildemar Cassana Decker, D. Sc.



Prof. José Luiz Rezende Pereira, Ph. D.

Este trabalho é dedicado à

Teresinha Vianna

Agradecimentos

Agradeço ao prof. Aguinaldo Silveira e Silva a confiança e o apoio oferecido na orientação deste trabalho;

Ao prof. Luiz Jairo Branco Machado, o interesse e o entusiasmo demonstrados na co-orientação deste trabalho;

Ao GSP, a convivência e o fornecimento dos meios necessários;

Ao CNPq, o suporte financeiro;

Ao Marcelo;

A minha família;

Aos amigos.

SÚMARIO

RESUMO

ABSTRACT

SIMBOLOGIA

INTRODUÇÃO

Introdução	1
1.1 O projeto - Motivação e Objetivos	2
1.2 Divisão do trabalho	3

CONCEITOS BÁSICOS E REQUISITOS DO SIMULADOR PARA ENSINO

E TREINAMENTO - SET

Introdução	4
2.1 O sistema elétrico de potência	5
2.2 O centro de controle	8
2.3 O simulador para ensino e treinamento	12
2.4 Configuração do SET no centro de controle e no ambiente de pesquisa	13
2.5 Requisitos do SET	15
Conclusão	18

MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA PARA SIMULAÇÃO NO SET

Introdução	19
3.1 Modelos dos componentes da unidades geradoras	21
3.1.1 Máquinas síncronas	23
3.1.2 Sistemas de excitação	32
3.1.3 Reguladores de velocidade	33
3.1.4 Turbinas hidráulicas	36
3.1.5 Turbinas térmicas	37
3.1.6 Caldeiras	38
3.2 Modelos dos componentes da rede elétrica	44
3.2.1 Linhas de transmissão	45
3.2.2 Compensadores estaticos de reativos	46
3.2.3 Transformadores	47
3.2.4 Cargas	49
Conclusão	50

DEFINIÇÃO MATEMÁTICA DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Introdução	52
4.1 Definição da simulação dinâmica e estrutura das equações	53
4.2 Métodos de solução	55
4.3 Estrutura das matrizes envolvidas no processo de solução	66
Conclusão	71

ESTRUTURA COMPUTACIONAL	
Introdução	73
5.1 Terminologia	74
5.2 Modelagem do sistema de potência em POO	76
5.3 Estrutura de processamento	82
5.4 Mecanismos de formação das matrizes envolvidas no processo de solução	85
5.4.1 Formação da matriz $\partial F_i / \partial Y_i$	86
5.4.2 Formação do vetor de resíduos F_i	87
5.4.3 Formação da matriz $\partial F_i / \partial V$	88
5.4.4 Formação da matriz $\partial G / \partial Y_i$	89
5.4.5 Formação da matriz $\partial G / \partial V$	89
5.4.6 Formação do vetor de injeções G	89
5.4.7 Formação de Y_E e I_E	90
5.5 Exemplo de reutilização do programa	90
Conclusão	91
RESULTADOS	
Introdução	94
6.1 Resultados para o sistema de cinco máquinas	95
6.2 Resultados para o sistema de duas máquinas	101
Conclusão	105
CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	106
BIBLIOGRAFIA	110
APÊNDICE A	115
APÊNDICE B	121

RESUMO

Neste trabalho foi projetado e implementado um programa destinado a realizar a simulação da dinâmica de sistemas elétricos de potência. Este programa constitui-se no passo inicial do desenvolvimento do módulo dinâmico do simulador de sistemas de potência, que deverá compor um software de maior porte, atualmente em desenvolvimento pelo Grupo de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Santa Catarina (GSP/UFSC), o Simulador para Ensino e Treinamento (SET). Uma definição dos conceitos relacionados ao SET e uma especificação preliminar de seus requisitos foi apresentada, bem como uma revisão bibliográfica dos principais métodos matemáticos de solução e dos modelos dos componentes do sistema elétrico adequados à sua simulação em regime de dinâmica lenta.

Visando a obtenção de modularidade e flexibilidade foram adotadas técnicas de programação orientada para objetos proporcionadas pela linguagem C++.

Por compatibilidade com o SET em desenvolvimento pelo GSP, este programa foi implementado em estações de trabalho Sun, operando sob o sistema operacional UNIX.

ABSTRACT

In this work a program aiming the simulation of power system dynamics was designed and implemented. This program is the first step towards the development of a power system dynamics simulator, which is part of the Simulator for Teaching and Training (SET) currently being developed by the power systems group of the Universidade Federal de Santa Catarina (GSP/UFSC).

Definitions and concepts related to SET and a initial specification of its requeriments are presented, as well as a review of the main models of the components and the mathematical methods adequate to the simulation of slow dynamics electrical systems.

Aiming to the obtention of modularity and flexibility, the techniques of object-oriented programing and the language C++ were chosen.

This system was implemented on a workstation using the UNIX operating system in order to keep compatibility with previously developed modules of the SET.

SIMBOLOGIA

CGA - Controle Automático da Geração;

D - Coeficiente de amortecimento;

E - Variáveis de interface;

E', E'' - Tensões estatóricas relacionadas à efeitos transitórios e subtransitórios;

E_{fd} - Tensão estatórica equivalente à tensão aplicada ao enrolamento de campo;

F - Conjunto das funções algebrizadas;

F_{HP}, F_{IP}, F_{LP} - Constantes proporcionais às frações de potência produzida nos estágios de alta, intermediária e baixa pressão da turbina térmica, respectivamente;

f_i, f_j - Frequências nas barras i e j;

f_{ref} - Frequência de referência do sistema;

g - Funções que definem as injeções de corrente;

G - Conjunto das funções que definem as equações algébricas;

GSP - Grupo de Sistemas de Potência;

H - Conjunto das funções que definem as equações diferenciais;

I_d - Corrente de eixo direto;

I_q - Corrente de eixo quadratura;

IHM - Interface Homem Máquina;

J - Momento de inércia do eixo turbina- gerador;

K - Ganho do regulador de velocidade;

K_a - Ganho do regulador de tensão;

K_v - Constante proporcional à abertura da válvula de controle da turbina térmica;

LABSPOT - Laboratório de Sistemas da Potência;

ms - Fluxo de vapor na saída da caldeira;

MSP - Modelo do Sistema de Potência;

mw - Fluxo virtual de vapor gerado;

P_a - Potência elétrica acelerante;

PD - Pressão do vapor na saída da caldeira;

PDT - Queda de pressão no superaquecedor;

P_e - Potência elétrica produzida pelo gerador;

P_{GV} - Sinal de saída do regulador de velocidade;

P_{HP} , P_{IP} , P_{LP} - Potência mecânica produzida pela turbina térmica nos estágios de alta, intermediária e baixa tensão, respectivamente;

P_m - Potência mecânica produzida pela turbina;

POO - Programação Orientada para Objeto

PT - Pressão do vapor na válvula de entrada da turbina;

p_0 , q_0 - Potências iniciais ativas e reativas da carga;

R - Regulação de velocidade;

r - Estatismo transitório;

r_a , r - Resistência do enrolamento estatórico do gerador;

RTU - Unidade remota de controle (Remote Terminal Unity);

SCADA - Sistema supervisor e aquisição de dados (Supervisory Control and Data Aquisition);

SET - Simulador para Ensino e Treinamento;

SGE - Sistema de Gerenciamento de Energia;

T - Transformação entre os sistemas de referência d- q e re- im;

T_a - Torque acelerante;

T_e - Torque elétrico;

T_m - Torque mecânico;

$tk \hat{\phi}$ - Relação de espiras do transformador com defasador e variador de taps;

T_r - Constante de tempo do compensador;

T_{rv} - Constante de tempo do regulador de velocidade;

T_v - Constante de tempo da admissão de combustível na caldeira;

T_w - Constante de tempo da transmissão de calor à água na caldeira;

T_w - Constante de tempo da turbina hidráulica;

u - Subconjunto das variáveis algébricas;

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina;

v - Vetor das variáveis algébricas do sistema;

V_d, V_q - Tensões estatóricas de eixo direto e de eixo quadratura;

V_{ref} - Tensão de referência do sistema de controle da excitação;

V_s - Sinal do estabilizador do sistema elétrico;

V_t - Tensão terminal da máquina síncrona;

x_d, x_q - Reatância de eixo direto e de eixo quadratura;

x'_d, x'_q - Reatância transitória de eixo d e de eixo q;

x''_d, x''_q - Reatância subtransitória de eixo d e de eixo q;

x - Vetor das variáveis de estado do sistema;

Y_k - Reatância equivalente do transformador;

ω - Velocidade angular;

δ - Ângulo do rotor;

Δt - Interválo de integração;

ΔP - Variação de pressão ou de posição nas válvulas de entrada da turbina térmica;

τ'_{do} - Constante de tempo transitória de circuito aberto;

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

Paralelamente ao aumento da dimensão e da interconexão dos sistemas elétricos de potência e conseqüentemente, da complexidade de sua operação, pode-se observar, nas últimas décadas, um grande desenvolvimento nos recursos e nas técnicas computacionais disponíveis. O uso destes recursos e técnicas tem permitido o desenvolvimento de ferramentas computacionais destinadas a auxiliar na operação do sistema, no treinamento de operadores e na pesquisa de técnicas de controle e operação.

À medida que estas ferramentas de apoio foram se desenvolvendo, um novo conceito de software foi se concretizando, dando origem aos atuais ambientes de simulação e, especificamente na área de sistemas de potência, aos simuladores em tempo real para ensino e treinamento (SETs). A aplicação destas novas técnicas e conceitos de desenvolvimento de sistemas computacionais representam, atualmente, uma tentativa de aumentar a qualidade do software, aumentando conseqüentemente sua vida útil.

O trabalho de dissertação de mestrado aqui apresentado representa o esforço de aplicação de uma destas técnicas computacionais - a Programação Orientada para Objetos, à simulação de sistemas elétricos de potência.

1.1 - O PROJETO - MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Uma das linhas de trabalho desenvolvida pelo Grupo de Sistemas de Potência da UFSC (GSP) visa atender a demanda de atualização e desenvolvimento tecnológico das companhias de energia elétrica. Este trabalho é efetuado basicamente através do oferecimento de cursos de atualização e especialização e através do desenvolvimento de ferramentas computacionais de apoio aos engenheiros e aos operadores do sistema. Além de proporcionar o benefício direto do intercâmbio empresa-universidade, esta linha de trabalho chamada genericamente **desenvolvimento** busca atender as necessidades do próprio meio acadêmico brasileiro, ainda carente de softwares de apoio.

Dentre as dificuldades de produção de softwares de grande porte em ambiente acadêmico destaca-se a alta rotatividade dos recursos humanos, característica de instituições de ensino. Visando superar esta dificuldade imposta pela alta rotatividade, tem sido considerada a utilização de técnicas computacionais que permitam o desenvolvimento de softwares modulares, onde os trabalhos possam ser, desde que bem especificados, realizados independentemente por diversos programadores, sem grande comprometimento da produtividade individual.

Dentro desta proposta de desenvolvimento modular de software, e dando continuidade ao projeto de elaboração de um simulador em tempo real do sistema elétrico, atualmente em desenvolvimento pelo GSP, enquadra-se o trabalho desta dissertação.

Este trabalho tem por objetivo principal o projeto e a implementação de uma estrutura computacional destinada à simulação em dinâmica lenta do sistema elétrico de potência, com a exploração dos recursos de modularidade proporcionados pela programação Orientada para Objetos. Esta abordagem tem caráter exploratório, no sentido de verificar a potencialidade da POO para o problema de simulação

dinâmica, e constitui uma parcela significativa do trabalho em questão. Este objetivo, em conjunto com os demais listados abaixo, constitui o projeto desta dissertação de mestrado.

- Contextualização do software SET na operação do sistema elétrico e no ambiente de pesquisa.
- Especificação dos principais requisitos da simulação em dinâmica lenta.
- Documentação dos principais modelos empregados na simulação em dinâmica lenta e nos SETs descritos na bibliografia.
- Definição dos métodos matemáticos de simulação em dinâmica lenta.
- Teste da estrutura desenvolvida.

1.2 DIVISÃO DO TRABALHO

O texto desta dissertação foi elaborado procurando acompanhar a seqüência dos objetivos expostos na seção anterior. No capítulo 2 é exposta a terminologia básica de sistemas de potência visando sua extensão à terminologia do SET. São apresentadas as principais definições relacionadas ao SET bem como sua configuração básica.

No capítulo 3 são apresentados e descritos os modelos dos componentes do sistema elétrico adequados à simulação dinâmica em tempo real, conforme proposto na bibliografia correspondente.

O capítulo 4 é relativo aos métodos matemáticos empregados na simulação do sistema. São descritas as técnicas adotadas e expostos os critérios de seleção empregados.

No capítulo 5 a estrutura computacional desenvolvida é apresentada e discutida.

No capítulo 6 são expostos os testes realizados com a estrutura proposta.

O capítulo 7 apresenta as conclusões e perspectivas deste trabalho.

CAPÍTULO II

CONCEITOS BÁSICOS E REQUISITOS DO SIMULADOR PARA ENSINO E TREINAMENTO

INTRODUÇÃO

Ao longo da última década o Laboratório de Sistemas de Potência do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSPOT - EEL - UFSC) vem desenvolvendo um software de simulação de sistemas elétricos de potência chamado Simulador de Sistemas de Potência. Em seu estágio atual de desenvolvimento este programa é capaz de realizar a simulação do sistema através de fluxos de potência realizados periodicamente, estando adaptado para simular vários sistemas elétricos reais. As condições do sistema simulado são visualizadas através da atualização automática dos monitores dos usuários, o que constitui um princípio de interface homem-máquina. Novas funções de interface homem-máquina estão sendo implementadas, visando aumentar a capacidade do usuário atuar sobre a simulação (por exemplo, interfaces gráficas que permitam a descrição do sistema e alterações no caso em estudo através de ícones dos elementos do sistema elétrico real).

Este capítulo tem por objetivo principal mostrar a expansão do conceito de simulador para um conceito mais amplo de ambiente de simulação, chamado

Simulador para Ensino e Treinamento (SET), cuja configuração engloba tanto o simulador estático, atualmente em operação, quanto o dinâmico, cujo desenvolvimento teve início com a construção do protótipo apresentado neste trabalho.

A fim de obter-se uniformidade na nomenclatura utilizada, na primeira parte deste capítulo são definidos os sistemas, subsistemas e componentes do sistema elétrico de potência, sendo dada ênfase ao subsistema de supervisão e controle, por sua relação com o conceito de SET.

Na segunda parte, são definidas as aplicações e requisitos preliminares do SET e de seus componentes e apresentada sua configuração básica.

Por fim, são determinadas as metas gerais do projeto desenvolvido neste trabalho.

2.1 O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Um sistema de qualquer natureza pode ser definido como "uma coleção de entidades que agem e interagem visando o estabelecimento de um objetivo" [Cegrel, 86]. Para aplicar-se esta definição ao Sistema de Potência deve-se especificar seu objetivo e seus componentes. Define-se o objetivo principal do sistema elétrico de potência (SEP) como "o suprimento de energia elétrica aos consumidores, com qualidade, continuidade e economia". Por qualidade e continuidade entende-se o atendimento da demanda com a manutenção do nível da tensão e da frequência em níveis próximos ao especificado, mesmo sendo o sistema elétrico sujeito a perturbações que tendam a alterar suas condições de funcionamento. Por economia entende-se o máximo aproveitamento dos recursos disponíveis, sem comprometimento na operação do sistema.

Para especificar os componentes do SEP pode-se reuni-los numa estrutura composta de subsistemas de geração, transmissão e controle, relacionados da forma mostrada na figura abaixo (Fig. 2.1).

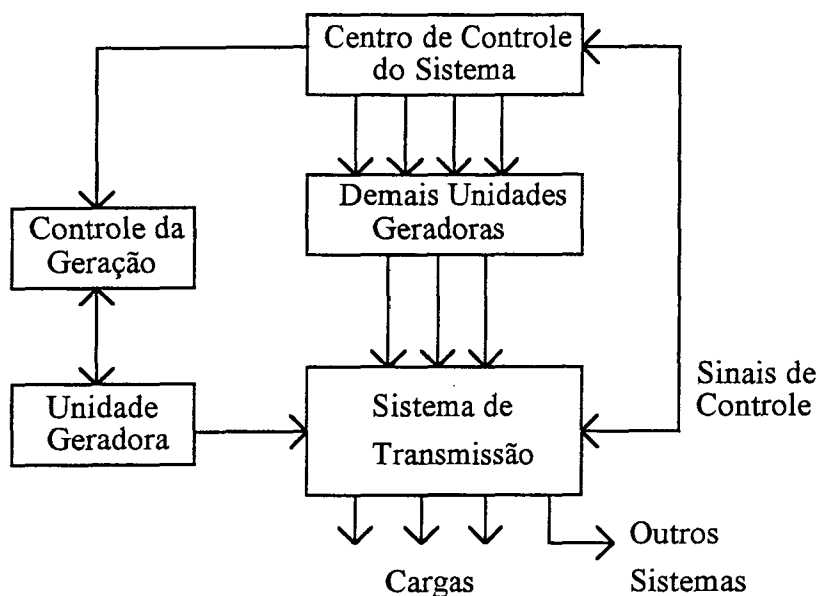


Fig. 2.1 - Diagrama Funcional do Sistema de Potência

As unidades de geração são elementos onde a energia hidráulica, fóssil ou nuclear é convertida em energia elétrica através de máquinas primárias e geradores síncronos, reunidos de modo a formarem as centrais elétricas. Estas centrais são alocadas em locais onde haja disponibilidade de energia, o que costuma ocorrer em locais distantes dos centros consumidores. Assim, para efetuar o abastecimento de energia é necessário um grande sistema de transmissão que, além de fazer a conexão entre as centrais geradoras e os centros consumidores, realiza a interligação entre vários sistemas elétricos. Estas interligações aumentam a confiabilidade e permitem a operação dos sistemas com menor capacidade instalada e a um custo de produção menor [Sasano, 83].

Por carga designa-se a demanda de energia elétrica pelos consumidores. Cada carga pode representar uma fábrica, um centro industrial ou mesmo uma pequena cidade abastecida por uma subestação.

O controle do sistema elétrico é formado pelo sistema de controle central, instalado no centro de controle, e pelos controles locais, instalados em todos os pontos onde existam variáveis que devam e possam ser monitoradas e controladas. Exemplos de controle local são os reguladores de tensão e velocidade instalados nas unidades geradoras e os variadores de taps de transformadores. As ações de controle exercidas pelos controles locais podem ser executadas automaticamente ou através de instruções enviadas pelo centro de controle. A comunicação entre os sistemas de controle locais e o sistema de controle central pode ser estabelecida por rede telefônica, sendo as instruções do operador central enviadas aos operadores regionais; ou através do sistema de comunicação, sendo os sinais de controle enviados diretamente ao sistema de controle local. Para realizar a comunicação entre o sistema elétrico e o sistema de controle central são instaladas Unidades Remotas de Controle (RTUs) em vários pontos do sistema. As RTUs realizam a aquisição das variáveis do sistema elétrico a serem monitoradas, as apresenta ao operador regional e as envia ao sistema de comunicação. Os sinais emitidos pelo controle central, por sua vez, são recebidos pelas RTUs e enviados aos elementos de controle local do sistema elétrico. Desta forma as RTUs funcionam como "olhos, ouvidos e mãos do centro de controle" [Smith, 93].

A estrutura do sistema de controle do sistema de potência é mostrada esquematicamente na figura abaixo (Fig.2.2).

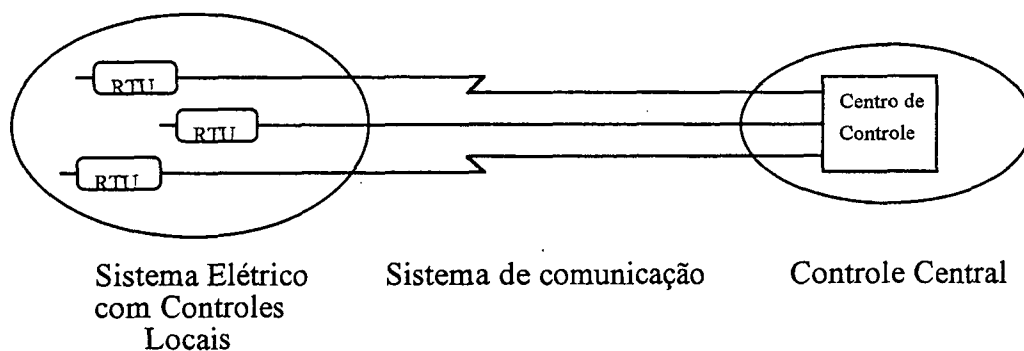


Fig. 2.2 - Diagrama esquemático do sistema de controle

Devido à grande distribuição geográfica do sistema elétrico é conveniente a instalação de subcentros regionais de controle, coordenados pelo sistema central mas com certa autonomia, permitindo a monitoração mais direta e eficaz do sistema. Verifica-se então que os centros de controle estruturam-se de forma hierárquica (em níveis nacionais, regionais, estaduais...), de acordo com a organização das companhias gerenciadoras de energia elétrica e a estrutura geográfica e hierárquica do próprio sistema elétrico.

2.2 - O CENTRO DE CONTROLE

O centro de controle é o local onde é realizada a operação global do sistema, representando o nível mais alto na hierarquia de controle. Sua configuração varia de acordo com a região, o tamanho do sistema e a disponibilidade tecnológica e financeira da companhia gerenciadora de energia. Apesar das diferenças de configuração podemos identificar dois componentes básicos em todo centro de controle: o sistema supervisor e a interface homem-máquina (IHM), também chamada interface do usuário (IU). Segundo a definição estabelecida pelo comitê de padronização do ANSI, o sistema supervisor compreende "todo equipamento de controle, sinalização e telemetria instalado em uma estação principal e todo equipamento complementar instalado em estações remotas" [Smith, 93]. Na configuração mais simples de centro de controle o sistema supervisor é constituído pelo sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) e a interface homem-máquina é constituída pelo console do operador e por um painel de supervisão. O SCADA é um sistema de hardware e software capaz de realizar a aquisição em tempo real dos dados recolhidos pelas RTUs. Sistemas SCADA típicos englobam o sistema de comunicação de controle e permitem pequeno armazenamento e tratamento dos dados adquiridos antes de apresentá-los ao programador. O console do operador é formado por instrumentos de visualização das condições do sistema

elétrico e equipamentos de operação e o painel de supervisão é formado pelo modelo esquemático do SEP, sendo geralmente instalado na sala de operação. A figura abaixo (Fig. 2.3) ilustra esquematicamente este centro de controle.

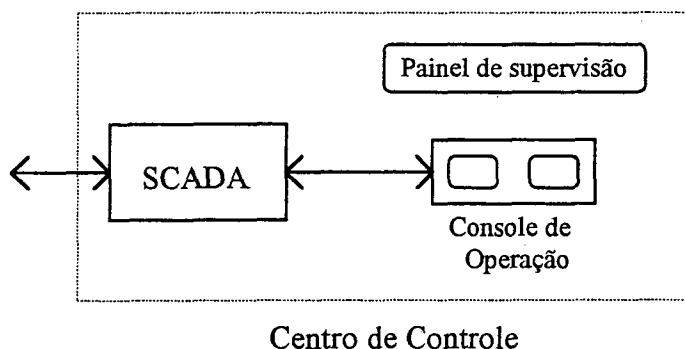


Fig. 2.3 - Configuração de um Centro de Controle

A configuração de centro de controle ilustrada na Fig.2.3 apresenta limitações, tanto no sistema SCADA quanto no painel de supervisão. O sistema SCADA possui apenas testes simples de consistência dos dados, permite pequena quantidade de armazenamento e as informações são transmitidas ao operador quase na mesma forma em que são adquiridas. O painel de supervisão, geralmente de grande dimensão, não permite a visualização imediata de uma parte do sistema que esteja sofrendo uma perturbação, além de não ser suficientemente flexível para representar com facilidade as freqüentes alterações do sistema elétrico e tornar-se maior e mais complexo a medida que o sistema real cresce.

O estágio seguinte na evolução do sistema SCADA foi a inclusão de funções de Controle Automático de Geração (CAG), constituindo o sistema supervisor SCADA/CAG. O CAG é capaz de, a partir dos dados adquiridos pelo SCADA, enviar automaticamente sinais de controle às unidades de geração monitoradas.

Deve-se notar que devido à grande dimensão do sistema de potência, a implementação de cada nova função ao sistema SCADA representa um grande esforço computacional e de desenvolvimento da empresa, especialmente se considerarmos que estas funções devem ser executadas em tempo real. Apenas

recentemente, com a evolução e o barateamento dos recursos computacionais e o surgimento de técnicas avançadas de programação, tem sido permitido o desenvolvimento e a automatização dos centros de controle.

Esta computadorização crescente dos centros de controle levou ao desenvolvimento de uma nova classe de sistemas supervisores, com maior capacidade de armazenamento de dados, maior número de funções implementadas e uma interface homem-máquina mais eficiente e flexível. A este ambiente de controle chama-se Sistema de Gerenciamento de Energia (SGE). As funções implementadas no SGE são chamadas Funções de Aplicação e auxiliam o operador na tomada de decisões e no planejamento da operação. As principais funções de aplicação disponíveis atualmente são a estimação de estado, o fluxo de potência, o fluxo de potência ótimo e a análise de contingências. Com o desenvolvimento da IHM, o painel de supervisão é substituído por esquemas do sistema elétrico permanentemente atualizados disponíveis no próprio console de operação.

Embora o SGE represente uma evolução do SCADA, atualmente o termo SGE é utilizado para designar o ambiente de controle, com as funções de aplicação e a interface homem-máquina, e o termo SCADA para designar o sistema de aquisição e tratamento primário dos dados. Desta forma, o SCADA e o SGE coexistem e evoluem paralelamente no centro de controle. A figura seguinte (Fig. 2.4) ilustra esquematicamente este centro de controle mais moderno.

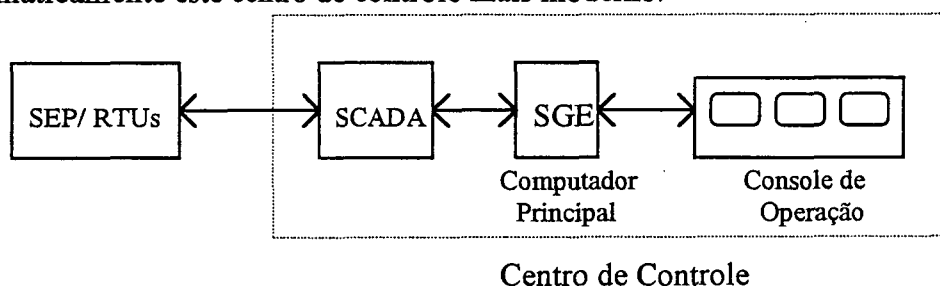


Fig. 2.4 - Configuração do Centro de Controle com SGE

O computador principal representado na Fig.2.4 contém a implementação das funções de aplicação e da interface de comunicação com o operador. Este

computador atua conectado ao SCADA e ao console do operador, constituindo o ambiente em tempo real de operação do sistema. No centro de controle também é encontrado um ambiente que não opera em tempo real, chamado ambiente de estudo. O ambiente de estudo é formado pelas mesmas funções de aplicação encontradas no ambiente em tempo real, implementadas em um computador secundário e acessáveis em um console de estudos. Funções que por sua natureza de ferramentas de planejamento ou pela dificuldade de execução em tempo real (p.e. análise de segurança e simulação transitória) não fazem parte do ambiente em tempo real são também implementadas no computador secundário. A figura abaixo (Fig.2.5) apresenta um exemplo de utilização das funções de aplicação no ambiente de estudo do centro de controle.

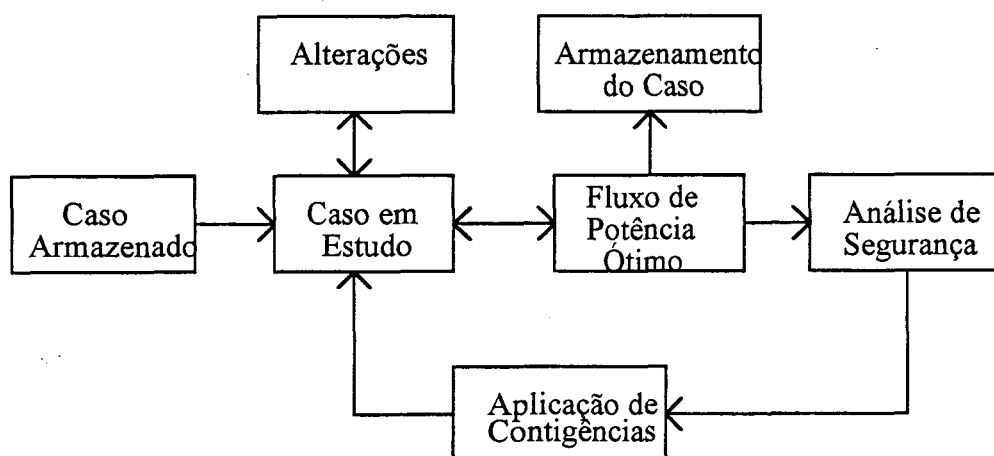


Fig. 2.5 - Exemplo de utilização do ambiente de estudo em um centro de controle

Embora a computadorização do centro de controle represente um auxílio ao planejamento e à operação, ela também exige que haja um bom treinamento e conhecimento das ferramentas disponíveis. Procedimentos de operação bem definidos, documentados e concisos e operadores treinados em sua execução podem aumentar a eficiência da operação e minimizar o impacto de um colapso de grandes dimensões. Atualmente os roteiros de operação devem ser periodicamente atualizados para incorporarem as modificações do sistema e um grande número de fluxos de potência deve ser executado para checar os resultados das ações a cada passo. Embora

este procedimento tenha permitido a elaboração de roteiros satisfatórios, a crescente complexidade da operação dos sistemas elétricos fez surgir o interesse das companhias de energia elétrica e dos cursos de sistemas de potência por uma ferramenta capaz de propiciar treinamento e permitir a realização de testes de estratégias e estruturas de controle de forma mais rápida e eficiente. Este interesse fez surgir o conceito de Simulador para Ensino e Treinamento (SET).

2.3-O SIMULADOR PARA ENSINO E TREINAMENTO - SET

Chama-se SET o ambiente capaz de simular as condições do centro de controle vivenciadas pelo operador do sistema real, através da simulação do sistema de potência, do sistema supervisor e da interface com o usuário. Ao ser instalado nas companhias de energia elétrica, o SET fornece uma maneira de treinar operadores, organizar roteiros de operação e testar estratégias de controle.

Sob o ponto de vista do treinamento, o SET representa a possibilidade de expor os operadores à situações emergenciais que não ocorrem com frequência, como colapsos de tensão, ilhamento, perda de sincronismo e saída de operação de grandes centrais geradoras. Com o emprego do SET os operadores podem ainda ter sua experiência uniformizada, tendo a possibilidade de participar de todas as fases da operação do sistema, visualizando seu comportamento a cada operação executada.

O SET pode também ser amplamente empregado em instituições de ensino e pesquisa de engenharia de sistemas de potência. Aos estudantes ele oferece a oportunidade de analisar o comportamento do sistema sob perturbações, exercer ações corretivas e observar a confirmação do aprendizado teórico através de ações de operação e controle semelhantes às executadas em centros de controle reais. Ao pesquisador ele proporciona um meio rápido e confiável de avaliar o comportamento do sistema e de validar resultados dos seus estudos, submetendo-o a testes de configuração da rede ou de estruturas de controle, por exemplo. O SET pode ainda

ser utilizado em testes de sistemas especialistas de operação. Ao ser instalado em universidades ou centros de pesquisa, proporciona estímulo ao desenvolvimento de pesquisas em áreas de modelagem de dispositivos, métodos numéricos, computação gráfica, sistemas distribuídos e sistemas de tempo-real.

2.4- CONFIGURAÇÃO DO SET NO CENTRO DE CONTROLE E NO AMBIENTE DE PESQUISA

A figura abaixo (Fig.2.6) apresenta uma configuração possível de integração do SET a um centro de controle. Neste exemplo considera-se que o centro de controle contenha o sistema SCADA e o sistema SGE.

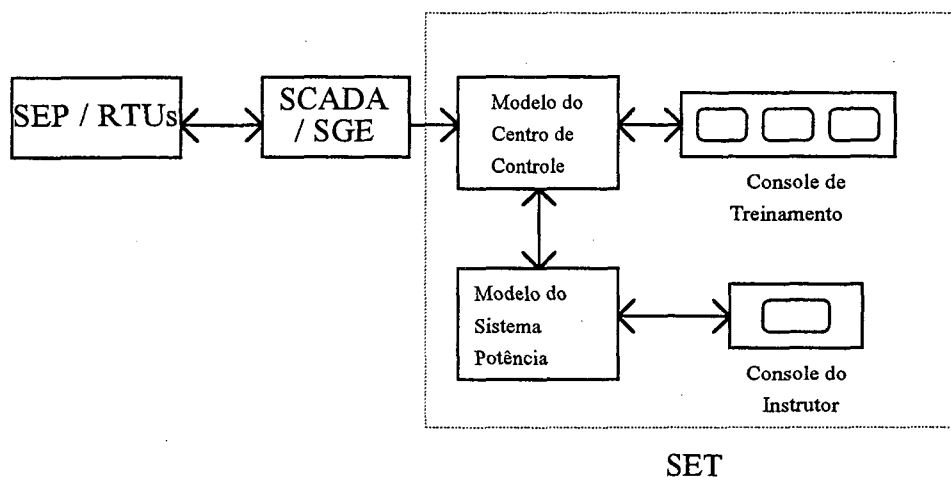


Fig. 2.6- SET instalado em um centro de controle

Nesta figura identifica-se os componentes básicos do SET que são os consoles de treinamento, o console do instrutor, o modelo do sistema de potência e o modelo do centro de controle.

Os consoles de treinamento são réplicas dos consoles de operação e neles o treinando tem acesso às mesmas informações e funções de aplicação disponíveis ao operador real do sistema. O console do instrutor é o local onde a pessoa que conduz o

treinamento atua sobre o sistema simulado, criando cenários (seqüências de distúrbios e correções) ou conduzindo seções de treinamento.

O modelo do centro de controle contém funções que simulam aquelas realizadas pelo centro de controle real. Funções típicas do modelo de centro de controle são simulação da aquisição de dados, do controle supervisor, da interface homem-máquina e do CAG. Em [Chu, 91] é proposta uma configuração na qual o modelo do centro de controle é implementado em um computador secundário, presente na maioria dos centros de controle mais sofisticados, e que contém uma cópia das funções de aplicação utilizadas no ambiente de tempo real do centro. Desta forma, evita-se a duplicação de software, economiza-se hardware e garante-se que o modelo do centro de controle, no que diz respeito as funções de aplicação, manter-se-á atualizado.

O modelo do sistema de potência (MSP), também chamado módulo simulador ou simplesmente simulador, pode ser considerado o componente principal do SET. O MSP é responsável pela simulação em tempo real de todo o sistema monitorado ou estudado. Os dados enviados pelo simulador devem reproduzir o comportamento do sistema elétrico em todas as situações de operação, inclusive respondendo às ações de controle enviadas dos consoles de treinamento e do instrutor. Além de realizar a simulação estática ou dinâmica do sistema elétrico, o MSP deve ser capaz de executar as funções de aplicação implementadas no modelo do centro de controle.

Através da configuração mostrada na Fig.2.6, pode-se identificar dois estados de operação do SET. Em um estado são recebidos os dados do sistema real, através do SCADA/ SGE do centro de controle. Assim, no console de treinamento pode ser visualizado o estado do sistema elétrico real e sua reação às ações do operador. Caso o treinando deseje atuar sobre o sistema observado (por exemplo, testando uma estratégia de controle), os dados recebidos pelo SCADA são enviados ao modelo de centro de controle, e a ação do treinando se refletirá não sobre o sistema de potência real, mas sobre o modelo do sistema de potência, que executará a

simulação solicitada. Estabelece-se assim o outro estado de operação do SET, no qual os dados visualizados no console de operação são fornecidos pelo simulador do sistema elétrico. É neste estado que o SET opera quando são realizadas seções de treinamento de operadores, criação de cenários e elaboração de roteiros de restauração e controle.

A configuração básica do SET instalado em um centro de pesquisa permanece a mesma apresentada para instalação em um centro de controle (Fig.2.6). A alteração mais significativa refere-se ao fato do SET não estar conectado ao sistema supervisor real, não operando portanto, no modo de recepção dos dados do sistema real, através do SCADA e do EMS. Assim, após o início de uma simulação a partir de um caso armazenado, que pode corresponder ou não a um sistema real, toda informação sobre o estado do sistema estudado provém do simulador do sistema de potência. O modelo do centro de controle é instalado em um computador disponível no centro de pesquisa, onde são implementadas funções que simulam o sistema supervisor e a interface homem-máquina.

2.5- REQUISITOS DO SET

Para cumprir os objetivos citados acima é necessário que o SET, especialmente o modelo do centro de controle e o modelo do sistema de potência, satisfaçam os requisitos citados a seguir.

- O modelo do centro de controle, além das funções de aplicação, deve conter uma simulação do sistema SCADA. Neste sistema SCADA simulado devem ser representadas as interferências, atrasos e perdas de dados que ocorrem na aquisição real. Com isto obtêm-se maior realismo e pode-se utilizar as funções de estimação de estados implementadas no modelo do centro de controle.
- Uma das aplicações do SET mencionadas anteriormente é a criação de cenários de situações emergenciais. Para permitir esta aplicação o modelo do centro

de controle deve suportar o armazenamento de casos de simulação e oferecer ao instrutor ferramentas que auxiliem a criação destes cenários e o modelo do sistema de potência deve estar apto a processá-las. Exemplos de ferramentas úteis na criação de cenários são programas heurísticos de criação de situações emergenciais e programas de estabilidade transitória. A simulação transitória deve estar disponível ao instrutor e também ao treinando sem exigir preparo prévio de dados. No entanto deve ser observado que a simulação transitória não se processa em tempo real, obrigando a uma interrupção no ciclo de simulação. Esta interrupção da simulação para utilização de outra função de aplicação constitui um exemplo de ambiente de estudo do SET, onde o compromisso com a solução em tempo real deixa de existir. O desenvolvimento de técnicas de processamento paralelo e distribuído podem aumentar a viabilidade de operação simultânea do ambiente em tempo real e do ambiente de estudo, evitando a interrupção da simulação.

- A simulação dinâmica do sistema deve ser feita em tempo real, o que é alcançado quando o envio dos dados ao modelo do centro de controle se faz no mesmo intervalo da aquisição real de dados. A aquisição de dados em um centro de controle é realizada em taxas variáveis de poucos segundos, sendo 5s o tempo típico de atualização [Foley, 90]. Assim, para que a taxa de aquisição de dados seja mantida e a simulação do sistema caracterize-se como sendo em tempo real, seu ciclo máximo de solução deverá ser também de 5s. O ciclo de solução do simulador compreende a atualização da topologia da rede, das condições das cargas e dos taps dos transformadores, a solução das equações do sistema e a atualização dos monitores dos usuários. Fenômenos com tempo de observação muito menores que o ciclo de solução, típicos de simulações subtransitórias e transitórias, não devem ser considerados no MSP pois além de não corresponderem ao ciclo de atualização do SET, exigem elevado esforço computacional, aumentando o tempo de execução a ponto de impedir a simulação em tempo real. A simulação implementada no SET deve descrever fenômenos com grande tempo de evolução, entre 0.1s e 17min, característicos da operação em tempo real [Anderson, 80], denominada simulação de

dinâmica lenta ou simulação de longo termo. A simulação de dinâmica lenta em tempo real é objeto de estudo recente, exigindo o desenvolvimento de modelos e técnicas de solução que visem aumentar a velocidade de processamento, sem contudo comprometer significativamente a precisão do cálculo e conseqüentemente a validade da simulação.

- O modelo do sistema elétrico é um software que deve estar permanentemente sendo atualizado e alterado. Estas alterações permitem sua adaptação a novos sistemas elétricos, possibilitam a realização de pesquisas de desenvolvimento de novos modelos, novas estruturas de controle e novos métodos numéricos de solução e possibilitam a utilização de modelos simplificados para representar componentes que não afetam a evolução do fenômeno em estudo, economizando esforço computacional. A facilidade de manutenção que o software oferece chama-se flexibilidade. Pelos exemplos citados acima, pode-se dizer que quanto mais flexível for o software, maior sua expectativa de vida útil. Ao desenvolver-se um software de grandes dimensões, como o SET, sua expectativa de vida é um fator importante, devendo ser considerada a utilização de técnicas que aumentem sua flexibilidade.

- A inclusão de novas funções de aplicação e as alterações nas funções existentes são procedimentos freqüentes no SET, devendo ser suportadas pelo modelo do sistema elétrico sem necessidade de alterações significativas em sua estrutura.

- Por ser desenvolvido em ambiente acadêmico, onde é verificada uma alta rotatividade de recursos humanos, devem ser previstas técnicas que aumentem a modularidade do programa.

- Por seu caráter multi-usuário o SET deve ser desenvolvido em um ambiente computacional e uma linguagem de programação que permitam sua utilização em centros de controle e ambientes de pesquisa com diferentes recursos de hardware. A esta possibilidade de ser transportado de um ambiente computacional para outro denomina-se portabilidade do software.

CONCLUSÃO

Neste capítulo foi apresentado o conceito de Simulador para Ensino e Treinamento (SET) e estabelecidos seus objetivos e configurações preliminares. Foram também estabelecidos os requisitos preliminares básicos de seus principais componentes. O modelo do sistema elétrico, MSP, destinado a simular os principais comportamentos do sistema, foi apresentado como um componente do SET.

Nos capítulos seguintes são apresentadas as técnicas e os modelos utilizados no desenvolvimento do protótipo de Modelo do Sistema Elétrico com simulação dinâmica proposto neste trabalho, sendo descritas as considerações feitas para satisfazer os requisitos citados neste capítulo.

CAPÍTULO III

MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA PARA SIMULAÇÃO NO SET

INTRODUÇÃO

Chama-se modelo ao corpo de informações de um sistema, definido para um propósito específico e capaz de representar os aspectos do sistema que se queira observar. Desta forma, a dedução e a seleção de um conjunto de modelos é sempre realizada considerando-se o objetivo do estudo.

A seleção dos modelos dos componentes do sistema elétrico adotados no MSE (Modelo do Sistema Elétrico) obedece a uma série de critérios impostos pelos requisitos do SET. O mais significativo destes critérios diz respeito a frequência do fenômeno que se quer observar na simulação. Conforme exposto anteriormente, o simulador integrante do SET deve realizar a simulação do sistema elétrico em tempo real, o que determina a utilização da simulação de dinâmica lenta. A simulação de dinâmica lenta exige a representação de componentes do sistema que usualmente não têm seu comportamento dinâmico modelado (turbinas, caldeiras). A utilização de um passo de integração grande, da ordem de 1s, não permite a observação dos efeitos dos componentes com dinâmica rápida, mesmo que seus modelos tenham sido incluídos no sistema. Isto representa um desperdício de informação e conseqüentemente,

desperdício de esforço computacional. Além desta não utilização da informação gerada, a modelagem de componentes com constantes de tempo muito diferentes prejudica a estabilidade numérica da solução. Embora a estabilidade numérica esteja mais vinculada ao método e ao passo de integração utilizados, no que diz respeito a modelagem, deve-se evitar a inclusão de modelos com constantes de tempo muito diferentes. Para evitar estes efeitos, os componentes com comportamento dinâmico muito rápido são representados por modelos estáticos, considerando-se que sua variação de estado ocorre instantaneamente; e outros componentes do sistema, cujo comportamento inclui oscilações com diferentes tempos de resposta (máquinas síncronas, p.e.) são representados por modelos simplificados, onde as constantes de tempo menores são desprezadas.

Outro aspecto a ser observado na seleção dos modelos que constituirão o SET é a velocidade de solução necessária à simulação em tempo real, que conduz à necessidade de modelos mais simplificados do que os desenvolvidos para simulação em dinâmica lenta.

Finalmente, deve-se observar que devido ao emprego do SET como simulador de situações emergenciais, onde ocorrem alterações bruscas na topologia e no estado do sistema, os modelos adotados devem tornar o software robusto, isto é, capaz de suportar tais situações sem perda da estabilidade numérica.

A consideração dos critérios expostos acima levou ao desenvolvimento de um conjunto de modelos de componentes do sistema elétrico cuja implementação no simulador pode ser recomendada. Muitos destes modelos já foram testados em simuladores de dinâmica lenta e mesmo em SETs, tendo alcançado desempenho aceitável, conforme descrito na bibliografia [Irving, 87].

3.1- MODELOS DOS COMPONENTES DAS UNIDADES GERADORAS

Cada unidade geradora de um sistema elétrico é constituída basicamente pela máquina primária, pelo gerador síncrono e pelos diversos mecanismos de controle de geração, conforme ilustrado no diagrama da Fig.3.1. Os mecanismos de controle de geração têm por finalidade a manutenção do estado de equilíbrio dinâmico do sistema, sendo sua equação fundamental baseada na segunda lei de Newton para sistemas rotativos:

$$T_a = T_m - T_e = J \frac{2}{p} \frac{d\omega}{dt} \quad (3.1)$$

onde T_a é o torque acelerante, T_m é o torque mecânico entregue pela turbina, T_e é o torque elétrico produzido pelo gerador, J é o momento de inércia do eixo da turbina e do gerador, expresso em Kg.m^2 ou J.s^2 , ω é a velocidade deste eixo e p é o número de pólos do gerador.

Com o torque e a velocidade em valores por unidade, pode-se escrever:

$$T_m - T_e = 2 H \frac{d\omega}{dt} \quad (3.2)$$

sendo H a constante de inércia, definida por:

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{p} \right)^2 \frac{J \omega_s^2}{P_b}$$

onde ω_s e P_b são os valores de base da velocidade e da potência, respectivamente.

A equação (3.2) costuma ser expressa em termos das potências P_m e P_e , na forma mostrada abaixo, onde $M = 2 H$.

$$P_m - P_e = M \frac{d\omega}{dt}$$

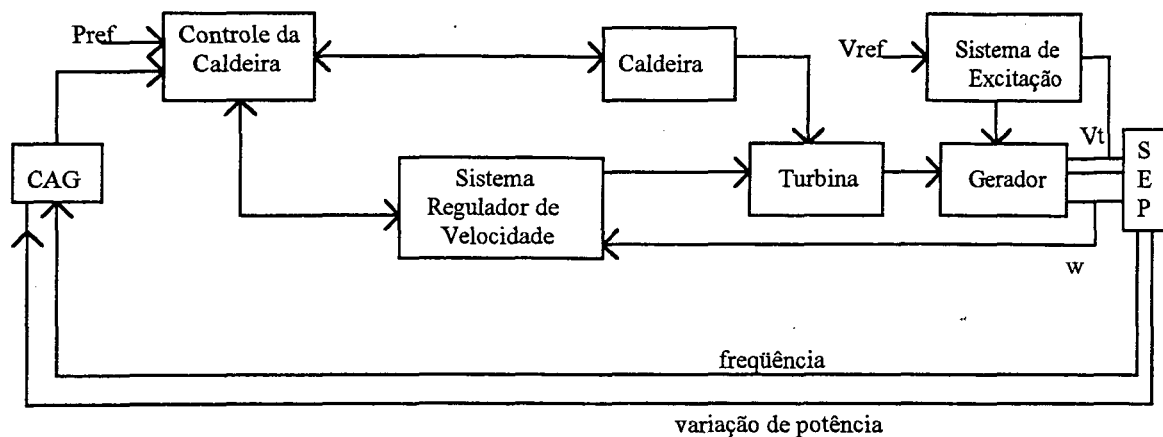


Fig.3.1 - Diagrama Funcional da Unidade Geradora Conectada ao SEP

No diagrama da Fig.3.1 podemos identificar dois grupos de sistemas de controle. Um grupo é chamado **controle primário**, sendo constituído pelo sistema de controle da excitação e pelo sistema de controle da velocidade. Tais controles são automáticos e rápidos [Anderson, 73]. O **sistema de controle da excitação**, atuando na manutenção do nível de tensão gerada, altera também o valor da potência elétrica gerada (P_e), enquanto o **sistema regulador de velocidade** controlando a velocidade do gerador, através da válvula de admissão de vapor ou água da turbina, altera o valor da potência mecânica fornecida (P_m). Desta forma, atuando na equação de oscilação (3.2), os dois controles contribuem na manutenção da estabilidade do sistema .

O outro grupo identificado na figura é chamado **controle secundário**, sendo constituído pelo controle automático de geração (CAG) e pelo controle de admissão de água e combustível da caldeira, no caso de unidades geradoras termoelétricas. Chamamos CAG ao sistema de controle que periodicamente recebe informações sobre o estado do sistema e envia sinais de controle à todas as unidades geradoras. Estes sinais são recebidos pelos mecanismos de controle das unidades, sendo usados, por exemplo, para regular o consumo de combustível da caldeira ou regular a velocidade de referência do regulador de velocidade (Fig.3.1). Por sua resposta lenta, o sistema de controle secundário não pode ser ignorado em estudos de estabilidade dinâmica, ao passo que o sistema de controle primário, por sua resposta rápida, deve ser significativamente simplificado.

Nesta seção são apresentados modelos que podem ser adotados para representar os diversos elementos das unidades geradoras e são descritas as adaptações feitas para adequá-los à solução em dinâmica lenta e especialmente ao SET.

3.1.1 - MÁQUINAS SÍNCRONAS

A estrutura utilizada para representar a máquina síncrona em estudos de estabilidade de sistemas elétricos de grande porte encontra-se bem definida, podendo ser visualizada na Fig. 3.2, onde de forma esquemática, representa-se a máquina conectada ao SEP.

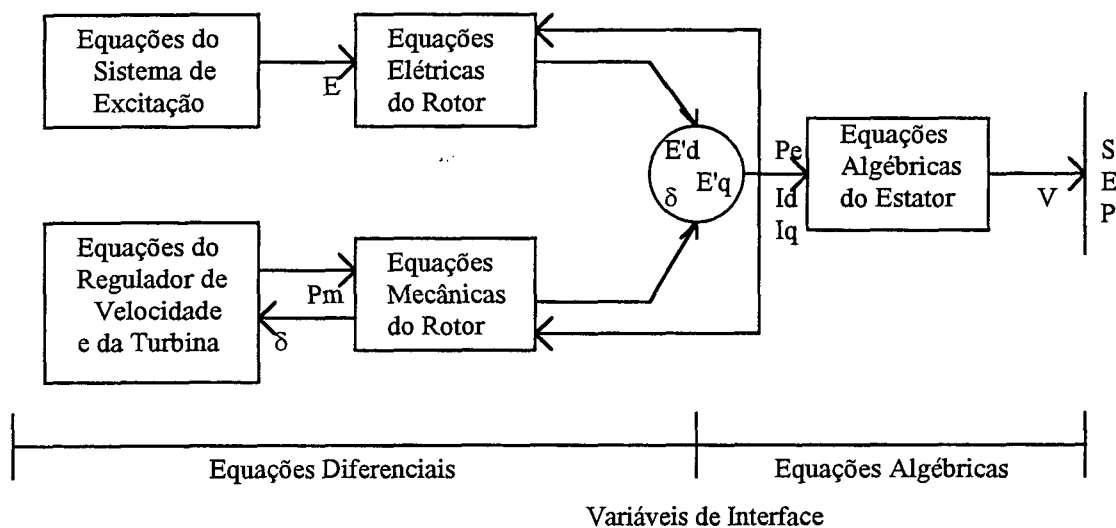


Fig.3.2 - Digrama da Máquina Síncrona e de seus controles

Em estudos de sistema elétricos de grande porte os enrolamentos estatóricos da máquina síncrona têm seus transitórios elétricos desprezados, sendo representados por um sistema de equações algébricas, e o rotor da máquina pode ser representado por um número variável de equações diferenciais de primeira ordem. Tais equações podem ser agrupadas em dois sistemas; um formado pelas equações relacionadas ao comportamento mecânico e outro formado pelas equações relacionadas ao comportamento elétrico da máquina.

As equações abaixo expressam a velocidade ω do rotor da máquina em rad/s e o ângulo δ , em radianos elétricos, entre o sistema de coordenadas em que as equações são desenvolvidas e o sistema de coordenadas complexo de referência do sistema.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_s}{2H} \left\{ P_m - P_e - D(\omega - \omega_s) \right\} \quad (3.3)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (3.4)$$

Para máquinas síncronas costuma ser utilizado um sistema de referência resultante da aplicação de uma transformação de Park às grandezas do rotor e do estator. A escolha de um eixo de referência girante com a mesma velocidade do rotor elimina a dependência do tempo nos coeficientes desenvolvidos para as equações de tensão. A Fig.3.3 ilustra a posição relativa destes sistemas e a posição da tensão terminal em uma máquina i.

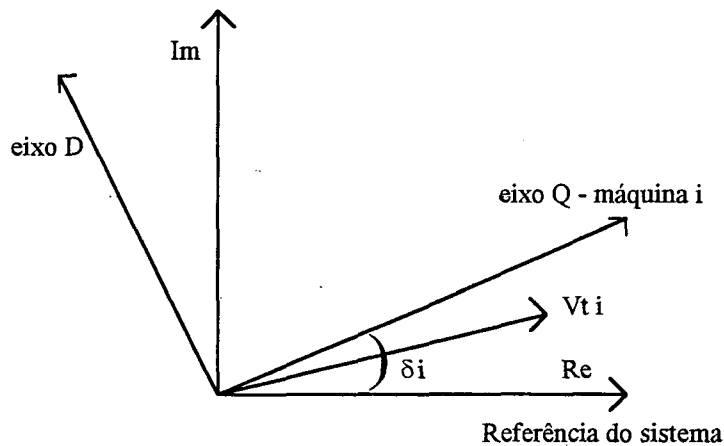


Fig.3.3 - Sistema de eixos de referência do sistema elétrico e da máquina i.

Para a transformação de eixos de referência de uma grandeza F utiliza-se a transformação T empregada conforme mostrado:

$$\left[F_{d,q} \right] = T \left[F_{re,im} \right]$$

onde

$$[F_{d,q}] = [F_d \ F_q]^T$$

$$[F_{re,im}] = [F_{re} \ F_{im}]^T$$

sendo F_d , F_q , F_{re} e F_{im} as componentes de eixo direto, de eixo em quadratura, de eixo real e de eixo imaginário, respectivamente, da grandeza F .

Foi escolhida a transformação ortogonal T mostrada abaixo:

$$\begin{bmatrix} F_d \\ F_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{sen } \delta & \cos \delta \\ \cos \delta & \text{sen } \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{re} \\ F_{im} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

sendo δ o ângulo definido na Fig.3.3.

Para representar o comportamento elétrico do gerador foram desenvolvidos modelos padronizados que podem ser encontrados na literatura referenciados através de números. Neste trabalho é utilizada a classificação apresentada em [Arrilaga, 83], onde podem ser encontradas as considerações feitas em seus desenvolvimentos. A seguir faz-se uma breve descrição de cada modelo.

- Modelo 1:

É também conhecido como modelo de tensão constante em série com reatância transitória de eixo d (x'_d). Neste modelo nenhum transitório elétrico é representado. As equações que o descrevem são apresentadas a seguir *1:

$$V_q = E'_q - r_a I_q + x'_d I_d \quad (3.6)$$

$$V_d = -r_a I_d - x'_q I_q \quad (3.7)$$

e as equações do comportamento mecânico (3.3) e (3.4).

- Modelo 2:

Neste modelo é representado o efeito transitório da variação do fluxo no eixo d através da inclusão de uma equação diferencial para a tensão induzida no eixo q . O conjunto de equações que o descrevem é:

$$V_q = E'_q - r_a I_q + x'_d I_d \quad (3.8)$$

*1As equações apresentadas neste trabalho foram desenvolvidas considerando-se o eixo direto adiantado 90° em relação ao eixo em quadratura.

$$V_d = -r_a I_d - x'_q I_q \quad (3.9)$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{E_{fd} - E_q}{\tau'_{do}} = \frac{E_{fd} + (x_d - x'_d) I_d - E'_q}{\tau'_{do}} \quad (3.10)$$

- Modelo 3:

No modelo 3 são representados os efeitos transitórios do rotor nos eixos d e q, requerendo assim duas equações diferenciais para as tensões induzidas no eixo q e d. O conjunto de equações elétricas utilizado nesta representação é mostrado a seguir:

$$V_q = E'_q - r_a I_q + x'_d I_d \quad (3.11)$$

$$V_d = E'_d - r_a I_d - x'_q I_q \quad (3.12)$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{E_{fd} - E_q}{\tau'_{do}} = \frac{E_{fd} + (x_d - x'_d) I_d - E'_q}{\tau'_{do}} \quad (3.13)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = \frac{E_d}{\tau'_{do}} = \frac{-(x_q - x'_q) I_q - E'_d}{\tau'_{do}} \quad (3.14)$$

- Modelo 4:

Neste modelo são representados os efeitos transitórios do rotor no eixo d e os efeitos subtransitórios de eixo d e q. Além das equações algébricas para o estator, utiliza-se três equações diferenciais :

$$V_q = E''_q - r_a I_q + x''_d I_d \quad (3.15)$$

$$V_d = -r_a I_d - x''_q I_q \quad (3.16)$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{E_{fd} - E_q}{\tau'_{do}} = \frac{E_{fd} + (x_d - x'_d) I_d - E'_q}{\tau'_{do}} \quad (3.17)$$

$$\frac{d E''_q}{dt} = \frac{E'_q + (x'_d - x''_d) I_d - E''_q}{\tau''_{do}} \quad (3.18)$$

$$\frac{d E''_d}{dt} = \frac{-(x_q - x''_q) I_q - E''_d}{\tau''_{do}} \quad (3.19)$$

- Modelo 5:

Este modelo requer a utilização de quatro equações diferenciais para representar os efeitos transitórios e subtransitórios dos eixos d e q. Estas equações estão mostradas abaixo:

$$V_q = E''_q - r_a I_q + x''_d I_d \quad (3.20)$$

$$V_d = E''_d - r_a I_d - x''_q I_q \quad (3.21)$$

$$\frac{d E'_q}{dt} = \frac{E_{fd} - E_q}{\tau'_{do}} = \frac{E_{fd} + (x_d - x'_d) I_d - E'_q}{\tau'_{do}} \quad (3.22)$$

$$\frac{d E'_d}{dt} = \frac{E_d}{\tau'_{do}} = \frac{-(x_q - x'_q) I_q - E'_d}{\tau'_{do}} \quad (3.23)$$

$$\frac{d E''_q}{dt} = \frac{E'_q + (x'_d - x''_d) I_d - E''_q}{\tau''_{do}} \quad (3.24)$$

$$\frac{d E''_d}{dt} = \frac{-(x_q - x''_q) I_q - E''_d}{\tau''_{do}} \quad (3.25)$$

O modelo 1, ou clássico, possui as vantagens de requerer uma quantidade mínima de equações e dados da máquina. No entanto, em estudos de estabilidade dinâmica sua utilização não é aconselhada, pois um maior detalhamento da máquina é necessário [Adibi, 74].

A inclusão de constantes de tempo pequenas nos modelos subtransitórios (mod-4 e mod-5) os torna inadequados para estudos de dinâmica lenta.

Desta forma, dentre os cinco modelos apresentados, aqueles com representação dos efeitos transitórios (modelo 2 e modelo 3) são os mais adequados à simulação da dinâmica lenta. Devido ao compromisso com a velocidade de processamento, o modelo 2, por necessitar de um número menor de equações diferenciais, e conseqüentemente, menor tempo de processamento, mostra-se o mais atrativo para implementação no SET.

A representação da máquina síncrona em simuladores de dinâmica lenta, devido à necessidade de evidenciar fenômenos com evolução bastante lenta, pode requerer considerações adicionais àquelas realizadas no desenvolvimento dos modelos padronizados descritos acima. Em [Irving, 87] é proposto um modelo de gerador desenvolvido especialmente para simuladores em tempo real. Faz-se a seguir uma análise mais detalhada deste modelo.

Parte-se das seguintes considerações:

- A velocidade da máquina é próxima a velocidade síncrona.
- Os efeitos subtransitórios são desprezados, isto é, não são considerados os enrolamentos amortecedores, sendo seu efeito representado através de um coeficiente D na equação de torque acelerante.

$$I_D = 0$$

$$I_Q = 0$$

- A tensão induzida no estator devido a variação temporal do campo é desprezada.

$$\dot{\lambda}_d = 0$$

$$\dot{\lambda}_q = 0$$

- Os efeitos transitórios dos eixos d e q não são considerados.

$$x'_d = x_d$$

$$x'_q = x_q$$

- A indução de corrente no núcleo rotórico não é considerada, reduzindo a representação do rotor a um circuito de campo no eixo d.

Aplicando estas considerações às equações de tensão e fluxo mostradas abaixo,

$$V_d = -r I_d - \omega \lambda_q - \dot{\lambda}_d$$

$$V_q = -r I_q + \omega \lambda_d - \dot{\lambda}_q$$

$$V_f = r I_f - \dot{\lambda}_f$$

$$0 = -r_D I_D - \dot{\lambda}_D$$

$$0 = -r_D I_D - \dot{\lambda}_D$$

onde,

$$\lambda_d = L_d I_d + L_{AD} I_D + L_{AD} I_f$$

$$\lambda_q = L_q I_q + L_{AQ} I_Q$$

$$\lambda_D = L_{AD} I_D + L_{AD} I_f + L_D I_D$$

$$\lambda_Q = L_{AQ} I_Q + L_Q I_Q$$

$$\lambda_f = L_f I_f + L_{AD} I_d + L_{AD} I_D$$

e utilizando a definição de E, sendo E a tensão induzida no estator equivalente à corrente

de campo i_f [Anderson, 77]:

$$E = I_f \omega L_{AD}$$

tem-se :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r & -x_q \\ x_d & -r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

e

$$V_f = r_f I_f + \dot{\lambda}_f \quad (3.27)$$

onde:

$$\dot{\lambda}_f = L_f \dot{I}_f + L_{AD} \dot{I}_d \quad (3.28)$$

O termo $L_{AD} \dot{I}_d$ representa a tensão induzida no enrolamento de campo devido a variação do fluxo mútuo entre o campo e o eixo direto do estator. A variação de i_d é

considerada muito pequena, por ter-se suposto que a operação da máquina é próxima às condições de regime permanente e pode-se desprezar o termo correspondente. A equação (3.28) fica:

$$V_f = r_f I_f + L_f \dot{I}_f \quad (3.29)$$

De acordo com [Anderson, 77], E_{fd} é a tensão induzida no estator equivalente à tensão aplicada ao campo, sendo definida por $E_{fd} = (V_f L_{AD}) / 3 r_f$ e τ'_{do} é a constante de tempo do enrolamento de campo definida por $\tau'_{do} = L_{AD} / r_f$.

Substituindo-se estas definições em (3.29) tem-se:

$$E_{fd} = \tau'_{do} \frac{dE}{dt} + E \quad (3.30)$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{E_{fd} - E}{\tau'_{do}} \quad (3.31)$$

A expressão para P_e é obtida a partir da equação :

$$P_e = I_d V_d + I_q V_q \quad (3.32)$$

onde, com a substituição das equações algébricas para V_d e V_q (eq.(3.26)) obtêm-se:

$$P_e = -r I_d^2 - r I_q^2 + (x_d - x_q) I_d I_q + E I_q \quad (3.33)$$

Com a substituição da expressão acima na expressão para a velocidade (3.3) obtêm-se um sistema de três equações diferenciais com cinco variáveis: ω , δ , E , I_d e I_q . Isto indica a necessidade de expressões para I_d e I_q para que o sistema possa ser solucionado. Aplicando-se a transformação de eixos de referência definida em (3.5) às equações de tensão (3.26) e explicitando-se I_d e I_q obtêm-se:

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \frac{1}{r^2 + x_d x_q} \begin{bmatrix} -r & x_q \\ -x_d & -r \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} -\sin \delta & \cos \delta \\ \cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{re} \\ V_{im} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E \end{bmatrix} \right\} \quad (3.34)$$

ou

$$I_d = \frac{1}{r^2 + x_d x_q} \left[r(V_{re} \sin \delta - V_{im} \cos \delta) + x_q (V_{re} \cos \delta + V_{im} \sin \delta) + x_q E \right] \quad (3.35)$$

e

$$I_q = \frac{1}{r^2 + x_d x_q} \left[r(-V_{re} \cos \delta - V_{im} \sin \delta - E) + x_d (V_{re} \sin \delta - V_{im} \cos \delta) \right] \quad (3.36)$$

Assim, o modelo completo para o gerador proposto em [Irving, 87] será:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_s}{2H} \left\{ P_m + r I_d^2 + r I_q^2 + (x_q - x_d) I_d I_q - E I_q - D (\omega - \omega_s) \right\} \quad (3.37)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (3.38)$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{E_{fd} - E}{\tau'_{do}} \quad (3.39)$$

$$I_d = \frac{1}{r^2 + x_d x_q} \left[r(V_{re} \sin \delta - V_{im} \cos \delta) + x_q (V_{re} \cos \delta + V_{im} \sin \delta + E) \right] \quad (3.40)$$

$$I_q = \frac{1}{r^2 + x_d x_q} \left[r(-V_{re} \cos \delta - V_{im} \sin \delta - E) + x_d (V_{re} \sin \delta - V_{im} \cos \delta) \right] \quad (3.41)$$

Nas equações acima, as variáveis P_m e E_{fd} referem-se à turbina e ao regulador de tensão, respectivamente, e suas expressões dependerão dos modelos adotados para estes elementos.

3.1.2 - SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

A configuração básica do sistema de excitação é ilustrada na Fig.3.4, onde estão representados a excitatriz, seu regulador de tensão e o estabilizador do sistema de excitação. Os sinais V_s e V_{ref} correspondem à saída do estabilizador do sistema de potência e ao sinal de referência de tensão, respectivamente.

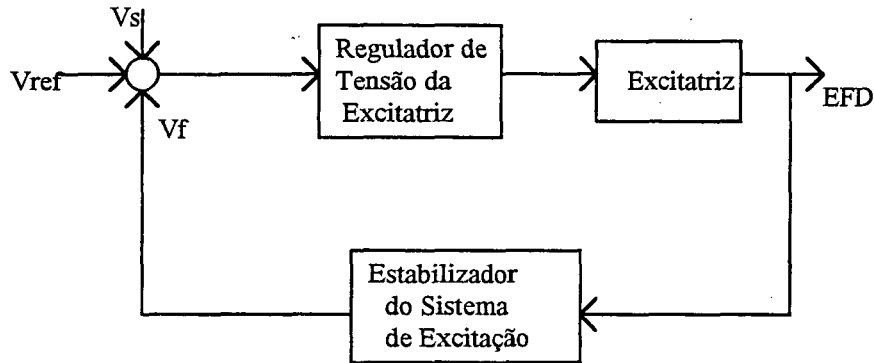


Fig.3.4 - Diagrama funcional do sistema de controle de excitação

A excitatriz é geralmente representada por uma constante de tempo e um ganho na forma $1/(K + sT)$. Em [IEEE CR, 81] é indicado 0.15s como valor máximo para as constantes de tempo da excitatriz e os valores apresentados para o coeficiente de ganho variam de 0.1 a 1.0, de acordo com o tipo de equipamento utilizado. A comparação destes valores com as demais constantes de tempo e ganhos do sistema faz com que a excitatriz normalmente não seja incluída em simulações dinâmicas. O regulador de tensão da excitatriz é representado em estudos de estabilidade por uma função de transferência do tipo $K/(1 + sT)$, sendo que a constante de tempo T é pequena, não ultrapassando 0.02s, e o ganho K tem valores elevados visando a diminuição do erro estático. Assim, o regulador de tensão da excitatriz será representado apenas por seu ganho K.

A utilização do estabilizador da malha de excitação, conforme descrito em [Anderson, 77] visa melhorar as condições de estabilidade do sistema, permitindo a utilização de ganhos maiores no regulador de velocidade. A representação do

estabilizador em simulação de sistemas de sistemas de grande porte não é usual, não tendo sido incluída neste trabalho. Caso haja interesse em incluí-lo na formulação do sistema de excitação, sua função de transferência, normalmente da forma $sKf / (1 + sTf)$, poderá ser acoplada à função de transferência do regulador de tensão, formando um novo modelo de sistema de excitação.

Após as considerações expostas acima, o sistema de excitação será representado conforme figura abaixo (Fig.3.5):

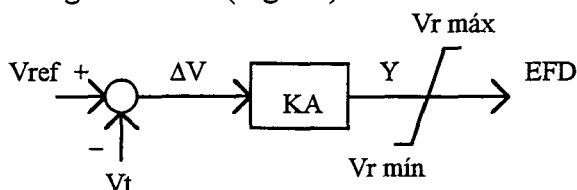


Fig.3.5 - Modelo simplificado do sistema de controle da excitação

À saída do regulador foi acoplado um limitador do tipo "windup", conforme proposto em [Irving, 87]. As equações para este modelo são:

$$\begin{aligned}
 Y &= K_a (V_{ref} - V_t) \\
 E_{fd} &= Y && \text{para } V_{mín} < Y < V_{máx} \\
 E_{fd} &= V_{mín} && \text{para } Y < V_{mín} \\
 E_{fd} &= V_{máx} && \text{para } Y > V_{máx}
 \end{aligned} \tag{3.42}$$

O valor de V_{ref} para cada sistema de excitação deverá ser calculado através das condições de regime permanente, conforme a equação abaixo, sendo $E_{fd,rp}$ calculado a partir das condições de regime permanente do gerador.

$$V_{ref} = \frac{E_{fd,rp}}{K_a} + V_{t,rp} \tag{3.43}$$

3.1.3 - REGULADORES DE VELOCIDADE

A finalidade do sistema regulador de velocidade é manter constante a velocidade do gerador atuando sobre o fluxo de vapor entregue à turbina, no caso de

unidades geradoras térmicas, ou sobre o fluxo de água, no caso de unidades hidráulicas e conseqüentemente, atuando sobre a potência mecânica de entrada do gerador. Sua configuração típica, conforme mostrado na Fig.3.6, consiste de um transdutor de velocidade, um mecanismo de controle da abertura das válvulas e de válvulas controladas.

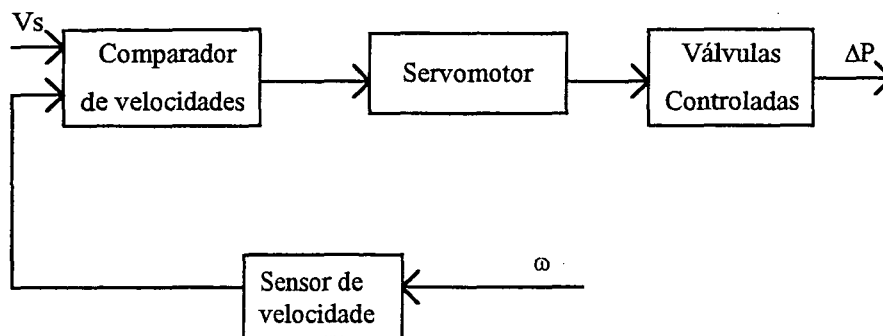


Fig.3.6 - Diagrama funcional do sistema de controle da velocidade

O sinal de referência V_s provém do CAG e o sinal de saída ΔP indica a variação da pressão na entrada da turbina devido a variação nas posições das válvulas de admissão de vapor.

Parâmetros típicos para os diversos componentes são encontrados em [IEEE CR, 73], onde são propostos dois modelos de regulador de velocidade, sendo um para unidades geradoras hidroelétricas (Fig. 3.7a) e outro para unidades geradoras termoelétricas (Fig. 3.7b).

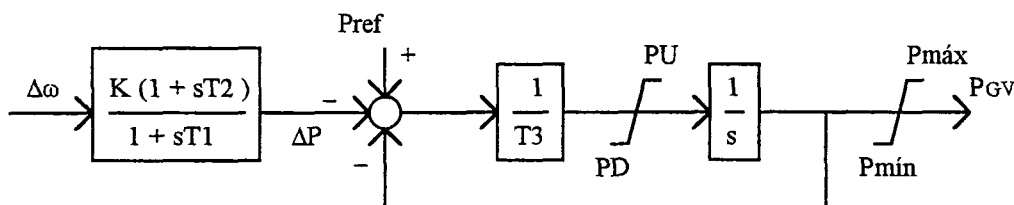


Fig. 3.7a - Modelo de regulador de velocidade de unidades geradoras hidroelétricas

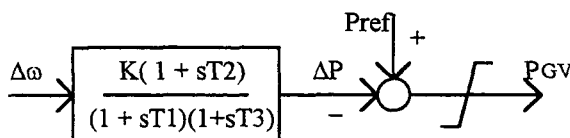


Fig. 3.7b - Modelo de regulador de velocidade de unidades geradoras termoelétricas

O ganho K é igual ao inverso da regulação de velocidade R ($R = \Delta \omega / \Delta P$) e seu valor típico é 0.06 pu s/rad [Irving, 87]. Para reguladores de velocidade sem realimentação de aceleração as constantes de tempo $T1$ e $T2$ são nulas. A constante de tempo $T3$, introduzida para representar o mecanismo do servomotor, tem valor médio de 0.5s para unidades geradoras hidroelétricas e 0.1s para unidades geradoras termoelétricas. Os modelos simplificados de reguladores de velocidade são apresentados abaixo (Fig. 3.8a e Fig. 3.8b) :

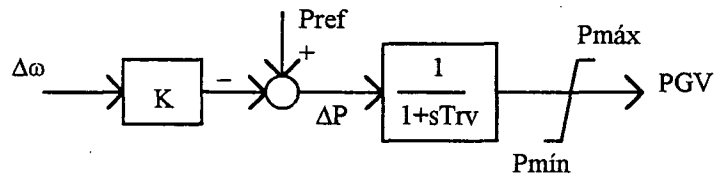


Fig. 3.8a - Modelo simplificado do regulador de velocidade da unidade geradora termoelétrica

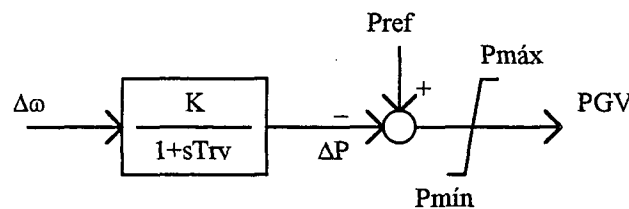


Fig. 3.8b - Modelo simplificado do regulador de velocidade da unidade geradora hidroelétrica

onde $T_{rv} = T3$. As equações para o modelo de sistema de regulação de velocidade das unidades termoelétricas apresentado na Fig. 3.8a são:

$$\Delta \omega = \omega - \omega_s \quad (3.44)$$

$$\Delta P = P_{ref} - K \Delta \omega \quad (3.45)$$

$$\frac{d P_{GV}}{dt} = \frac{\Delta P - P_{GV}}{T_{rv}} \quad (3.46)$$

e para o modelo da Fig. 3.8b são:

$$\Delta \omega = \omega - \omega_s \quad (3.47)$$

$$\frac{d \Delta P}{dt} = \frac{K \Delta \omega - \Delta P}{T_{rv}} \quad (3.48)$$

$$P_{GV} = P_{ref} - \Delta P \quad (2.49)$$

3.1.4 - TURBINAS HIDRÁULICAS

Para representação de turbinas hidráulicas foi adotado o modelo proposto em [IEEE CR, 73], ilustrado abaixo (Fig. 3.9). Este modelo, embora bastante simplificado, oferece precisão suficiente para estudos de estabilidade, sendo amplamente utilizado em programas de simulação de sistemas de potência.

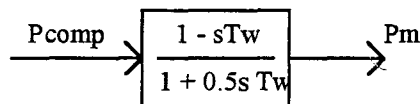


Fig. 3.9 - Modelo simplificado da turbina hidráulica

A constante de tempo T_w , chamada constante de tempo da água, está relacionada ao tempo necessário para acelerar a água na tubulação. Seu valor pode ser calculado conforme descrito no apêndice II de [IEEE C.R., 73]. A equação para a turbina hidráulica, empregando o modelo acima, será:

$$\frac{d P_m}{dt} = \frac{P_{comp} - \frac{d P_{comp}}{dt} - P_m}{0.5 T_w} \quad (3.51)$$

Na equação acima P_{comp} refere-se ao sinal de saída do compensador do regulador de velocidade. Este compensador é empregado para reduzir o ganho da regulação de velocidade em altas frequências e com isto tornar o comportamento da turbina hidráulica menos oscilatório. O modelo da turbina hidráulica com o compensador associado tradicionalmente usado é mostrado na Fig. 3.10, onde T_r é a

constante de tempo, R é a regulação (normalmente entre 4% e 5%) e r é chamado estatismo transitório.

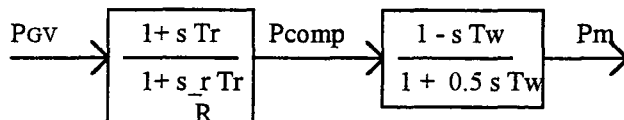


Fig. 3.10 - Conjunto compensador - turbina hidráulica

Para T_r pode-se usar a aproximação usual: $T_r = 6 T_w$.

O valor do estatismo transitório r é calculado por $r = 2,5 \frac{T_w}{M}$.

3.1.5 - TURBINAS TÉRMICAS

O modelo adotado para representar as turbinas térmicas é o IEEE- TipoB, apresentado em [IEEE, 73] e reproduzido na Fig. 3.11. Este modelo representa uma turbina com três estágios, armazenamento de vapor antes do estágio de alta pressão, reaquecimento simples e injeção direta de vapor no estágio de baixa pressão.

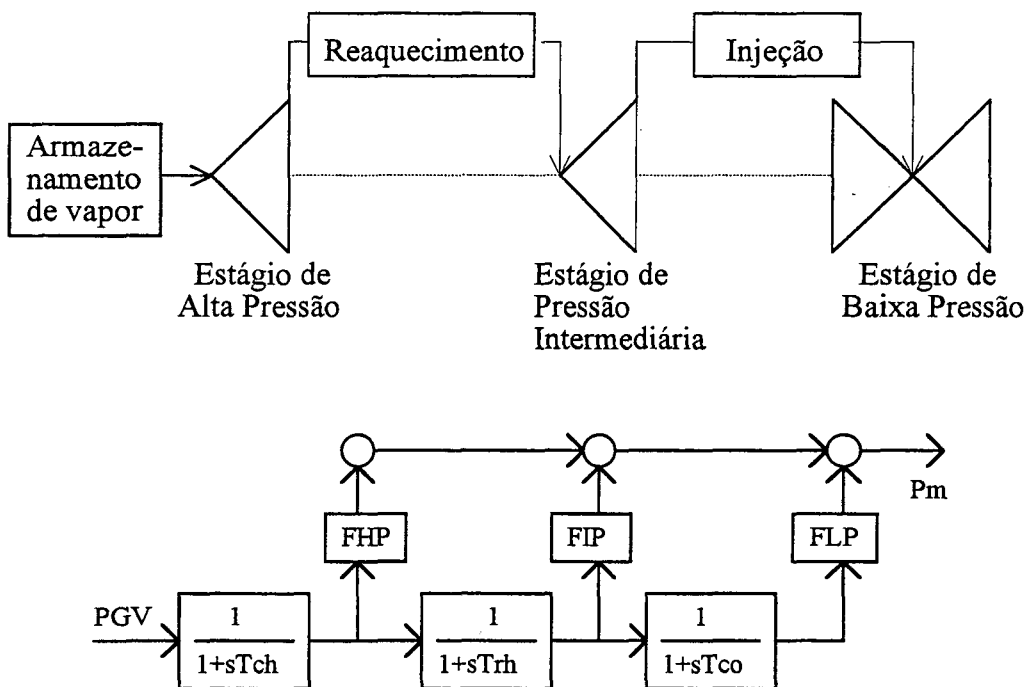


Fig. 3.11 - Diagrama funcional e modelo da turbina térmica

Na figura acima, as constantes de tempo T_{ch} , T_{rh} e T_{co} representam atrasos devido ao armazenamento, reaquecimento e injeção de vapor, respectivamente. As constantes F_{HP} , F_{IP} e F_{LP} são proporcionais às frações de torque produzido em cada estágio, devendo portanto obedecer a expressão

$$F_{HP} + F_{IP} + F_{LP} = 1 \quad (3.52)$$

As equações que descrevem o comportamento deste modelo são:

$$\frac{d P_{HP}}{dt} = \frac{P_{GV} - P_{HP}}{T_{ch}} \quad (3.53)$$

$$\frac{d P_{IP}}{dt} = \frac{P_{HP} - P_{IP}}{T_{rh}} \quad (3.54)$$

$$\frac{d P_{LP}}{dt} = \frac{P_{IP} - P_{LP}}{T_{co}} \quad (3.55)$$

$$P_m = P_{HP}F_{HP} + P_{IP}F_{IP} + P_{LP}F_{LP} \quad (3.56)$$

3.1.6 - CALDEIRAS

A necessidade de estudar o comportamento do sistema elétrico sujeito à grandes perturbações, com oscilações que persistem por vários minutos, fez crescer o interesse por simulações de dinâmica lenta e, conseqüentemente, pela representação de dispositivos com comportamento dinâmico lento. Dentre estes dispositivos, destaca-se o sistema de geração de vapor. Os modelos de sistema de geração de vapor desenvolvidos originalmente pela indústria são constituídos por dezenas de equações diferenciais que permitem a observação de diversas variáveis internas da caldeira. Estes modelos, embora ofereçam bastante precisão e tenham sido plenamente validados, não adaptam-se a estudos de sistemas de potência, onde um grande número de unidades geradoras deve ser estudado simultaneamente. Surgiram, assim, modelos simplificados, onde apenas as principais variáveis são consideradas e grande número

das variáveis internas e não linearidades são desprezadas. Os modelos desenvolvidos para simulação em dinâmica lenta devem ainda sofrer simplificações adicionais para que possam ser utilizados em simuladores em tempo real. Sendo a modelagem de caldeiras em simulações em tempo real um trabalho bastante recente, não existem modelos definitivamente aceitos para sua representação. A seguir é feita uma breve descrição do processo de geração de vapor e de dois modelos propostos na bibliografia.

Genericamente pode-se representar o processo de geração de vapor pelo diagrama da Fig. 3.12, sendo seus principais subsistemas e variáveis de interesse especificados a seguir:

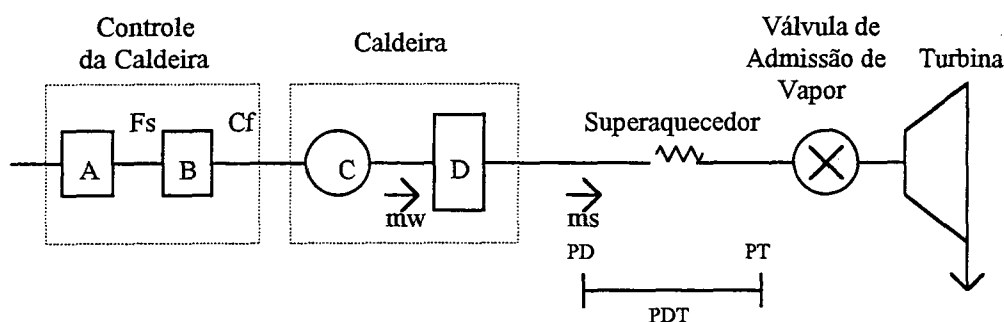


Fig. 3.12 - Diagrama do processo de geração de vapor

- A - Controle da admissão de água e combustível;
- B - Admissão e queima de combustível, admissão de água e transferência de calor à água;
- C - Geração de vapor;
- D - Armazenamento de vapor na caldeira;
- F_s - Função de controle do sistema água-combustível;
- C_f - Taxa de queima de combustível.
- mw - Fluxo virtual de vapor gerado;
- ms - Fluxo de vapor caldeira-turbina;
- PD - Pressão do vapor na saída da caldeira;
- PT - Pressão do vapor na válvula de entrada da turbina;
- PDT - Queda de pressão no superaquecedor;

O comportamento deste sistema pode ser descrito através das variações nas pressões e nos fluxos nos locais especificados. Desta forma, pode-se estabelecer que:

- Um sistema de controle (PID, PI, PD ou outro) atua de admissão de combustível e água, sendo responsável pela manutenção da pressão interna de vapor na caldeira;
- A queima do combustível é representada por uma função exponencial e uma constante de tempo (T_v) representa o atraso na admissão do mesmo;
- Uma constante de tempo T_w (5 a 7s) é introduzida devido ao tempo necessário à transmissão de calor da parede do tubo à película de água;
- O fluxo virtual m_w difere do fluxo de vapor gerado m_s pelo armazenamento de vapor na caldeira e uma constante de tempo (C_b) representa o atraso introduzido por este armazenamento:

$$PCD = \frac{1}{sC_b}(m_w - m_s) \quad (3.57)$$

- A pressão na válvula de controle (PT) sofre uma queda em relação à pressão na saída da caldeira devido ao atrito nas tubulações dos superaquecedores. Esta queda de pressão é proporcional ao quadrado do fluxo de vapor m_s . Assim,

$$PT = PD - PDT \quad (3.58)$$

e

$$PDT = K m_s^2 \quad (3.59)$$

Na equação acima (3.59), K é o coeficiente de atrito, devendo ser calculado em função do tamanho da tubulação do superaquecedor.

- O controle do fluxo de vapor gerado é realizado pela válvula de controle VT. A abertura desta válvula ocorre em degraus, podendo ser representada pela variação em uma constante KV. As variações em KV

são controladas pelo sistema regulador de velocidade, conforme indicado na Fig. 2.6.

$$ms = Kv PT \quad (3.60)$$

De acordo com as definições acima o seguinte diagrama pode ser desenvolvido para descrever o processo:

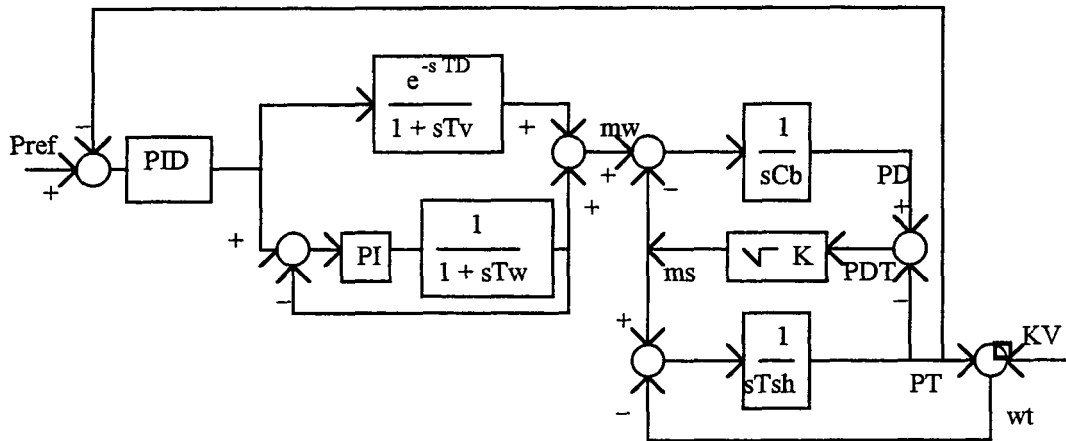


Fig. 3.13 - Modelo do sistema de geração de vapor

Este modelo, conforme citado em [Kola, 89] apresenta um erro de 2% em relação ao processo real. A partir dele diversas simplificações foram feitas, dando origem a diversos modelos encontrados em [Anderson, 73], [Kola, 89], [Irving, 87] e [EPRI, 85].

Em [Irving, 87] é sugerido o modelo conhecido como "modelo deMello, Mills e B'Rells", também apresentado em [Anderson, 73]. A seguir faz-se uma breve descrição deste modelo. O diagrama de blocos equivalente é apresentado na Fig. 3.14, abaixo.

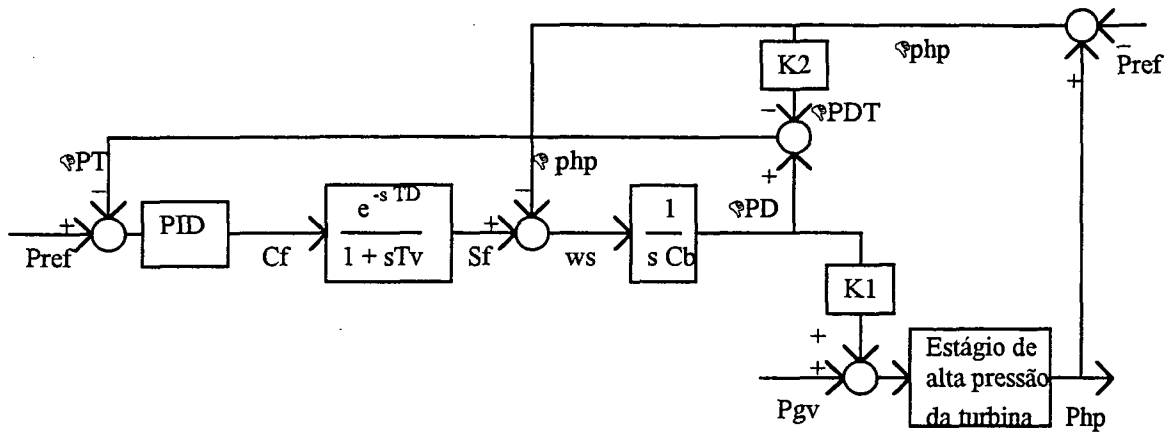


Fig. 3.14 - Modelo deMello para a geração de vapor

O modelo de controle de geração de vapor acima, bastante simplificado, adapta-se à representação de caldeiras do tipo tambor (drum type), onde a dinâmica de admissão de água pode ser desprezada. A queda de pressão no superaquecedor (PDT) é suposta linear. A diferença entre o fluxo de saída da caldeira e o fluxo de entrada na turbina não é considerada ($w_s = w_t$) e o retardo no fluxo de vapor pelo superaquecedor também é desprezado. A pressão na saída da caldeira PD é utilizada diretamente como sinal regulador da entrada de vapor na turbina. De acordo com estas considerações, pode-se escrever o seguinte conjunto de equações para o modelo:

$$\frac{d PD}{dt} = \frac{Sf - \Delta php}{C_b} \quad (3.61)$$

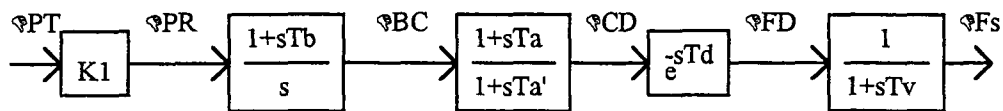
$$\Delta php = P_{hp} - P_{ref} \quad (3.62)$$

$$\Delta PT = \Delta PD - K2 \Delta php \quad (3.63)$$

e para a turbina térmica, considerando o sinal de variação de pressão enviado pela caldeira:

$$\frac{d P_{HP}}{dt} = \frac{P_{GV} - K1 \Delta PD - P_{HP}}{T_{sh}} \quad (3.64)$$

O sistema PID e o sistema de combustível mostrados na Fig. 3.14 podem ser expandidos na Fig. 3.15 a seguir.



sendo descritos pelas expressões seguintes:

$$T_{a'} = T_a/10$$

$$\Delta PR = K_1 \Delta PT$$

$$\frac{d \Delta BC}{dt} = \Delta PR T_b \frac{d \Delta PR}{dt}$$

$$\frac{d \Delta CD}{dt} = \frac{\Delta BC + T_a(d \Delta BC/dt) - \Delta CD}{T_{a'}}$$

$$\Delta FD = \Delta CD_{(t-T_d)}$$

$$\frac{d \Delta SF}{dt} = \frac{\Delta FD - \Delta F_s}{T_v} \quad (3.65)$$

sendo:

K_1 = Ganho do controlador;

K_2 = Fator proporcional a queda de pressão no superaquecedor;

T_a, T_b = Constantes de tempo do controlador;

T_d = Atraso na queima do combustível;

T_v = Constante de tempo da admissão do combustível;

C_b = Constante de tempo do armazenamento de vapor na caldeira;

As equações acima, para o controle de vapor da caldeira, por representarem fenômenos com comportamento dinâmico muito lento em relação aos demais, podem ser solucionadas independentemente das demais equações, reduzindo a dimensão da matriz jacobiana, e podem ainda ser solucionadas através do método de Euler, reduzindo o esforço computacional [Irving, 87]. Este tipo de simplificação facilita a representação do atraso na queima do combustível e^{-sT_d} .

Caso as equações do controle sejam incluídas no jacobiano da unidade geradora, emprega-se outra representação do atraso. Esta representação é proposta em

[EPRI, 85], sendo a função exponencial expandida na série mostrada abaixo, o que permite o desenvolvimento do diagrama de blocos da Fig. 3.16.

$$e^{-sT_d} = 1 - sT_d + \frac{s^2T_d^2}{2!} - \frac{s^3T_d^3}{3!} + \dots \quad (3.66)$$

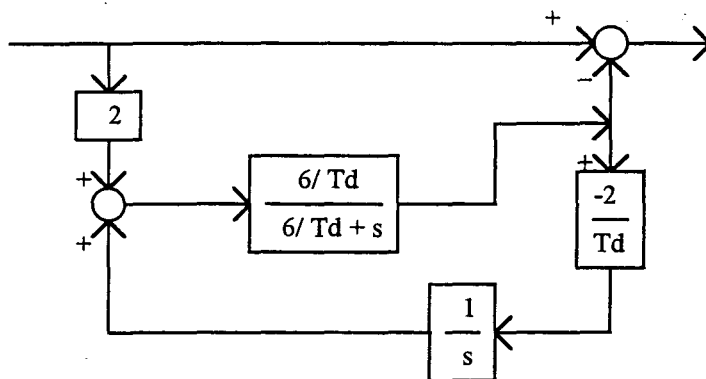


Fig.3.16 - Diagrama de blocos para representação do atraso e^{-sT_d}

3.2 - MODELOS DOS COMPONENTES DA REDE ELÉTRICA

Esta seção apresenta modelos para os principais elementos da rede elétrica, que são: linhas de transmissão, transformadores, compensadores estáticos de reativo e cargas. Todos os elementos da rede elétrica, por possuírem comportamento dinâmico muito rápido para ser modelado em um estudo de dinâmica lenta, são descritos por equações algébricas, considerando-se que eles passam diretamente de um estado de regime para outro. Neste trabalho não é considerado o comportamento dinâmico de relés, compensadores de reativo e da carga.

3.2.1- LINHAS DE TRANSMISSÃO

A linha de transmissão real apresenta resistência, indutância, capacitância e reatância de dispersão, distribuídos ao longo de toda sua extensão. A maneira de representar tais grandezas varia com o comprimento da linha e a precisão desejada no cálculo. Para o simulador adotou-se o modelo com parâmetros concentrados e configuração π , conforme ilustrado na Fig. 3.17. Este modelo é utilizado na representação de linhas médias mas pode ser empregado no simulador para representar linhas longas, pois apenas as grandezas nos terminais das linhas, isto é, nas barras, são calculadas.

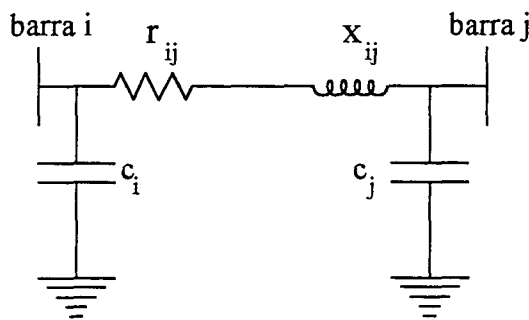


Fig. 3.17 - Modelo para a rede elétrica

Para o circuito π ilustrado tem-se:

$$r_{ij} + jX_{ij} = Z_{ij} \quad (3.67)$$

$$\frac{1}{2j\omega_s c_i} = S_i = S_j \quad (3.68)$$

sendo:

Z_{ij} - impedância série e

$S_i = S_j$ - susceptância paralela

A variação dos parâmetros da linha com a variação da frequência pode ser considerada, sendo expressa por:

$$x_{ij} = x_{ij}^0 + \frac{f_i + f_j}{2f_{ref}} \quad (3.69)$$

$$S_i = S_j = S_i^0 \frac{2f_{ref}}{f_i + f_j} \quad (3.70)$$

sendo

f_i o valor da frequência na barra i

f_j o valor da frequência na barra j

f_{ref} o valor da frequência de referência

3.2.2 - COMPENSADORES ESTÁTICOS DE REATIVO

Os compensadores estáticos de reativos visam a regulação da potência reativa e a melhoria do fator de potência do sistema elétrico, sendo constituídos por reatâncias e capacitâncias instalados em centros de carga ou em linhas de transmissão. Sua configuração é ilustrada abaixo (Fig. 3.18) e suas admitâncias e potências reativas, considerando-se o efeito da variação da frequência, são expressas por:

$$Y_c = j B_0 \frac{f_i}{f_{ref}} \quad (3.71)$$

$$Y_l = -j \frac{1}{X_0} \frac{f_{ref}}{f_i} \quad (3.72)$$

$$Q_c = Y_c |V_i|^2 \quad (3.72)$$

$$Q_l = Y_l |V_i|^2 \quad (3.73)$$

sendo B_0 e X_0 os valores das reatâncias calculados com $f = f_{ref}$.

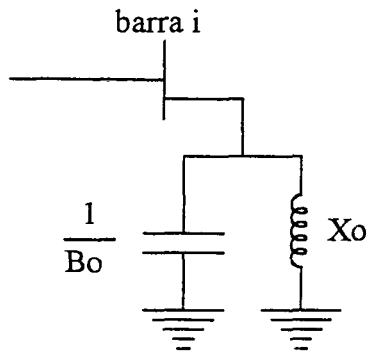


Fig 3.18 - Modelo do compensador estático de reativo

3.2.3 - TRANSFORMADORES

Para o transformador adotou-se o modelo ilustrado na Fig. 3.19, onde um transformador ideal é associado em série à admitância equivalente do transformador real. A reatância de magnetização e as susceptâncias capacitivas são desprezadas. É considerado a existência de um defasador, representado através de uma relação de espiras complexa, e de um variador de taps, representado pela relação de espiras variável t_k . A dinâmica deste sistema variador de taps e defasador não é considerada; as alterações devem ser calculadas em módulos independentes e o valor da relação de espiras $t_k \hat{\phi}$ permanece constante durante o ciclo de solução.

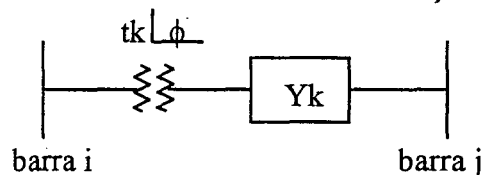


Fig 3. 19 - Modelo do transformador com defasador e variador de taps

A reatância equivalente Y_k é dada por:

$$Y_k = \frac{1}{r_k + j x_k} = \frac{r_k}{r_k^2 + x_k^2} + j \frac{x_k}{r_k^2 + x_k^2} = G_k + j B_k \quad (3.74)$$

Convencionalmente considera-se que a tensão de saída j possui defasamento ϕ da tensão de entrada i . As expressões desenvolvidas a seguir

consideram a barra i como referência de tensão, conforme ilustrado na figura abaixo (Fig. 3.20).

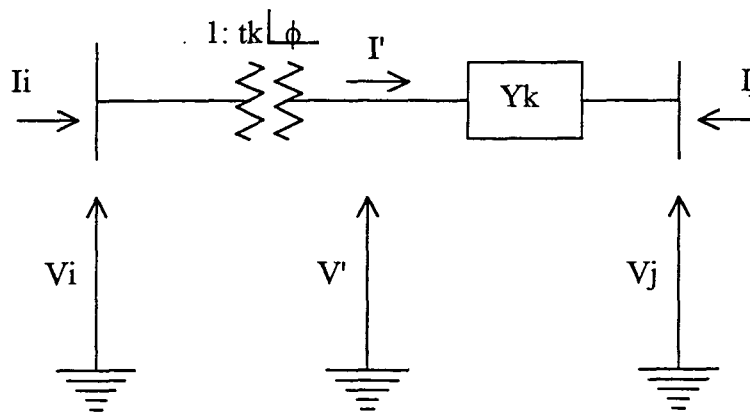


Fig. 3.20 - Modelo do transformador com defasador e variador de taps visto do lado i

De acordo com as convenções adotadas pode-se escrever:

$$\frac{V_i}{V'} = \frac{1}{tk \hat{\phi}}$$

e

$$V_i I_i^* = V' I'$$

$$\frac{I_i}{I'} = tk - \hat{\phi}$$

As equações acima evidenciam que o transformador com defasador possui relações de espiras diferentes para tensão e corrente, o que indica a não-simetria da matriz de admitâncias.

A seguir são desenvolvidas expressões para as admitâncias equivalentes do transformador.

$$I' = (V' - V_i) Y_k$$

$$I_i = tk - \hat{\phi} I' = tk - \hat{\phi} (V_i tk \hat{\phi} - V_j) Y_k$$

$$I_i = tk^2 Y_k V_i - tk - \hat{\phi} Y_k V_j$$

$$I_j = (V_j - V') Y_k = (V_j - V_i tk \hat{\phi}) Y_k$$

$$I_j = -tk - \hat{\phi} Y_k V_i + Y_k V_j$$

Escrevendo as equações acima sob a forma matricial têm-se:

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} tk^2 Y_k & -tk - \hat{\phi} \\ -tk \hat{\phi} & Y_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

Expandindo-se a equação acima em termos reais e imaginários:

$$Y_{ii} = tk^2 Y_k$$

$$Y_{jj} = Y_k$$

$$Y_{ij} = Y_k tk \hat{\phi} = (-G_k tk \cos \phi + B_k tk \sin \phi) + j (G_k tk \sin \phi + B_k tk \cos \phi)$$

$$Y_{ji} = -Y_k tk \hat{\phi} = (-B_k tk \cos \phi - B_k tk \sin \phi) - j (G_k tk \sin \phi - B_k tk \cos \phi) \quad (3.76)$$

Ao ser exercido controle sobre o defasador ou sobre o variador de taps, os novos valores de tk e ϕ_k serão:

$$tk = tk^{\text{anterior}} + C_k (V_i^{\text{especificado}} - V_i) \quad (3.77)$$

$$\phi_k = \phi_k^{\text{anterior}} + D_k (P_i^{\text{especificado}} - P_i) \quad (3.78)$$

sendo V_i e P_i os valores de tensão e potência na barra i e C_k e D_k fatores de ganho.

3.2.4- CARGAS

O modelo de carga utilizado neste trabalho emprega a formulação exponencial, sendo considerada a variação da potência consumida pela carga com a variação da tensão e da frequência na barra a ela conectada. Considerando-se apenas o efeito da variação da tensão sobre a potência consumida pela carga, têm-se:

$$S_1 = p_0 \left(\frac{|V|}{|V_0|} \right)^n + j q_0 \left(\frac{|V|}{|V_0|} \right)^m \quad (3.79)$$

onde os coeficientes n e m especificam o tipo de carga. Se $n = m = 0$ a equação acima refere-se a cargas de potência constante; com $n = m = 1$ representa-se cargas com corrente constante, e para $n = m = 2$ a carga é do tipo impedância constante. Usualmente uma barra alimenta cargas de tipos diversos, o que pode ser expresso por:

$$S_{1j} = \sum_{i=1}^k \left[p_{0i} \left(\frac{|V|}{|V_0|} \right)^{n_i} + j q_{0i} \left(\frac{|V|}{|V_0|} \right)^{m_i} \right] \quad (3.80)$$

sendo k o número de tipos de cargas conectadas à barra j .

A representação mais simples da carga é pelo modelo de impedância constante, sendo um modelo ideal, sob o ponto de vista computacional, para representar cargas próximas a pontos de curto-circuito ou barras onde a tensão esteja muito abaixo do valor especificado. Isto porque a linearidade tensão-corrente deste modelo facilita a convergência dos métodos de solução.

Além da variação com o módulo da tensão, o efeito da variação da potência consumida pela carga com a variação da frequência deve ser considerado.

A equação (3.80) é reescrita da seguinte forma:

$$S_i = \sum_{i=1}^k \left[p_{0i} \left(\frac{|V|}{|V_0|} \right)^{n_i} + f_{p_i} (f - f_{ref}) + j q_{0i} \left(\frac{|V|}{|V_0|} \right)^{m_i} + f_{q_i} (f - f_{ref}) \right] \quad (3.81)$$

onde $f_{p_i} = \frac{\partial p_i}{\partial f_i}$ e $f_{q_i} = \frac{\partial q_i}{\partial f_i}$ são coeficientes obtidos junto a empresas de energia elétrica. Na presente implementação, este efeito não está sendo considerado.

O comportamento dinâmico da carga, embora seja um fenômeno com dinâmica lenta e efeito significativo no sistema, também não é considerado nesta fase de estudo do simulador.

CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados modelos para representar o comportamento em dinâmica lenta de diversos componentes do sistema elétrico.

Ao contrário do que ocorre com a análise transitória, os modelos utilizados em dinâmica lenta e especialmente em simulações em tempo real não estão

completamente definidos. Os modelos propostos neste trabalho, embora coerentes (em relação à frequência dos fenômenos observados), necessitam ainda de testes mais profundos para que possam ser implementados em uma versão definitiva do simulador. O artigo sobre modelagem de caldeiras utilizado neste trabalho ([Kola, 89]) oferece um exemplo de estudo comparativo de modelos. Utilizando como referência um modelo já validado (cujo erro em relação ao fenômeno real é conhecido), outros modelos são simulados e a comparação da precisão e da velocidade entre eles pode ser estabelecida. Mesmo com procedimentos bem definidos, a análise, a validação, e por fim, a decisão de implementação definitiva de um modelo é um processo longo e complexo.

Neste processo de modelagem verifica-se mais uma vez a necessidade de uma estrutura computacional flexível, onde a implementação de novos modelos possa ser feita com rapidez e sem alteração do código desenvolvido. Esta é a proposta da estrutura apresentada no capítulo 5 desta monografia.

CAPÍTULO IV

DEFINIÇÃO MATEMÁTICA DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

INTRODUÇÃO

Neste capítulo define-se o problema da simulação dinâmica do sistema elétrico, apresenta-se a estrutura das equações que o descrevem e discute-se os métodos de solução utilizados.

Na escolha dos métodos de solução devem ser considerados os requisitos do SET descritos no capítulo anterior, sendo que os mais significativos para a escolha dos métodos numéricos são expostos a seguir:

- **Operação em tempo real:** A operação em tempo real determina um compromisso com a alta velocidade de processamento, o que em termos numéricos, representa a utilização de um grande passo de integração e de métodos que suportem este passo sem comprometimento da estabilidade numérica.
- **Robustez:** A robustez numérica refere-se à capacidade do simulador suportar grandes distúrbios mantendo a estabilidade dos métodos de integração e a convergência dos processos iterativos.
- **Economia de armazenamento computacional:** Pela grande dimensão dos sistemas elétricos reais e conseqüentemente dos sistemas de equações que os

modelam, técnicas que permitam minimizar o armazenamento de dados devem ser consideradas.

- Facilidade de manutenção: A manutenção do software é facilitada quando é possível a utilização de bibliotecas matemáticas comerciais ou não, que tenham sido plenamente testadas.

A consideração destes requisitos levou ao estabelecimento de métodos que foram implementados na versão do simulador desenvolvida neste trabalho, sendo expostos a seguir.

4.1- DEFINIÇÃO DA SIMULAÇÃO DINÂMICA E ESTRUTURA DAS EQUAÇÕES DO SEP

A simulação numérica do comportamento dinâmico do sistema elétrico consiste na solução de um conjunto de equações em cada instante de tempo, obtendo-se a evolução temporal das variáveis consideradas nos modelos. Os modelos genéricos do sistema de potência apresentados a seguir são o resultado da união dos modelos dos diversos componentes do sistema apresentados no capítulo 3.

O modelo completo do sistema elétrico de potência é estabelecido por um sistema de equações diferenciais de primeira ordem e um sistema de equações algébricas não-lineares com a forma mostrada abaixo:

$$\frac{d x}{d t}=H(x, v) \quad (4.1)$$

$$G(x, v)=0 \quad (4.2)$$

sendo x o vetor das variáveis de estado, v o vetor das variáveis algébricas, H o conjunto das funções que definem as equações diferenciais e G o conjunto das funções que definem as equações algébricas.

O sistema (4.1) é formado pelas equações diferenciais dos componentes do sistema elétrico que tem seu comportamento dinâmico representado. Sua estrutura é:

$$\frac{d \mathbf{x}}{dt} = \mathbf{H}(\mathbf{x}, \mathbf{v}) = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (4.3)$$

onde \mathbf{u} representa um subconjunto das variáveis algébricas presentes nas equações diferenciais, cuja forma geral é mostrada na eq. (4.4). O sistema (4.3) não é linear. Sendo a rede representada por equações algébricas, a matriz \mathbf{A} é quadrada, esparsa e sua estrutura é blocada, onde cada bloco corresponde ao conjunto de equações diferenciais dos elementos conectados a cada barra. Cada bloco, por sua vez, apresenta estrutura blocada de acordo com os relacionamentos entre as variáveis. A matriz \mathbf{B} é retangular, esparsa e blocada.

O sistema de equações algébricas (4.2) pode ser subdividido nos sistemas abaixo:

$$\mathbf{u} = \mathbf{f}(\mathbf{E}, \mathbf{v}) \quad (4.4)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{E}, \mathbf{v}) = 0$$

onde

$$\mathbf{g}(\mathbf{E}, \mathbf{v}) = [\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_3, \dots, \mathbf{g}_{nb}]^T = 0 \quad (4.5)$$

Nas equações acima (4.4) e (4.5), \mathbf{E} é um subconjunto das variáveis de estado chamado conjunto das variáveis de interface, e \mathbf{g}_j é a injeção de corrente na barra j , que pode ser expressa em componentes reais e imaginárias na forma:

$$\mathbf{g}_j = [\mathbf{g}_{rej}, \mathbf{g}_{imj}]^T \quad (4.6)$$

sendo calculada pelo somatório das injeções de corrente dos k elementos conectados à barra j no instante t . De acordo com a 1ª lei de Kirchoff tem-se:

$$\sum_k \mathbf{g}_k^t = 0 \quad (4.7)$$

4.2 - MÉTODOS DE SOLUÇÃO:

A escolha do método numérico para a solução de sistemas de equações diferenciais e algébricas envolve a escolha do método de integração a ser utilizado na solução das equações diferenciais, do método de solução das equações algébricas e da maneira como o relacionamento entre o sistema diferencial e algébrico será considerado.

De acordo com o relacionamento entre os conjuntos de equações diferenciais e algébricas, os métodos de solução dos sistemas (4.1) e (4.2) podem ser classificados em alternado ou simultâneo ([Stott, 79],[Saikama, 84]).

Nos métodos alternados ou particionados as equações diferenciais e algébricas são solucionadas separadamente para x e v , respectivamente, e as variáveis de interface E são atualizadas a cada passo de integração. Em simulações de regime de dinâmica lenta é possível a utilização de técnicas de interfaceamento não rigorosas, através de técnicas de extrapolação/ interpolação para obtenção das variáveis de interface. Estas técnicas permitem que a solução das equações da rede não seja realizada em todos os passos de integração, mas de acordo com controles do próprio software, economizando tempo e esforço computacional ([Stott, 1979]).

O método alternado tem sido largamente empregado em simulações dinâmicas, sendo utilizado em grande parte dos programas disponíveis comercialmente ([Stott, 1979]). Sua vantagem é a velocidade de solução obtida, no entanto, a permanente atualização das variáveis de interface pode introduzir erros, chamados erros de interface.

Nos métodos simultâneos os sistemas de equações diferenciais e algébricas são solucionados simultaneamente, isto é, como um único sistema, a cada passo de integração. A solução simultânea de (4.1) e (4.2) para x e v implica na utilização de fórmulas de algebrização das equações diferenciais, permitindo que os

dois sistemas possam ser descritos por um único sistema de equações algébricas não-lineares da forma:

$$F(Y, V) = 0 \quad (4.8)$$

onde:

$$F = [H, G]^T$$

Y é o conjunto das variáveis dinâmicas e V é o vetor das tensões nas barras.

A solução iterativa do sistema de equações algébricas a diferenças (4.8) fornecerá a solução correspondente a cada passo de integração.

A utilização dos métodos simultâneos implica no armazenamento e manipulação de um sistema de equações de dimensão muito grande, embora apresente as vantagens de não produzir os erros de interface e terem maior estabilidade numérica. O desenvolvimento de técnicas de solução baseadas no aproveitamento da estrutura de (4.8) permite contornar o problema de sua grande dimensão e tem incentivado o emprego do método simultâneo. Uma destas técnicas será descrita posteriormente neste trabalho.

Quanto ao método de integração, os métodos de solução podem ser classificados em explícitos, implícitos, de passo único e de passo múltiplo. Estas classificações são mostradas a seguir.

A integração numérica de uma equação diferencial pode ser descrita como segue:

Seja x tal que $a < x < b$,

$\alpha \in \mathfrak{R}$ e

$f: [a, b] \times \mathfrak{R} \rightarrow \mathfrak{R}$

Deseja-se encontrar a função $y: x \rightarrow y(x)$ definida em $[a, b]$ e que verifique

$$\begin{cases} y'(x) = f(x, y(x)) \\ y(a) = \alpha \end{cases}$$

Para encontrar uma aproximação da função y , escolhe-se pontos $x_i \in [a, b]$ e procura-se uma aproximação y_i de $y(x_i)$. Se no cálculo de y_n forem utilizados

apenas os valores de x_{n-1} e y_{n-1} o método é dito de passo único. Se no cálculo de y_n forem utilizados os valores de $x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_{n-k}$, e $y_{n-1}, y_{n-2}, \dots, y_{n-k}$, o método é de passo múltiplo (à k passos).

Os métodos à k passos podem ser escritos na forma geral:

$$\alpha_k y_{n+k} + \alpha_{k-1} y_{n+k-1} + \dots + \alpha_0 y_n = h (\beta_k f_{n+k} + \dots + \beta_0 f_n)$$

onde os coeficientes α_i e β_i são independentes de n e $\alpha_k \neq 0$.

Se β_k for zero, uma vez que $y_n, y_{n-1}, \dots, y_{n+k-1}$ e $f_n, f_{n+1}, \dots, f_{n+k}$ são conhecidos, pode-se calcular diretamente y_{n+k} e o método é dito explícito. Se β_k for diferente de zero, é necessário resolver iterativamente a equação $\alpha_k y_{n+k} = K(\beta_k f_{n+k}) + d$, onde d representa os termos conhecidos da expressão geral. O método é então clasificado como implícito. Em métodos explícitos o sistema de equações diferenciais é solucionado pela aplicação de fórmulas de integração à cada uma das equações. Em métodos implícitos as equações diferenciais algebrizadas podem ser solucionadas ou individualmente, ou como subsistemas ou ainda como um único sistema de equações algébricas.

Exemplos de métodos de passo único são o método de Euler e os métodos de Runge-Kutta. Exemplos de métodos de passo múltiplo são os das famílias Adams, de Nystron e de Milne-Simpson [Théodor, 92]. Os métodos da família Adams-Bashforth e de Nystron são explícitos e os da família Adams-Moulton são implícitos.

O método de Euler é simples e de fácil implementação, tendo sido largamente empregado no passado. O método de Runge-Kutta foi um dos primeiros métodos de integração utilizados em estudos de estabilidade de sistemas de potência, tendo sido largamente empregado. Atualmente estes métodos de passo único não são considerados uma boa opção para implementação em programas de simulação.

Quando se deseja utilizar um grande passo de integração, uma propriedade do método que deve ser considerada é sua estabilidade numérica (ou A-estabilidade), pois métodos não A-estáveis impõem uma limitação no valor do passo de integração. Os métodos de Euler e Runge-Kutta não são A-estáveis [Théodor, 92],

exigindo um bom nível de condicionamento do sistema e um passo de integração pequeno, o que os torna inadequados pra simulações de dinâmica lenta.

Os métodos de passo múltiplo são em geral mais estáveis que os métodos de passo único e também mais eficientes computacionalmente por não exigirem o cálculo de pontos intermediários no intervalo de integração. Devido a necessidade de utilizar valores de variáveis e de suas derivadas calculadas em passos anteriores, os métodos de passo múltiplo são restritos à problemas sem descontinuidades ou que permitam reinicialização após sua ocorrência.

O método implícito da família Adams-Moulton de ordem 2 e um passo ($k=1$) é conhecido como método de integração trapezoidal. Por sua estabilidade e eficiência, este método tem seu emprego já generalizado em programas de simulação dinâmica, tendo sido empregado nos simuladores descritos em [Rafian, 87], [Saikama, 84] e [Prais, 89].

Com base nas indicações bibliográficas e nas considerações expostas acima adotou-se neste trabalho o método de integração implícito e o esquema de solução simultâneo devido a garantia de robustez e estabilidade numérica [Rafian, 87]. A seguir faz-se a descrição dos métodos utilizados e apresentam-se suas aplicações às equações do SEP.

À princípio descreve-se a regra de integração trapezoidal utilizada na algebrização das equações diferenciais. Supondo uma equação diferencial de primeira ordem da forma:

$$\dot{y} = f(y) \tag{4.9}$$

e integrando-a, sendo Δt o passo de integração, tem-se:

$$\int_{t-\Delta t}^t \dot{y} dt = y_t - y_{t-\Delta t} \tag{4.10}$$

onde $y_t = y(t)$ e $y_{t-\Delta t} = y(t-\Delta t)$

Supondo f linear no intervalo Δt , pode-se considerar o valor da função $f(y)$ igual a média de seus valores nos extremos do intervalo (Fig. 4.1):

$$\int_{t-\Delta t}^t \dot{y} dt = \frac{\Delta t}{2} (\dot{y}_{t-\Delta t} + \dot{y}_t) \quad (4.11)$$

ou:

$$y_t = y_{t-\Delta t} + \left(\dot{y}_{t-\Delta t} + \dot{y}_t \right) \Delta t \quad (4.12)$$

Substituindo (4.12) em (4.10) tem-se:

$$y_t = y_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t}{2} (f(y_{t-\Delta t}) + f(y_t)) \quad (4.13)$$

Conhecendo-se o valor de $y_{t-\Delta t}$ e $f(y_{t-\Delta t})$ pode-se escrever a equação (4.13) na forma:

$$F(y_t) = 0 \quad (4.14)$$

que será solucionada numericamente para y_t .

Com a aplicação da regra trapezoidal a cada equação diferencial do sistema (4.1) obtêm-se um sistema de equações algébricas à diferenças que, para um sistema de n barras e m unidades geradoras, pode ser representado na forma vetorial apresentada em (4.15). No desenvolvimento destas equações considerou-se que os elementos dinâmicos estão concentrados nas unidades geradoras, Neste trabalho o termo unidade geradora é empregado para designar todo o sistema de geração, incluindo o sistema de geração de vapor, no caso de unidades térmicas, a turbina, o gerador e os sistemas de regulação de tensão e velocidade. A inclusão de modelos dinâmicos para componentes da rede pode ser feita através da expansão do vetor F .

$$F_1(Y_1, V)=0$$

$$F_2(Y_2, V)=0$$

.

.

$$F_m(Y_m, V)=0 \quad (4.15)$$

$$G(E, V)=0 \quad (4.16)$$

onde:

$Y = [Y_1, \dots, Y_i, \dots, Y_m]$ é o vetor das variáveis associadas às m unidades de geração e Y_i o vetor das variáveis da unidade i . Cada vetor Y_i corresponderá ao conjunto de variáveis de estado que foram algebrizadas e ao conjunto de variáveis algébricas que podem ser incluídas em Y_i por conveniência de estruturação. Para uma unidade geradora termoelétrica i , constituída por um gerador, um regulador de tensão, uma turbina, e um regulador de velocidade, considerando a utilização dos modelos adotados no capítulo 4, o vetor Y_i poderá ser :

$$Y_i = [\omega \ \delta \ E'q \ Id \ Iq \ Pgv \ Php \ Pip \ Plp] ;$$

$V = [V_1, \dots, V_i, \dots, V_n]$ é o vetor das tensões nas n barras do sistema. Para a barra i , expressando em componentes segundo o eixo real e imag, tem-se $V_i = [V_{re_i} \ V_{im_i}] ;$

$F = [F_1, \dots, F_i, \dots, F_m]$ é o vetor das funções das variáveis Y_i das m unidades geradoras. Cada F_i representa um vetor com funções das variáveis associadas a unidade i . Para o exemplo anterior, o vetor F_i será $F_i = [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_7 \ f_8 \ f_9]$, onde f_1 é a função associada à algebrização da equação diferencial da variável ω , f_2 é a função associada à equação algebrizada de δ , e assim sucessivamente;

$g = [g_1, \dots, g_i, \dots, g_n]$ é o vetor das injeções de corrente nas n barras do sistema .

A escolha do método de solução de um sistema de equações não-lineares é feita considerando-se sua estrutura e aspectos de modelagem dos componentes que determinam o condicionamento do sistema matricial. Em problemas de sistemas de potência o método mais utilizado para solução de sistemas de equações algébricas não-lineares é o método de Newton por mostrar-se o mais adequado à estrutura das matrizes de descrição da topologia do sistema elétrico.

A proposta do método de Newton é resolver iterativamente o sistema de equações algébricas não-lineares da forma:

$$H(n)=0 \tag{4.17}$$

Partindo-se de um valor inicial n^0 e linearizando-se (4.17) em torno deste valor, tem-se:

$$H(\mathbf{n}^1) = H(\mathbf{n}^0 + \Delta \mathbf{n}) = H(\mathbf{n}^0) + \left(\frac{\partial H}{\partial \mathbf{n}} \right)_{\mathbf{n}^0} \Delta \mathbf{n} = 0$$

e:

$$H(\mathbf{n}^0) = - \left(\frac{\partial H}{\partial \mathbf{n}} \right)_{\mathbf{n}^0} \Delta \mathbf{n}$$

Isolando-se $\Delta \mathbf{n}$ na equação acima tem-se:

$$\Delta \mathbf{n} = -(\mathbf{J}_{\mathbf{x}^0})^{-1} H(\mathbf{n}^0) \quad (4.18)$$

sendo :

$$\Delta \mathbf{n} = \mathbf{n}^1 - \mathbf{n}^0 \quad (4.19)$$

e

$$\mathbf{J}_{\mathbf{n}^0} = \left(\frac{d H}{d \mathbf{n}} \right)_{\mathbf{n}^0}$$

Resolvendo a equação (4.18) para $\Delta \mathbf{n}$ e substituindo este valor em (4.19), obtém-se o valor de \mathbf{n} na iteração 1. O processo será repetido até que a convergência seja obtida, quando $\Delta \mathbf{n}$ calculado for abaixo de uma tolerância fixada, o que, tendo sido feita uma boa estimativa do valor inicial, será alcançado em um pequeno número de iteração. De forma genérica para a iteração k , escreve-se:

$$\Delta \mathbf{n} = -(\mathbf{J}_{\mathbf{n}^k})^{-1} H(\mathbf{n}^k)$$

sendo:

$$\Delta \mathbf{n} = \mathbf{n}^{k+1} - \mathbf{n}^k \quad (4.20)$$

Uma opção ao Método de Newton é o Método de Newton Desonesto, que consiste na não atualização da matriz jacobiana \mathbf{J} a cada iteração. Assim, \mathbf{J} permanece com o valor calculado na primeira iteração durante todo o processo iterativo. Para a iteração $k+1$, tem-se:

$$\Delta \mathbf{n} = -(\mathbf{J}_{\mathbf{n}^0})^{-1} H(\mathbf{n}^k) \quad (4.21)$$

O uso do Método de Newton Desonesto representa economia do esforço computacional empregado na atualização da matriz jacobiana sem diminuir significativamente a velocidade de convergência [Epri, 84].

Com a aplicação do método de Newton às equações algebrizadas do sistema elétrico (4.15) e (4.16), pode-se escrever:

$$\begin{bmatrix} F \\ G \end{bmatrix}_{Y^k, V^k} = - \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix}_{Y^k, V^k} \begin{bmatrix} \Delta Y \\ \Delta V \end{bmatrix}_{Y^{k+1}, V^{k+1}} \quad (4.22)$$

ou:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_m \\ G \end{bmatrix}_{Y^k, V^k} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial Y_1} & 0 & \dots & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial V} \\ \dots & \frac{\partial F_2}{\partial Y_2} & \dots & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \frac{\partial F_m}{\partial Y_m} & \frac{\partial F_m}{\partial V} \\ \frac{\partial G}{\partial Y_1} & \frac{\partial G}{\partial Y_2} & \dots & \frac{\partial G}{\partial Y_m} & \frac{\partial G}{\partial V} \end{bmatrix}_{Y^k, V^k} \begin{bmatrix} \Delta Y_1 \\ \Delta Y_2 \\ \vdots \\ \Delta Y_m \\ \Delta V \end{bmatrix}_{Y^{k+1}, V^{k+1}} \quad (4.23)$$

A matriz jacobiana do sistema (4.23) pode ser decomposta nas submatrizes J_1 , J_2 , J_3 e J_4 conforme (4.22). Em (4.23) observa-se que as matrizes J_1 , J_2 e J_3 são formadas por blocos independentes de submatrizes, relacionados às unidades de geração. Estes blocos não apresentam interação durante o processo de solução, estando relacionados apenas por J_4 da mesma forma que, de acordo com a modelagem adotada, as unidades de geração estão relacionadas apenas pela rede. Desta forma, as matrizes J_1 , J_2 e J_3 e conseqüentemente a matriz jacobiana, apresentam alta esparsidade. A matriz J_4 , relacionada às injeções de corrente em cada barra do sistema, apresenta estrutura idêntica à matriz de admitância de barra (Y_{barra}), amplamente utilizada na modelagem da rede elétrica.

Em [EPRI, 77] foi proposto um método de solução do sistema (4.23) visando o aproveitamento da esparsidade e da estrutura blocada da matriz jacobiana. Este método mostrou-se eficiente a ponto de atualmente ser utilizado na maioria dos programas que utilizam o método simultâneo de solução [Stott, 79]. Basicamente, sua proposta é o desacoplamento da matriz jacobiana, tratando cada bloco componente de J_1 , J_2 e J_3 separadamente e conseqüentemente, cada unidade geradora individualmente.

Reescrevendo (4.23) com $\Delta V^{k+1} = V^{k+1} - V^k$, tem-se:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_m \\ G \end{bmatrix}_{Y^k, V^k} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial Y_1} & & \frac{\partial F_1}{\partial V} \\ & \frac{\partial F_2}{\partial Y_2} & \frac{\partial F_2}{\partial V} \\ & & \ddots \\ 0 & & \frac{\partial F_m}{\partial Y_m} \frac{\partial F_m}{\partial V} \\ \frac{\partial G}{\partial Y_1} & \frac{\partial G}{\partial Y_2} & \frac{\partial G}{\partial V} \end{bmatrix}_{Y^k, V^k} \begin{bmatrix} \Delta Y_1 \\ \Delta Y_2 \\ \vdots \\ \Delta Y_m \\ V \end{bmatrix}_{Y^{k+1}, V^{k+1}} +$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial Y_1} & & \frac{\partial F_1}{\partial V} \\ & \frac{\partial F_2}{\partial Y_2} & \frac{\partial F_2}{\partial V} \\ 0 & & \ddots \\ & & \frac{\partial F_m}{\partial Y_m} \frac{\partial F_m}{\partial V} \\ \frac{\partial G}{\partial Y_1} & \frac{\partial G}{\partial Y_2} & \frac{\partial G}{\partial V} \end{bmatrix}_{Y^k, V^k} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ V \end{bmatrix}_{Y^{k+1}, V^k} \quad (4.24)$$

A última linha de (4.24) pode ser escrita como :

$$G(\mathbf{Y}^k, \mathbf{V}^k) + \sum_{i=1}^m \left(\left(\frac{\partial G}{\partial \mathbf{Y}_i} \right)_{\mathbf{Y}^k, \mathbf{V}^k} \Delta \mathbf{Y}_i^{k+1} \right) + \frac{\partial G}{\partial \mathbf{V}} \mathbf{V}^{k+1} - \frac{\partial G}{\partial \mathbf{V}} \mathbf{V}^k = 0 \quad (4.25)$$

e das linhas superiores têm-se:

$$F_i(\mathbf{Y}^k, \mathbf{V}^k) + \frac{\partial F_i}{\partial \mathbf{Y}_i} \Delta \mathbf{Y}_i^{k+1} + \frac{\partial F_i}{\partial \mathbf{V}} \mathbf{V}^{k+1} - \frac{\partial F_i}{\partial \mathbf{V}} \mathbf{V}^k = 0$$

Isolando-se $\Delta \mathbf{Y}_i^{k+1}$:

$$\Delta \mathbf{Y}_i^{k+1} = \left(\frac{\partial F_i}{\partial \mathbf{Y}_i} \right)^{-1} \left[\frac{\partial F_i}{\partial \mathbf{V}} \mathbf{V}^k - F_i(\mathbf{Y}^k, \mathbf{V}^k) - \frac{\partial F_i}{\partial \mathbf{V}} \mathbf{V}^{k+1} \right] \quad (4.26)$$

Com a substituição de (4.26) em (4.25), obtém-se:

$$\begin{aligned} G(\mathbf{Y}^k, \mathbf{V}^k) + \sum_{i=1}^m \left[\left(\frac{\partial G}{\partial \mathbf{Y}_i} \right) \left(\frac{\partial F_i}{\partial \mathbf{Y}_i} \right)^{-1} \left(\frac{\partial F_i}{\partial \mathbf{V}} \right) \right]_{\mathbf{Y}^k, \mathbf{V}^k} \mathbf{V}^k + \\ - \sum_{i=1}^m \left[\left(\frac{\partial G}{\partial \mathbf{Y}_i} \right) \left(\frac{\partial F_i}{\partial \mathbf{Y}_i} \right)^{-1} F_i(\mathbf{Y}^k, \mathbf{V}^k) \right]_{\mathbf{Y}^k, \mathbf{V}^k} + \\ - \sum_{i=1}^m \left[\left(\frac{\partial G}{\partial \mathbf{Y}_i} \right) \left(\frac{\partial F_i}{\partial \mathbf{Y}_i} \right)^{-1} \left(\frac{\partial F_i}{\partial \mathbf{V}} \right) \right]_{\mathbf{Y}^k, \mathbf{V}^k} \mathbf{V}^{k+1} + \\ + \frac{\partial G}{\partial \mathbf{V}} \mathbf{V}^{k+1} - \frac{\partial G}{\partial \mathbf{V}} \mathbf{V}^k = 0 \end{aligned}$$

A equação acima pode ser escrita na forma compacta:

$$\mathbf{Y}^E \mathbf{V}^{k+1} = \mathbf{I}^E \quad (4.27)$$

onde:

$$YE = \frac{\partial G}{\partial V_{Y^k, V^k}} - \sum_{i=1}^m \left[\frac{\partial G}{\partial Y_i} \left(\frac{\partial F_i}{\partial Y_i} \right)^{-1} \frac{\partial F_i}{\partial V} \right]_{Y^k, V^k} \quad (4.28)$$

e

$$IE = -G(Y^k, V^k) + \sum_{i=1}^m \left[\frac{\partial G}{\partial Y_i} \left(\frac{\partial F_i}{\partial Y_i} \right)^{-1} F_i(Y^k, V^k) \right] + \frac{\partial G}{\partial V} V^k - \sum_{i=1}^m \left[\frac{\partial G}{\partial Y_i} \left(\frac{\partial F_i}{\partial Y_i} \right)^{-1} \frac{\partial F_i}{\partial V} \right]_{Y^k, V^k} V^k \quad (4.29)$$

A equação (4.27) será solucionada para V através da decomposição LU de YE. O valor de V^{k+1} calculado é substituído em (4.26), permitindo o cálculo de ΔY^{k+1} e conseqüentemente de Y^{k+1} . Com o valor Y^{k+1} recalcula-se os resíduos F^{k+1} , G^{k+1} , atualizam-se as matrizes J_1 , J_2 , J_3 e J_4 , e dá-se início a mais uma iteração, recalculando V^{k+1} . O processo iterativo é mantido até que a convergência seja obtida.

O critério de convergência adotado é baseado na norma infinita do vetor ΔV :

$$\max (\Delta V_i^{k+1})_{i=1, 2, \dots, n} \leq \varepsilon \quad (4.30)$$

sendo n o número de barras do sistema e ε uma constante previamente especificada, de acordo com a precisão desejada.

Já foi observado que $J_4 (\partial G / \partial V)$, por representar a rede elétrica através de suas injeções de corrente, possui a mesma estrutura da matriz de admitância de barra Y_{barra} . Esta estrutura é preservada em YE pois a matriz formada pelos somatórios dos termos relacionados às unidades de geração possui estrutura bloco diagonal, não alterando a estrutura de J_4 ao ser somada a esta. Desta forma, o método

de Newton, já plenamente testado na solução de problemas com Ybarra, pode ser empregado na solução de (4.27).

Deve-se observar também a considerável diminuição da dimensão da matriz jacobiana YE de (4.27) em relação à dimensão da matriz J em (4.22). A matriz YE possui dimensão $(2 \times nb) \times (2 \times nb)$ e J possui dimensão $(2 \times nb + nvet) \times (2 \times nb + nvet)$, sendo nvet o número de variáveis Y total do sistema, dado por:

$$nvet = \sum_{i=1}^m nvei$$

onde nvei é o número de variáveis associados a unidade geradora i e m o número de unidades de geração.

O número de operações efetuadas para obtenção de YE (4.28) é em parte compensada pela economia de esforço computacional obtida com a diminuição de dimensão da matriz jacobiana.

4.3 - ESTRUTURA DAS MATRIZES ENVOLVIDAS NO PROCESSO DE SOLUÇÃO

Na seção anterior foi descrito o método de desacoplamento da equação (4.23) e mostradas as equações resultantes (4.26), (4.27), (4.28) e (4.29). A seguir descreve-se a estrutura das matrizes que compoem estas equações. Observa-se que a maior parte destas operações são executadas independentemente para cada unidade geradora, podendo ser "encapsuladas" na classe "unidade_de_geração" (detalhes da estrutura computacional são apresentados no capítulo 5). Observa-se também que o encapsulamento de informações e a hierarquização da solução, proporcionada pelo método de decomposição do sistema de equações, adapta-se à metodologia de programação adotada neste trabalho.

4.3.1 - ESTRUTURA DE F_i

Sendo $Y_i = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_j \ \dots \ y_{nvei}]$ o vetor com $nvei$ variáveis da unidade geradora i , haverá um vetor $F_i = [f_1(Y_i) \ f_2(Y_i) \ \dots \ f_{nvei}(Y_i)]$ constituído pelas $nvei$ funções associadas a cada variável y_j . A dimensão de F_i será $(nvei) \times (1)$, sendo $nvei$ calculado pelo somatório das variáveis de cada elemento da unidade (gerador, reguladores, turbina...). Deve ser observado que a função f_j associada a variável y_j é calculada com todo vetor de variáveis da unidade Y_i .

4.3.2 - ESTRUTURA DE $\partial F_i / \partial Y_i$

Cada função F_i deve ser derivada com relação à todas as variáveis de estado da unidade i , formando a matriz $\partial F_i / \partial Y_i$. A dimensão desta matriz será $(nvei) \times (nvei)$, com $nvei$ definido na seção anterior. A estrutura de $\partial F_i / \partial Y_i$ é mostrada na figura abaixo (Fig. 4.1), onde, para facilidade de visualização é considerada uma unidade geradora com três elementos, tendo o primeiro duas variáveis (y_1 e y_2) e conseqüentemente, duas funções (f_1 e f_2) e os demais elementos uma variável e uma função cada (y_3, y_4, f_3, f_4).

elem1 elem2 elem3

$$\begin{matrix}
 & \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \frac{\partial f_1}{\partial y_2} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_3} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_4} \end{bmatrix} \\
 \text{elem1} & \begin{bmatrix} \frac{\partial f_2}{\partial y_1} & \frac{\partial f_2}{\partial y_2} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial f_2}{\partial y_3} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial f_2}{\partial y_4} \end{bmatrix} \\
 \text{elem2} & \begin{bmatrix} \frac{\partial f_3}{\partial y_1} & \frac{\partial f_3}{\partial y_2} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial f_3}{\partial y_3} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial f_3}{\partial y_4} \end{bmatrix} \\
 \text{elem3} & \begin{bmatrix} \frac{\partial f_4}{\partial y_1} & \frac{\partial f_4}{\partial y_2} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial f_4}{\partial y_3} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{\partial f_4}{\partial y_4} \end{bmatrix}
 \end{matrix}$$

Fig. 4.1 - Estrutura da submatriz $\partial F_i / \partial Y_i$

A matriz $\partial F_i / \partial Y_i$ ilustrada acima foi subdividida em blocos relacionados às derivadas de cada elemento j com relação às suas próprias variáveis ($jacp_j$) e com relação às variáveis dos demais elementos ($jaux_{jk}$). Esta subdivisão é ilustrada a seguir (Fig. 4.2).

$$\begin{bmatrix}
 \begin{bmatrix} jacp_1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} jaux_{12} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} jaux_{13} \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} jaux_{j1} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} jacp_j \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} jaux_{j3} \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} jaux_{31} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} jaux_{32} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} jacp_3 \end{bmatrix}
 \end{bmatrix}$$

Fig. 4.2 - Blocos associados a estrutura da submatriz $\partial F_i / \partial Y_i$

A estrutura em blocos das matrizes descritas aqui foi utilizada no projeto do programa de simulação, sendo o mecanismo utilizado em suas formações descrito no capítulo 5.

4.3.3- ESTRUTURA DE $\partial F_i/\partial V$

A matriz $\partial F_i/\partial V$ é formada pela derivação das funções f da unidade geradora i com relação às tensões em todas as barras do sistema, sendo sua dimensão $(n_{vei}) \times (2 \times n_b)$. Os componentes não nulos desta matriz formam $\partial F_i/\partial V_i$, cuja dimensão é $(n_{vei}) \times (2)$. Considerando o exemplo acima, para uma unidade geradora com três elementos, a estrutura de $\partial F_i/\partial V$ será:

$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial f_1}{\partial V_{re}} & \frac{\partial f_1}{\partial V_{im}} & 0 \\ & \frac{\partial f_2}{\partial V_{re}} & \frac{\partial f_2}{\partial V_{im}} & \\ \cdot & \frac{\partial f_3}{\partial V_{re}} & \frac{\partial f_3}{\partial V_{im}} & \cdot \\ & \frac{\partial f_4}{\partial V_{re}} & \frac{\partial f_4}{\partial V_{im}} & \\ \cdot & \frac{\partial f_5}{\partial V_{re}} & \frac{\partial f_5}{\partial V_{im}} & \cdot \end{bmatrix}$$

ou:

$$[0 \quad \partial F_i/\partial V_i \quad 0]$$

Fig.4.3 - Estrutura da submatriz $\partial F_i/\partial V$

4.3.4- ESTRUTURA DE G

O vetor G é formado pela injeções de corrente dos elementos conectados a todas as barras do sistema, sendo sua dimensão $(2 \times n_b) \times (1)$. Sua estrutura é mostrada abaixo (Fig. 4.4).

$$\begin{bmatrix} G_{1 \text{ re}} \\ G_{1 \text{ im}} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ G_{nb \text{ re}} \\ G_{nb \text{ im}} \end{bmatrix}$$

Fig. 4.4 - Estrutura do vetor de injeções G

4.3.5- ESTRUTURA DE $\partial G/\partial Y_i$

A derivação das injeções de corrente G com relação às variáveis de estado da barra i formam a matriz $\partial G/\partial Y_i$, cujos elementos não nulos são aqueles relacionados à derivada das injeções da barra i, isto é, a submatriz $\partial G_i/\partial Y_i$. A dimensão de $\partial G/\partial Y_i$ é $(2nb) \times (ntves)$, sendo ntves o número total de variáveis de estado do sistema. Sua estrutura é ilustrada abaixo (Fig. 4.5).

$$\begin{bmatrix} 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \frac{\partial G_{rei}}{\partial F_i} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \frac{\partial G_{imi}}{\partial F_i} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

Fig. 4.5 Estrutura de $\partial G/\partial Y_i$

e:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial G_{rei}}{\partial f_1} & \frac{\partial G_{rei}}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial G_{rei}}{\partial f_{nvei}} \\ \frac{\partial G_{imi}}{\partial f_1} & \frac{\partial G_{imi}}{\partial f_2} & \dots & \frac{\partial G_{imi}}{\partial f_{nvei}} \end{bmatrix}$$

Fig 4.6 - Estrutura de $\partial G_i/\partial Y_i$

4.3.6 - ESTRUTURA DE $\partial G/\partial V$

Conforme mencionado anteriormente, a matriz $\partial G/\partial V$ contém informações da topologia do sistema, sendo sua estrutura igual a da matriz Ybarra, tradicionalmente utilizada em estudos de sistemas de potência para representar a rede elétrica. Sua dimensão é $(2 \times nb) \times (2 \times nb)$.

CONCLUSÃO:

Neste capítulo foram descritos os métodos numéricos de solução das equações do sistema elétrico utilizados para a simulação em dinâmica lenta do SEP, tendo sido expostos os critérios considerados na seleção dos mesmos.

Os métodos expostos neste capítulo constituem um conjunto consistente, cuja utilização constatada na literatura em diversos simuladores incentiva sua implementação e experimentação. Foi observado que para aumentar sua eficiência, a estrutura computacional deve adequar-se aos métodos utilizados, de forma a explorar da melhor maneira possível os mecanismos de solução e a estrutura dos sistemas formados. Para que sejam satisfeitos os requisitos do simulador do modelo do sistema de potência, verifica-se um profundo relacionamento entre os métodos numéricos de solução, a modelagem dos componentes do sistema elétrico e a estrutura computacional empregada. Assim, devem ainda ser feitos testes mais amplos,

envolvendo outras combinações de métodos, para que se possa chegar a uma conclusão definitiva sobre o assunto.

Para satisfazer os requisitos do SET, a estrutura computacional deve ainda ser suficientemente flexível para que a implementação de novos conjuntos de métodos possa ser feita com facilidade. Estes objetivos foram considerados no desenvolvimento da estrutura apresentada no capítulo 5.

CAPÍTULO V

ESTRUTURA COMPUTACIONAL

INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a estrutura computacional desenvolvida em programação orientada para objeto (POO) para representar o sistema elétrico de potência e simular seu comportamento em dinâmica lenta.

Na primeira parte deste capítulo, é feita a descrição dos principais termos empregados e da metodologia básica de POO. Maiores informações podem ser obtidas nas referências específicas deste tipo de programação ([Wiener, 91] e [Ellis, 93], entre outros).

Na segunda parte do capítulo descreve-se como os mecanismos de POO são utilizados para modelar o SEP. Apresenta-se, então, a estrutura computacional proposta, evidencia-se sua semelhança com a estrutura do sistema de potência real e ressalta-se a flexibilidade de programação obtida com o uso de POO.

Por fim, na terceira parte do capítulo são descritos sucintamente os mecanismos de formação das principais matrizes envolvidas na simulação.

5.1 - TERMINOLOGIA

A utilização de POO em problemas de engenharia, embora crescente, é bastante recente. Experiências anteriores, com o desenvolvimento de programas de fluxo de potência, foram descritas em [Neyer, 90] e [Hakavik, 93], não tendo sido encontrado referências à trabalhos de simulação dinâmica. Portanto, uma breve descrição dos termos empregados neste tipo de programação foi considerada conveniente. A terminologia adotada em POO pode variar com a linguagem de programação considerada; salienta-se portanto, que estaremos sempre nos referindo à nomenclatura adotada em C++.

Utilizou-se C++ para implementação porque esta linguagem apresenta tanto os conceitos de orientação para objetos quanto a eficiência, a portabilidade e as facilidades proporcionadas pela utilização de bibliotecas de funções de C.

De acordo com [Wiener, 91] os cinco componentes-chaves de POO são: objeto, mensagem, classe, instância e método. Tais elementos, e conseqüentemente suas definições, encontram-se profundamente relacionados e uma abordagem rigorosa exigiria uma notação bastante complexa. Para evitá-la, optou-se por um tratamento menos formal, apoiado por um exemplo ilustrativo.

A princípio, pode-se entender **objeto** como sendo a representação computacional de um elemento real, tanto físico (um gerador) quanto abstrato (uma matriz). O que determina sua estrutura, caracterizando um tipo específico de objeto é denominado **classe**. A declaração de um objeto do tipo estabelecido pela classe constitui uma **instância**. Os protocolos declarados na classe recebem o nome de **mensagem** e representam uma ação a ser praticada pelo objeto. Para cada mensagem declarada na classe haverá um **método** correspondente. O método define a resposta do objeto ao envio da mensagem, isto é, o método é a própria implementação da mensagem.

Englobando os conceitos apresentados podemos dizer que:

"Um objeto é uma instância de uma classe que responde a mensagens de acordo com métodos determinados pelo protocolo de descrição da classe" [Wiener, 91].

O pequeno código apresentado a seguir ilustra a aplicação destes conceitos.

```
class gerador_m1 : public gerador{           // nome da classe
public:
    gerador_m1 ( int );                     // construtor - mensagem para
                                           construir1 o objeto gerador_m1
    void le_dados ( fstream & );           // mensagem para leitura de dados
    int nve ( void ) { return nve; }       // mensagem para indicar o nº de
                                           variaveis de estado do gerador_m1
    char* codigo ( void ) {return "gerador_m1"; }

private:                                    // declaração dos membros da classe
    int nve;
    int barrain;
    float rg, xld, H, D;
};

// métodos correspondentes às mensagens declaradas na classe gerador_m1:
gerador_m1 :: gerador_m1( int a){
    barrain = a;
    nve = 2;
}
```

¹Conceitos que este trabalho não define podem ser encontrados no manual de referência de c++ [ELLIS, 93]. Este manual oferece uma definição completa da linguagem, tendo sido adotado pelo ANSI como ponto de partida para a padronização formal de C++.

```

void gerador_m1 :: le_dados( fstream &arquivo){
    arquivo >> rg >> xld >> H >> D;
}
//Programa principal : demonstração do uso da classe parcialmente definida acima
main (){
    gerador_m1 Gerador( 2 );    // criação de um objeto Gerador, instância
                                // da classe gerador_m1
    Gerador.le_dados( arqgeral); // envio da mensagem de leitura de dados
                                // ao objeto criado
}

```

O objetivo básico ao se projetar uma estrutura computacional em POO é fazê-la o mais semelhante possível à estrutura do sistema real a ser simulado. Para a realização deste objetivo a linguagem C++ oferece uma série de ferramentas, tais como criação de classes abstratas e hierarquicamente relacionadas, utilização de funções virtuais e polimorfismo, e encapsulamento de dados e métodos. A utilização destas ferramentas será exemplificada na seção seguinte, simultaneamente à descrição da estrutura computacional sugerida para o SEP.

5.2 - MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA EM POO

Esta seção descreve a estrutura do modelo do sistema elétrico de potência obtida com o uso de POO.

De acordo com a definição de sistema apresentada em [Cegrel, 86] e citada na seção 2.1 deste trabalho, o SEP pode ser visto como uma coleção de entidades que agem e interagem. Em POO, cada entidade de um sistema real é representada por um objeto definido por uma classe, suas ações são implementadas

como mensagens desta classe e as interações são mensagens de uma classe enviadas a objetos de outras.

A primeira classe criada para a representação do sistema elétrico é a classe abstrata "componentes". Por ser abstrata, "componentes" não contém informações específicas de nenhum componente real do SEP mas atua como base para todas as demais classes da estrutura. A criação de classes abstratas facilita a visualização da hierarquia da estrutura e mais do que isto, permite a declaração de funções virtuais e conseqüentemente, permite o uso do polimorfismo. Genericamente, polimorfismo é a capacidade de um elemento se apresentar sob diversas formas; e virtual é aquilo que existe como faculdade, aquilo que é suscetível de se realizar, que esta predeterminado e contém todas as condições essenciais a sua realização [Ferreira, 86]. Em POO, polimorfismo é a propriedade de chamar-se uma série de funções usando exatamente a mesma interface [ELLIS, 93]. O mecanismo que possibilita o uso do polimorfismo é a criação de funções virtuais. Funções virtuais em C++ são funções declaradas como tal em uma classe base e redefinidas de diversas formas em classes derivadas. Caso a função não seja redefinida em alguma classe derivada, a função da classe base é acessada automaticamente. As vantagens obtidas com a utilização de funções virtuais e polimorfismo serão expostos posteriormente.

A partir da classe "componentes" realiza-se a derivação das demais classes da estrutura, buscando a correspondência uma a uma entre as entidades do sistema elétrico e as classes do programa.

Antes de ser estabelecida uma derivação de classes, é feita a pergunta "O (objeto da classe derivada) é um (objeto da classe base) ?"; se a resposta for positiva, pode-se realizar a derivação. A estes relacionamentos estabelecidos pela derivação, nos quais as classes derivadas herdam os dados e os métodos da classe base dá-se o nome " é um ".

É possível identificar-se dois tipos de componentes do sistema elétrico, com características e comportamentos bastante diferenciados, que são as barras e os

elementos a elas conectados. Cria-se então duas novas classes, ambas derivadas de "componentes", chamadas "barras" e "elementos"².

A classe "barras" contém, em sua parte privada, informações que descrevem o estado de cada instância. Isto é, de cada barra do sistema - basicamente, informações que a identifiquem (seu número, por exemplo), o valor da tensão e informações que indiquem a conexão de cada barra com os demais componentes do sistema.

A classe "elementos", criada para representar os componentes do sistema elétrico que são conectados às barras, assim como a classe "componentes", é abstrata e servirá de base para diversas outras classes. O diagrama abaixo (Fig. 5.1), ilustra a estrutura hierárquica das classes até agora mencionadas e exemplifica a derivação de "elementos".

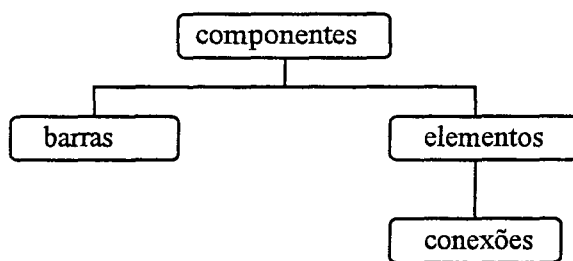


Fig.5.1 - Estrutura hierárquica parcial do SEP

Neste diagrama (Fig. 5.1) é mostrada a derivação de uma classe a partir de "elementos"- a classe "conexões". A classe "conexões" refere-se aos elementos do sistema que estão conectados entre duas barras. Exemplos de conexões são as linhas e os transformadores, representados por classes derivadas de "conexões" - "linhas" e "transformadores". De "elementos" são derivadas todas as demais classes que representam elementos ligados a apenas uma barra do sistema (unidades de geração, cargas, compensadores de reativo...).

Observando a unidade de geração do sistema elétrico real identificamos a existência de geradores, sistemas de controle, turbinas e caldeiras. Para representar

²A notação " " foi adotada para indicar nomes de classes.

tais componentes são criadas classes abstratas derivadas de "elementos", que por sua vez, serão bases para outras classes com modelos específicos.

O fragmento de código a seguir exemplifica esta derivação.

```
// Derivação de classe a partir de componentes
```

```
class elementos : public componentes{
public:
    virtual void leia_dados( fstream&){}
    virtual char* nome_do_componente( void);
};

class gerador : public elementos{
    char* nome_do_componente( void) { return "gerador" ;}
};

class regulador_de_tensao : public elementos{
    char* nome_do_componente( void) { return "regulador_de_tensao";}
};

// Derivação de classes para os modelos específicos de elementos:

class gerador_m1 : public gerador{
    void leia_dados( fstream&);
};

class gerador_m2 : public gerador{
    void leia_dados( fstream&);
};

class reg_tensao_m1 : public regulador_de_tensao{
    void leia_dados( fstream&);
};

// implementação dos métodos correspondentes as classes acima:
void gerador_m1 :: leia_dados( fstream& arquivo){
    arquivo >> r >> xld;
}
```

```

void gerador_m2 :: leia_dados( fstream& arquivo){
    arquivo >> r >> xld >> xlq >> xlld >> xllq;
}

void reg_tensao_m1 :: leia_dados( fstream& arquivo){
    arquivo >> ka >> ta;
}

```

O benefício mais evidente da utilização da derivação e capacidade de herança é a simplificação e a economia de código obtida. Um exemplo desta economia pode ser observado no código acima, na declaração da mensagem "nome_do_componente". Esta mensagem é definida em cada uma das classes derivadas de elementos mas não é redefinida nas classes com modelos específicos. Isto porque, em determinadas partes do programa será necessário que, por exemplo, o gerador, receba determinada mensagem, independente do tipo de gerador que tenha sido criado. Será então realizado um teste, solicitando o nome do componente e lhe enviando a mensagem, caso o nome corresponda ao elemento procurado, neste exemplo, gerador. Evita-se assim, a repetição de código nas classes derivadas, pois ao não ser encontrada a mensagem na classe derivada, a mensagem da classe base é acessada automaticamente.

A utilização de classes base abstratas permite a criação de funções virtuais, que uma vez tendo sido declaradas como tal na classe base podem ser redefinidas nos métodos das classes derivadas. Os métodos específicos são gerados nas classes derivadas e o nome da mensagem declarada virtual na classe abstrata é preservada. Preservando o nome da mensagem definida virtual na classe base, pode-se escrever parcelas de códigos genéricos, isto é, independentes do tipo específico de objeto que o código opera. A escolha do método a ser enviado a um determinado objeto será realizada no momento da execução do programa, de acordo com a classe derivada que tenha originado este objeto. A esta determinação da mensagem apenas no momento da execução chama-se "vínculo tardio". Como exemplo, consideremos o trecho de código apresentado anteriormente, onde uma função de leitura de dados é

declarada virtual em "elementos" e redeclarada nas classes derivadas de forma a corresponder as necessidades de leitura de cada componente. Ao implementar-se o método de leitura de dados da barra, a mensagem "leia_dados" é enviada aos elementos ligados à barra (unidade_de_geração, cargas, linhas...), que executarão seu próprio método de leitura de dados. Desta forma, o método de leitura de dados de "barras" é escrito de forma genérica para objetos "elementos", independentemente de quais sejam os elementos e quais seus modelos, e os métodos específicos de leitura ficam encapsulados nas classes derivadas de elementos.

Na figura abaixo (Fig. 5.2) é apresentada a estrutura hierárquica completa do modelo do sistema elétrico de potência.

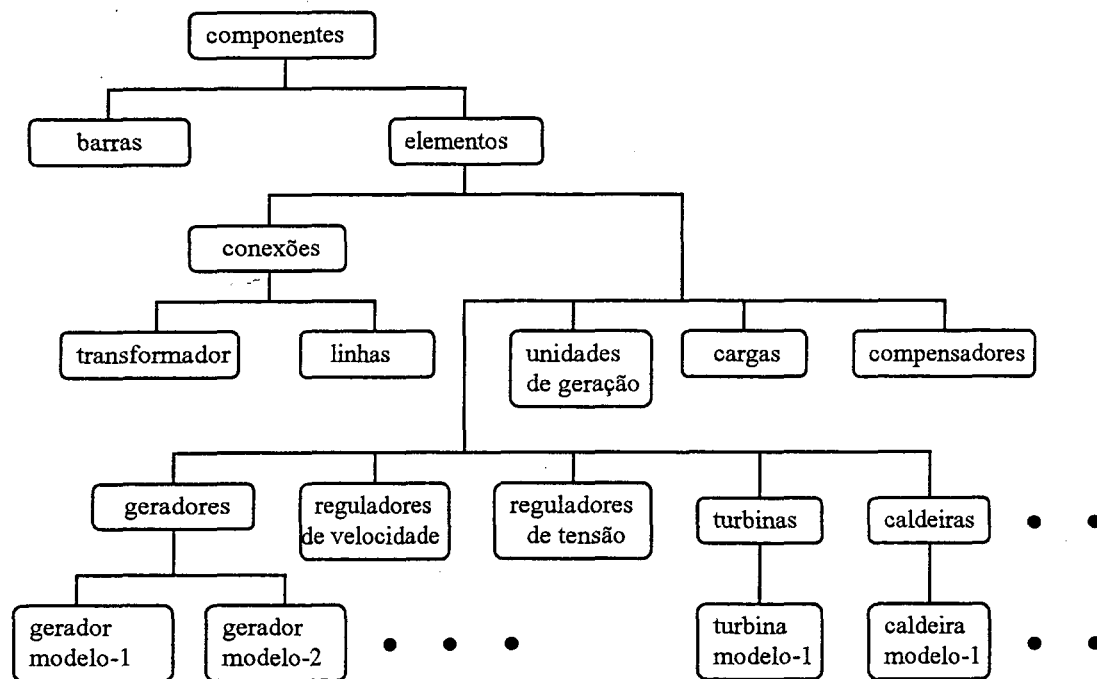


Fig. 5.2 Estrutura hierárquica das classes desenvolvidas para representar o SEP

Na Fig. 5.2 pode ser observado que toda a estrutura hierárquica desenvolvida respeita a especificação de similaridade ou parentesco do tipo "é um". Isto constitui um dos critérios para avaliar-se a estrutura computacional quanto a hierarquia e considerar que ela representa bem o SEP.

5.3 - ESTRUTURA DE PROCESSAMENTO

Uma vez definidas as classes que descreverão o sistema elétrico e estabelecido seu relacionamento hierárquico, é necessário analisar a estrutura que determina como estas classes são armazenadas e processadas na simulação do sistema.

A estrutura hierárquica apresentada na seção anterior foi desenvolvida utilizando o relacionamento **é um**. De fato, pode-se afirmar que, de acordo com a definição de "elementos", as unidades de geração, as cargas e os geradores **são** "elementos".

No entanto, entre as unidades de geração e os geradores, reguladores, turbinas e caldeiras, verifica-se outro tipo de relacionamento. Ao ser feita a pergunta "Cada (unidade de geração) **tem um** (gerador) ?" obtêm-se uma resposta afirmativa, portanto, o procedimento natural será a colocação do gerador como objeto integrante da classe unidade de geração e não como derivado desta. Este relacionamento de posse é chamado **tem um** e envolve uma especificação de pertinência.

A alocação estática de uma classe ou de um de objeto como pertencente a outro objeto é feita simplesmente declarando a classe ou o objeto possuído no protocolo da classe possuidora. No entanto, esta alocação estática não adapta-se ao caso citado acima, pois os elementos que fazem parte da unidade geradora só são conhecidos no momento da execução, após a leitura dos dados. É necessário, então, a utilização da alocação dinâmica de objetos.

A alocação dinâmica de diversos objetos em uma classe pode ser realizada através da definição de um vetor de ponteiros no protocolo da classe que possuirá outros objetos, no caso, a classe unidade geradora. Este vetor é declarado para alocar ponteiros de objetos de uma classe base, que pode ser abstrata ou não. Se o tipo de objeto criado no momento da execução do programa for derivado da classe base para o qual o vetor foi declarado, o ponteiro criado para este objeto poderá ser alocado no

vetor. Isto é possível porque os ponteiros declarados para objetos de uma classe base são compatíveis com os ponteiros para objetos de classes derivadas, isto é, podem ser igualados. Com este artifício, pode-se criar vários vetores de ponteiros e listas encadeadas ou concatenadas genéricas, cujo conteúdo específico é determinado no momento de execução do programa, de acordo com a topologia do sistema e os modelos dos componentes. Estes vetores e listas permitem que as classes possuidoras controlem o envio de mensagens e conseqüentemente, as ações dos objetos que as integram, estabelecendo a estrutura de processamento do programa. A configuração da estrutura de processamento poderá variar, de forma a adequar-se ao processo a ser executado. A seguir é descrita a estrutura de processamento proposta neste trabalho, que foi desenvolvida visando a simulação dinâmica do sistema.

A alocação dos componentes da unidade de geração é realizado através de um vetor de ponteiros para objetos "elementos" - *vetorp*, declarado no protocolo da classe "unidade de geração". Assim, ao realizarmos a criação dos objetos pertencentes a unidade geradora, ponteiros para os objetos criados são alocados em *vetorp*. Ao final do processo de leitura de dados, criação e alocação de objetos, cada unidade de geração conterá um vetor com ponteiros para os diversos elementos a ela conectados.

Procedimento semelhante é realizado com a declaração de um vetor de ponteiros para "elementos" - *listael*, no protocolo da classe *barras*. Após a criação de cada elemento conectado a uma determinada barra do sistema, um ponteiro para este elemento é igualado ao ponteiro genérico de *listael*. Desta forma, cada barra do sistema conterá um vetor com ponteiros para os elementos a ela conectados.

Para que possa ser exercida qualquer ação sobre a estrutura mostrada é necessário a construção de uma classe que permita a supervisão do modelo computacional, à semelhança do centro de controle real, onde é realizada a supervisão do sistema elétrico. A esta classe supervisora deu-se o nome "sistema". A classe "sistema" representa o nível mais alto de processamento da estrutura computacional.

Nesta classe é declarado um vetor de ponteiros para objetos "barras", através do qual têm-se acesso às informações de todas as barras do sistema e pode-se enviar sinais a todos os elementos que o compõem.

Para ilustrar a estrutura de processamento desenvolvida, a figura abaixo (Fig. 5.3) apresenta um exemplo de sistema elétrico sob a forma de diagrama unifilar e a estrutura de armazenamento correspondente. Junto a cada componente é representado o vetor declarado na classe correspondente, contendo ponteiros para os objetos que a classe possui. O caractere * simboliza ponteiro para objeto e as linhas orientadas indicam o objeto correspondente.

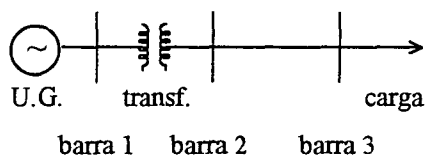


Fig.5.3 a - Diagrama unifilar de um exemplo de sistema elétrico

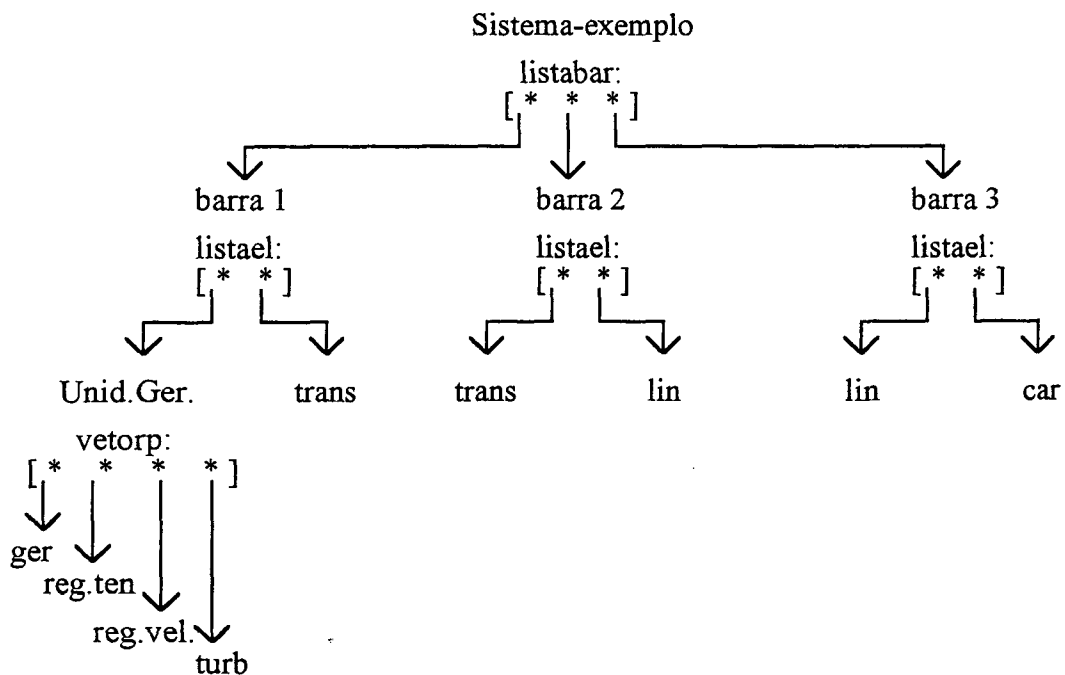


Fig 5.3 b - Estrutura de processamento associada à Fig. 5.3

Na figura anterior foram adotadas as abreviaturas seguintes:

Unid Ger = Unidade Geradora

trans = transformador

lin = linha

car = carga

ger = gerador

reg.ten = regulador de tensão

reg.vel = regulador de velocidade

turb = turbina

5.4 - MECANISMOS DE FORMAÇÃO DAS MATRIZES ENVOLVIDAS NO PROCESSO DE SOLUÇÃO

Conforme descrito no capítulo 4, a simulação dinâmica do sistema elétrico pode ser realizada através da solução de um sistema de equações algébricas não-lineares cuja forma, reescrita abaixo, é:

$$Y = F(Y, V) \quad (5.1)$$

Com o emprego da técnica de desacoplamento utilizada neste trabalho e exposta no capítulo 4, a solução destas equações assume a forma:

$$Y^E V^{k+1} = I^E \quad (5.2)$$

e

$$\Delta Y_i = \left(\frac{\partial F_i}{\partial Y_i} \right)^{-1} \left[\frac{\partial F_i}{\partial V} V^k - F_i(Y^k, V^k) - \frac{\partial F_i}{\partial V} V^{k+1} \right]$$

onde:

$$Y^E = \frac{\partial G}{\partial V_{Y^k, V^k}} - \sum_{i=1}^m \left[\frac{\partial G}{\partial Y_i} \left(\frac{\partial F_i}{\partial Y_i} \right)^{-1} \frac{\partial F_i}{\partial V} \right]_{Y^k, V^k}$$

e

$$\mathbf{IE} = -G(\mathbf{Y}^k, \mathbf{V}^k) + \sum_{i=1}^m \left[\frac{\partial G}{\partial Y_i} \left(\frac{\partial F_i}{\partial Y_i} \right)^{-1} F_i(\mathbf{Y}^k, \mathbf{V}^k) \right]_{\mathbf{Y}^k, \mathbf{V}^k} +$$

$$+ \frac{\partial G}{\partial V} \mathbf{V}^k - \sum_{i=1}^m \left[\frac{\partial G}{\partial Y_i} \left(\frac{\partial F_i}{\partial Y_i} \right)^{-1} \frac{\partial F_i}{\partial V} \right]_{\mathbf{Y}^k, \mathbf{V}^k} \mathbf{V}^k$$

Nas subseções seguintes são descritos os processos de formação das matrizes que compõem estas equações. O capítulo 4, contendo a estrutura das matrizes mencionadas aqui, pode ser utilizado como apoio na leitura desta seção.

5.4.1 - FORMAÇÃO DA MATRIZ $\partial F_i / \partial Y_i$

Cada variável de estado de um elemento origina uma função f que, para a formação de $\partial F_i / \partial Y_i$, será derivada em relação a todas variáveis Y_i da unidade i , do próprio e dos demais elementos. A estrutura de $\partial F_i / \partial Y_i$, mostrada na Fig 4.2, é reescrita abaixo, onde as submatrizes são redefinidas com nomes relacionados à sua formação computacional.

$$\begin{array}{l} \text{elem1} \\ \text{elemj} \\ \text{elem3} \end{array} \left[\begin{array}{ccc} \left[\begin{array}{c} \text{jacp1} \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} \text{jaux2} \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} \text{jaux3} \end{array} \right] \\ \left[\begin{array}{c} \text{jaux1} \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} \text{jacpj} \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} \text{jaux3} \end{array} \right] \\ \left[\begin{array}{c} \text{jaux1} \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} \text{jaux2} \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} \text{jacp3} \end{array} \right] \end{array} \right]$$

Fig 5.4 - Estrutura da matriz $\partial F_i / \partial Y_i$

A decomposição de $\partial F_i / \partial Y_i$ em submatrizes de derivadas das funções de um elemento com relação às variáveis deste elemento e dos demais, proporciona modularidade à formação da matriz. Os blocos formados pelas derivadas das funções de cada elemento (j) com relação às variáveis de estado do próprio elemento, identificados na Fig.5.4 por $jacp_j$, por serem específicos, são formados em métodos do próprio elemento j e enviados ao método da unidade geradora. As submatrizes $jaux_1$, $jaux_2$ e $jaux_3$, relacionadas às derivadas das funções de um elemento com relação às variáveis de estado dos demais (1, 2 e 3, respectivamente), são formadas em métodos do elemento j e enviadas à unidade de geração, de acordo com a existência ou não dos elementos 1, 2 e 3. Este controle é exercido no método de formação de $\partial F_i / \partial Y_i$ através do vetor $vetorp$, que contém ponteiros para todos os elementos da unidade geradora. A definição de $jacp_j$, $jaux_1$, $jaux_2$ e $jaux_3$, como funções virtuais, redefinidas em todos os elementos com métodos específicos, encarregam-se de enviar as submatrizes de acordo com as indicações dos ponteiros de $vetorp$. Os ponteiros para os elementos armazenados em $vetorp$ passam como parâmetros para as funções virtuais definidas nos elementos, permitindo que um objeto da unidade geradora tenha acesso à informações de outro objeto da mesma unidade. O polimorfismo proporcionado pelo uso destas funções virtuais evita que parcelas de código tenham de ser reescritas para as diversas combinações de elementos que podem ser encontradas em uma unidade geradora e permite que o código de montagem da matriz seja escrito genericamente em função de $jacp_j$, $jaux_1$, $jaux_2$, ..., $jaux_{ne}$.

5.4.2 - FORMAÇÃO DO VETOR DE RESÍDUOS F_I

O vetor de resíduos F_i é formado independentemente para cada unidade geradora i, tendo dimensão $(nveug) \times (1)$ (4.3.1). Por conter informações específicas, este vetor pode ser definido como um membro da classe `unidade_geradora` e sua montagem implementada como um método desta classe.

As funções F de cada elemento da unidade geradora possuem além das variáveis próprias, variáveis de outros elementos. Visto ser a configuração da unidade determinada apenas durante a execução do programa, após a leitura dos dados e criação dos objetos, a montagem deste vetor foi decomposta em subvetores relacionados aos resíduos de cada elemento e dos demais, de forma similar a empregada na montagem de $\partial F_i / \partial Y_i$. Com a declaração de resp, re_1, re_2, re_n virtuais definidas para os n elementos que podem integrar a unidade, consegue-se organizar a formação do vetor de resíduos de forma modular. Abaixo ilustra-se o mecanismo de decomposição adotado.

$$\begin{bmatrix} Felem1 \\ Felemj \\ Felem3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} res1 \\ re1 \\ re1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} re2 \\ resj \\ re2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} re3 \\ re3 \\ resj \end{bmatrix} + \dots$$

Fig.5.5 - Estrutura de formação de F_i

5.4.3 - FORMAÇÃO DA MATRIZ $\partial F_i / \partial V$

Visando reduzir o esforço computacional, forma-se apenas a parcela não nula de $\partial F_i / \partial V$, isto é, aquela relacionada às derivadas das F_i em relação às tensões na barra i ($\partial F_i / \partial V_i$). Esta matriz reduzida pode ser definida como membro da classe unidade geradora, sendo formada independentemente para cada unidade de geração do sistema. Cada elemento da unidade enviará uma submatriz com as derivadas de suas funções F em relação a vre e vim , formando a matriz completa.

5.4.4 - FORMAÇÃO DA MATRIZ $\partial G/\partial Y_i$

Considerando-se que os únicos elementos não nulos de $\partial G/\partial Y_i$ são aqueles relacionados à derivada das injeções de corrente na barra i com relação às variáveis de estado da unidade i optou-se pela formação de uma matriz com dimensão reduzida $\partial G_i/\partial Y_i$, integrante da classe unidade_geradora. Os elementos integrantes da unidade geradora i , indicados em `vetorp`, enviam ao método de formação de $\partial G_i/\partial Y_i$ submatrizes contendo as derivadas de suas expressões de injeção de corrente em relação às variáveis de estado da unidade geradora.

5.4.5 - FORMAÇÃO DA MATRIZ $\partial G/\partial V$

Por conter informações de todo sistema, esta matriz deve ser declarada membro da classe sistema, sendo sua formação feita em um método desta classe. Neste método buscam-se informações sobre os elementos conectados a cada barra através dos ponteiros armazenados no vetor `listabar`. Através de cada ponteiro de `listabar` percorre-se `listael` obtendo-se as submatrizes das derivadas de injeção de corrente de cada elemento conectado a barra em relação a tensão nesta barra e em relação às tensões nas barras interligadas.

5.4.6 - FORMAÇÃO DO VETOR DE INJEÇÕES G

O vetor de injeções de corrente nas barras é constituído a partir de informações de todo o sistema, devendo portanto ser formado em um método da classe sistema e declarado membro desta classe. De forma similar a formação da matriz $\partial G/\partial V$, através do vetor de ponteiros `listabar`, percorrem-se todas as barras e através dos vetores `listael` obtém-se a contribuição de injeção dos elementos conectados a cada barra.

5.4.7 - FORMAÇÃO DE YE E IE

As matrizes YE e IE definidas pela expressão 5.2 são formadas através de operações com as matrizes cuja formação foi descrita nos itens anteriores. Os termos

$$\left[\frac{\partial G}{\partial Y_i} \left(\frac{\partial F_i}{\partial Y_i} \right)^{-1} \frac{\partial F_i}{\partial V} \right]$$

e

$$\left[\frac{\partial G}{\partial Y_i} \left(\frac{\partial F_i}{\partial Y_i} \right)^{-1} F_i (Y^k, V^k) \right]$$

referem-se unicamente à unidade geradora i , podendo ser encapsulados nesta classe, sendo o resultado enviado ao método da classe sistema, responsável pela formação de YE e IE.

5.5 - EXEMPLO DE REUTILIZAÇÃO DO PROGRAMA

Para demonstrar a facilidade de reutilização, será analisado um aspecto da implementação de um programa de fluxo de potência utilizando a estrutura desenvolvida para simulação dinâmica. O fluxo de potência pode ser utilizado no próprio ambiente do SET, gerando a inicialização da simulação.

Em estudos de simulação dinâmica não é necessário que as barras do sistema elétrico sejam classificadas, portanto foi criada apenas a classe "barras", sem classes derivadas. No entanto, em estudos de fluxo de potência, devemos classificar as barras em PV, PQ e barra de referência, de acordo com suas características. Em POO esta classificação é implementada através da definição de três classes derivadas de "barras"- "barra_PV", "barra_PQ" e "barra_de_referencia". A criação destas classes

derivadas não interfere na definição da classe "barras", nem em seus métodos já desenvolvidos para simulação dinâmica. O código para o fluxo de potência, assim como o código para simulação dinâmica, será escrito genericamente para os objetos "barras" e, no momento de sua execução, serão acessados os métodos específicos de cada tipo de barra.

Se este código de fluxo de potência for utilizado para a obtenção do estado em regime permanente do sistema elétrico, necessário à simulação dinâmica, as diversas barras que compõem o sistema serão criadas de acordo com a classificação PV, PQ e Referência. Ao ser executada a simulação dinâmica, embora os objetos "barras" tenham sido criados pelas classes derivadas, serão acessados automaticamente os métodos de simulação já desenvolvidos para a classe base "barras". Assim, a reutilização e o desenvolvimento do software não implicam necessariamente em alterações no código já desenvolvido.

CONCLUSÃO

Neste capítulo foi apresentada a estrutura computacional desenvolvida para modelar o sistema elétrico de potência e realizar a simulação em dinâmica lenta.

A princípio foram apresentados os termos mais empregados em POO. Na segunda parte do capítulo foram descritos os mecanismos básicos deste tipo de programação e apresentado o desenvolvimento da estrutura hierárquica para o modelo do sistema de potência (MSP) e da estrutura de processamento da simulação. Na terceira parte do capítulo foram descritos os métodos de formação das matrizes envolvidas na simulação do sistema, nos quais foram empregados as propriedades de virtualismo, polimorfismo e vínculo tardio. Pode-se observar como o emprego destas propriedades da linguagem contribuem na elaboração de um software modular e flexível. Por fim, foi mostrado um exemplo de desenvolvimento do MSP, com a inclusão de outra função de aplicação.

Com a utilização de POO desenvolveu-se um novo conceito de SET, no qual o MSP é constituído por objetos que representam cada componente do sistema real, organizados em uma estrutura hierárquica semelhante à estrutura do sistema elétrico. Ao contrário da programação estruturada, onde os componentes são campos de dados estáticos, os objetos-componentes criados com a POO são dinâmicos, isto é, possuem encapsulados em si às ações que devem praticar. Em linguagem de POO diz-se que estas ações são controladas através do envio de mensagens de um nível de processamento superior a objetos situados em níveis de processamento inferiores. Isto torna possível estabelecer uma estrutura de processamento que determina o fluxo de mensagens no programa. No nível mais elevado da estrutura foi criada uma classe cujas funções simulam o centro de controle do sistema real - a classe "sistema". Através desta classe é possível monitorar e atuar sobre todo o modelo do sistema. A criação de uma instância desta classe equivale à criação de um modelo de sistema elétrico particular e as mensagens enviadas a esta instância equivalem a sinais do centro de controle. Exemplos de mensagens que podem ser enviadas à instância de "sistema" são: - execute fluxo de potência e - realize simulação em dinâmica lenta. Assim, as funções de aplicação do centro de controle passam a ser entendidas como mensagens a serem enviadas ao MSP, sendo implementadas em sua própria estrutura. À medida que novas funções de aplicação são introduzidas no SET, cresce o número de métodos de cada componente e alterações na estrutura hierárquica e de processamento deverão ser necessárias, sem necessidade, no entanto, de alterar-se a implementação das funções já desenvolvidas. Quanto mais próxima desta situação ideal, mais flexível estará a estrutura.

A flexibilidade é em parte obtida com a utilização de ferramentas fornecidas pela POO. No entanto, além das ferramentas intrínsecas à linguagem e ao tipo de programação, é necessário que as estruturas hierárquicas e de processamento tenham sido elaboradas cuidadosamente. O projeto da estrutura computacional do MSP para uso no SET requer a consideração de um grande número de especificações e conhecimento dos vários processos solicitados, o que dificulta sua realização e

mesmo sua avaliação. Somente com a realização de testes mais amplos, que analisem a facilidade de implementação de novos modelos, novos métodos numéricos e outras funções de aplicação nesta estrutura, será possível uma avaliação mais completa da estrutura sugerida neste trabalho, possibilitando alterações que melhorem seu desempenho.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS

Neste trabalho de dissertação foram projetadas e implementadas várias classes de objetos, destinadas a representar os diversos componentes do sistema elétrico. Os métodos desenvolvidos em cada uma destas classes e na classe supervisora "sistema" foram elaborados visando a construção do modelo do sistema de potência e sua simulação dinâmica. A seguir, neste capítulo, são expostos alguns resultados de simulações realizadas com o emprego deste modelo do sistema elétrico desenvolvido.

Para a realização dos testes foram empregados dois sistemas-teste cujos dados estão disponíveis no apêndice A. Nestes sistemas foram adotados os modelos descritos no capítulo 3, tendo sido representado o comportamento dinâmico dos geradores, reguladores, compensadores e das turbinas térmicas e hidráulicas. O modelo proposto para a representação da dinâmica de geração de vapor não foi utilizado nestas simulações, tendo apresentado problemas e devendo ser mais detalhadamente estudado.

Com a utilização de classes desenvolvidas especificamente para aplicação de faltas (classe "faltas" e suas derivadas), os sistemas-teste foram submetidos a perturbações descritas posteriormente. Nestas simulações foi utilizado um passo de integração em torno de 0,1s. Este valor de passo de integração, bastante superior aos utilizados em simulações transitórias, ainda está distante do valor considerado ideal para simulações de dinâmica lenta (1s). No entanto, através de testes, verificou-se que a utilização de passos de integração maiores, mesmo com a utilização dos modelos propostos na bibliografia, prejudica e mesmo impede a convergência do processo de

solução. Esta dificuldade no aumento do passo de integração pode ser justificada pela ausência de técnicas de aceleração de convergência.

Embora o programa tenha sido desenvolvido considerando sua futura utilização como simulador em tempo real, não foram realizados testes de verificação da velocidade de processamento.

Os resultados das simulações mostrados a seguir tem carácter ilustrativo, visando apenas a demonstração da possibilidade de utilização do programa em simulações dinâmicas.

6.1 RESULTADOS PARA O SISTEMA COM 5 MÁQUINAS

A seguir são mostrados os resultados de simulações realizadas com o sistema-teste com cinco máquinas, cujo diagrama unifilar e dados podem ser encontrados no apêndice A.

As unidades geradoras das barras 2, 3, 4 e 7 foram consideradas hidráulicas e a unidade da barra 1, a fim de demonstrar a utilização de modelos de componentes relacionados à unidades geradoras termoelétricas, foi considerada térmica. Para os diversos componentes das unidades de geração foram adotados os modelos descritos no capítulo 3. Todos os geradores foram representados pelo modelo 2 e todos os reguladores de tensão foram representados por um ganho.

A seguir são mostrados alguns gráficos obtidos com a simulação deste sistema, onde após um segundo (1s) de simulação em regime permanente, a potência ativa da carga na barra 3 teve seu valor aumentado em 10%, passando de 0,6882 para 0,76. Estes gráficos permitem a visualização do comportamento de algumas variáveis do sistema, especialmente variáveis da unidade térmica 1 e da unidade hidráulica 3, que sofreu a perturbação.

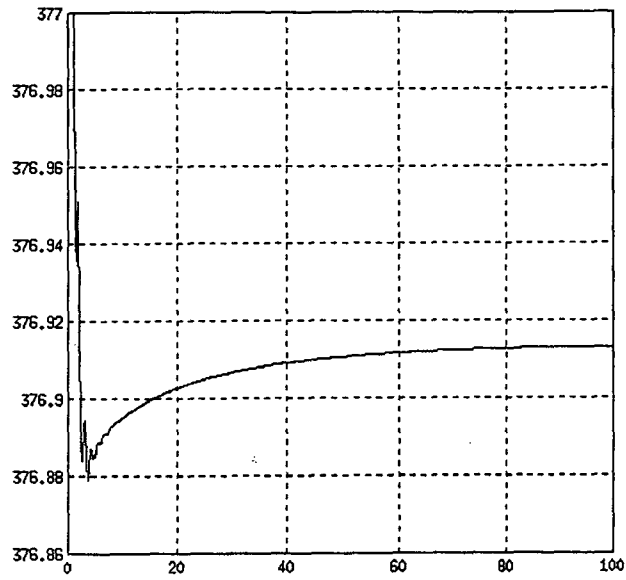


Fig. 6.1 Velocidade na máquina 1 (w_1)
 $w(\text{rad/s}) / t(\text{s})$

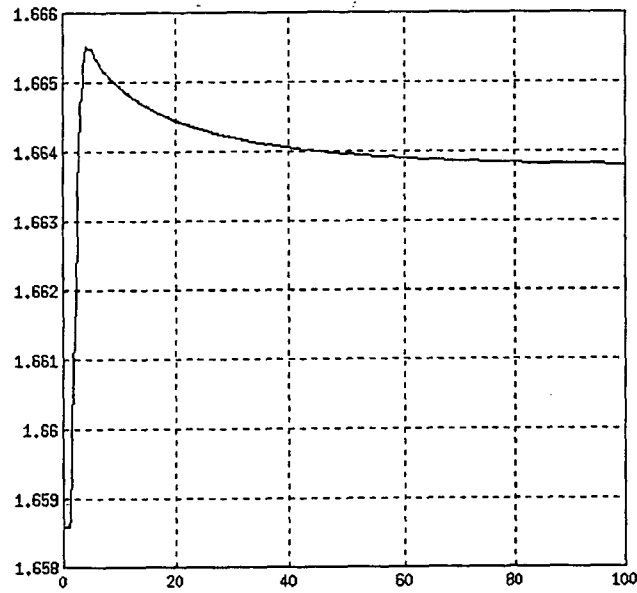


Fig. 6.2 Potência no estágio de alta pressão na turbina 1
 $P_{hp}(\text{pu}) \times t(\text{s})$

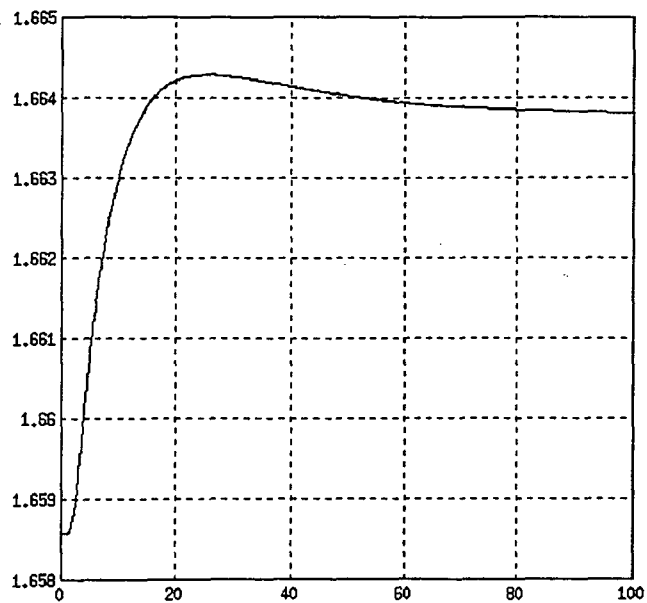


Fig. 6.3 Potência no estágio de pressão intermediária da turbina 1
 $P_{ip}(pu) \times t(s)$

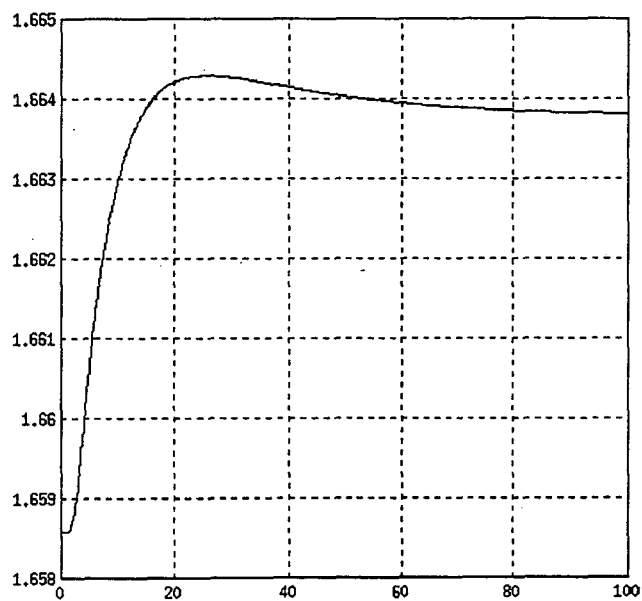


Fig 6.4 Pressão no estágio de baixa pressão da turbina 1
 $P_{lp}(pu) \times t(s)$

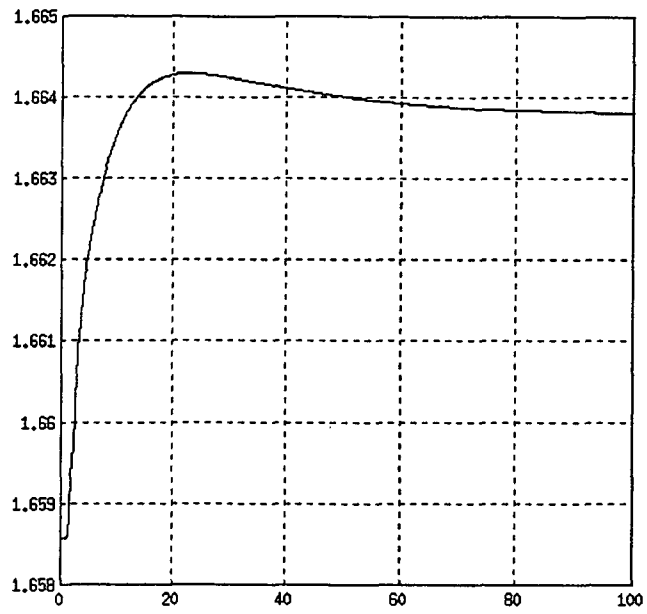


Fig. 6.5 Potência mecânica na turbina 1
 $P_m(\text{pu}) \times t(\text{s})$

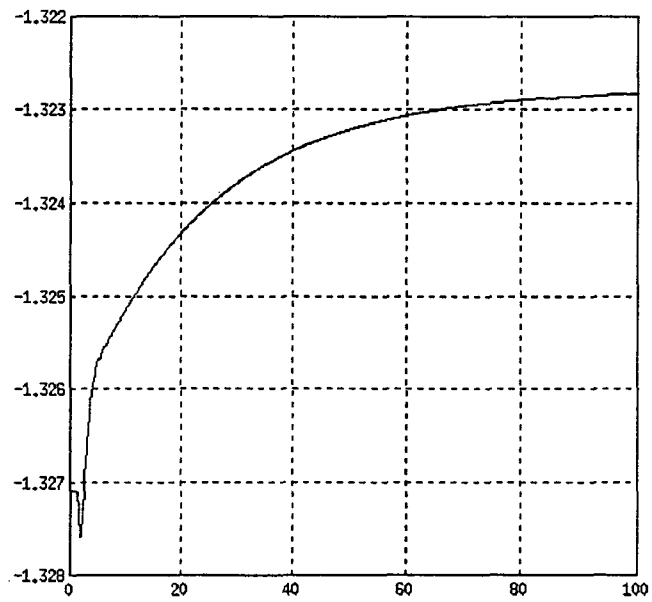


Fig. 6.6 Potência mecânica na turbina 7
 $P_m(\text{pu}) \times t(\text{s})$

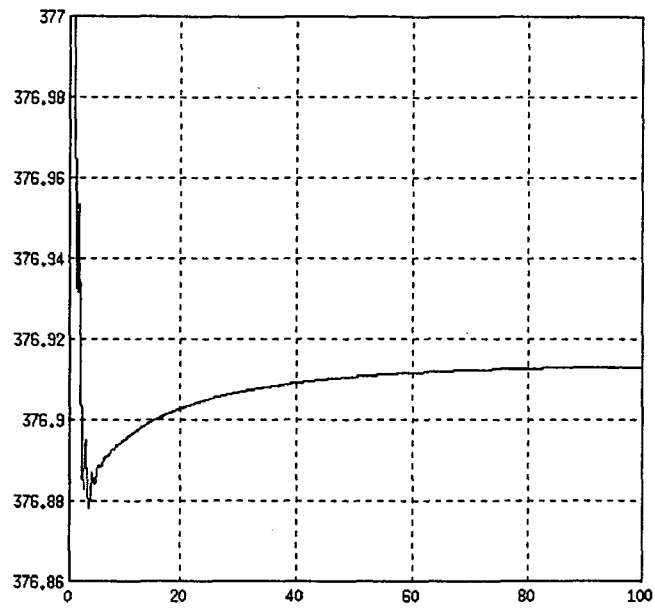


Fig. 6.7 Velocidade na máquina 3
 $w(\text{rad/s}) \times t(\text{s})$

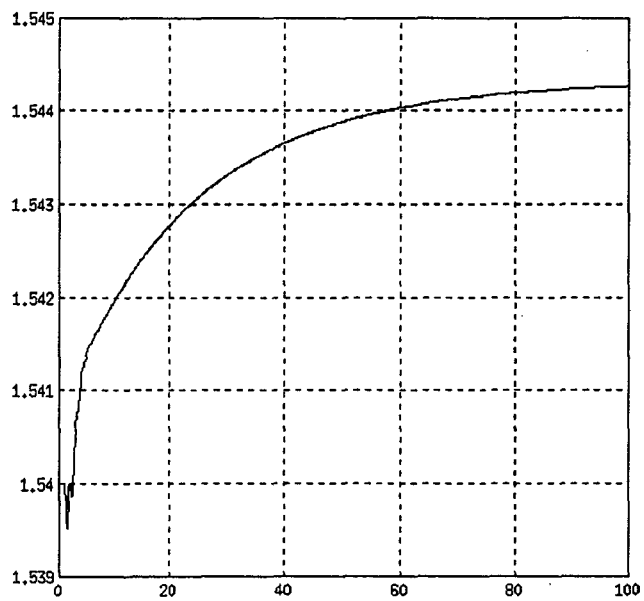


Fig 6.8 Potência mecânica na turbina 3
 $Pm(\text{pu}) \times t(\text{s})$

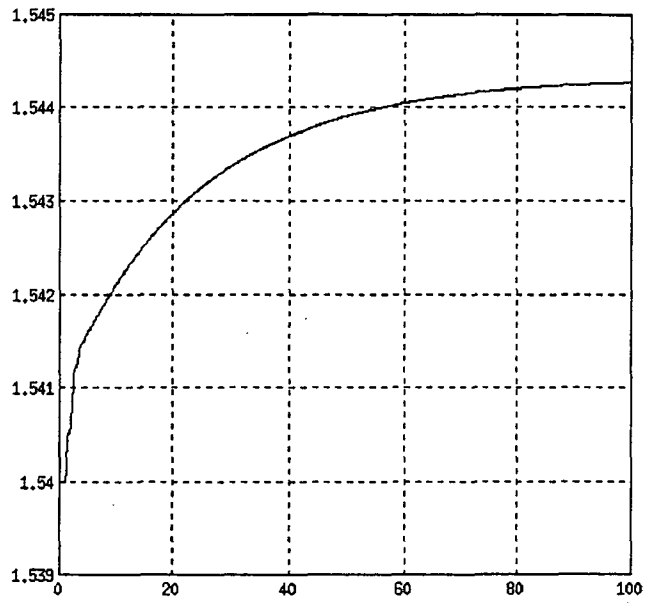


Fig. 6.9 Saída do compensador associado à turbina 3
 $P_{comp}(pu) \times t(s)$

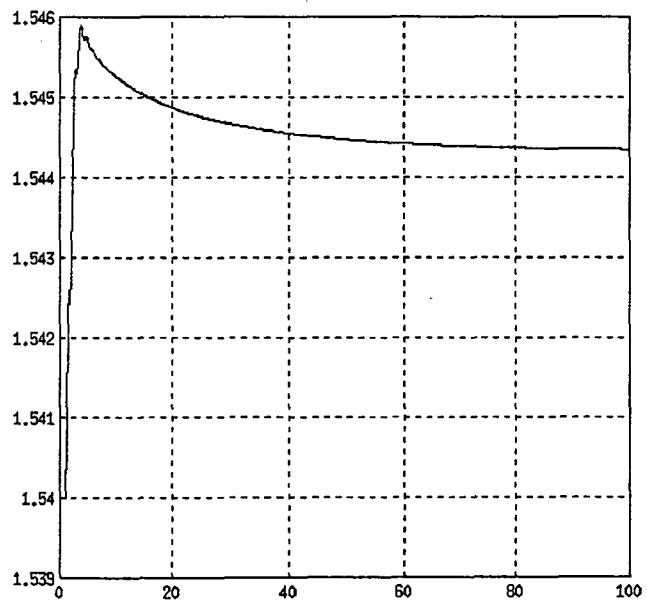


Fig. 6.10 Saída do regulador de velocidade 1
 $P_{gv}(pu) \times t(s)$

Nos gráficos anteriores verifica-se que o resultado da simulação forneceu o comportamento esperado para as variáveis ilustradas. Com o aumento da potência ativa em uma das barras, a velocidade das máquinas oscilou e estabilizou em um valor abaixo da velocidade síncrona, uma vez que o controle secundário não foi representado. Os gráficos das potências relacionados aos três estágios da turbina térmica (Figs. 6.2, 6.3 e 6.4) evidenciam o atraso mais significativo introduzido pelo estágio intermediário, sendo a potência mecânica de saída (Fig. 6.5) o somatório destas parcelas, conforme estabelecido na equação 3.56. A variação da potência mecânica na turbina hidráulica foi fortemente influenciada pelo compensador associado ao regulador de velocidade, conforme evidenciado nas figuras correspondentes (Figs. 6.8, 6.9 e 6.10). Os parâmetros para este compensador foram calculados através de fórmulas tradicionalmente empregadas na indústria (seção 3.1.4), não tendo sido realizado um projeto mais detalhado, visto o carácter qualitativo destas simulações. As demais variáveis do sistema, não mostradas nos gráficos desta seção, apresentaram comportamento igualmente compatível com o previsto.

6.2 - RESULTADOS PARA O SISTEMA COM 2 MÁQUINAS

Os resultados mostrados nesta seção foram obtidos com a simulação do sistema teste de 2 máquinas e cinco barras, cujos dados e diagrama unifilar são disponíveis no apêndice A. A máquina conectada à barra 1 foi considerada térmica e a máquina conectada a barra 2, hidráulica.

Nas simulações realizadas com este sistema foi testado o modelo de gerador proposto em [Irving, 87]. Para os demais componentes foram empregados os mesmos modelos da simulação com o sistema anterior. O objetivo principal dos testes seguintes é verificar a possibilidade de utilização do gerador [Irving, 87], uma vez que em simulações realizadas com este modelo de gerador no sistema anterior (A.2), os resultados não foram similares àqueles obtidos com o modelo 2.

Após um segundo de simulação, partindo das condições de regime permanente, a potência ativa da carga na barra 3 foi diminuída em 5%, passando de 0,5 pu para 0,475 pu.

Os gráficos seguintes permitem a visualização do comportamento das variáveis mais diretamente relacionadas à falta, na barra 3 e nas demais.

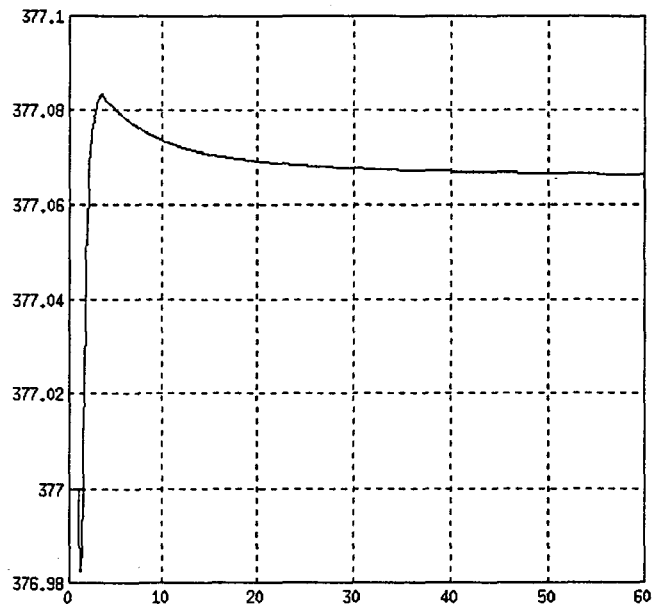


Fig 6.11 Velocidade na máquina 1- modelo [Irving, 87]
 $w(\text{rad/s}) \times t(\text{s})$

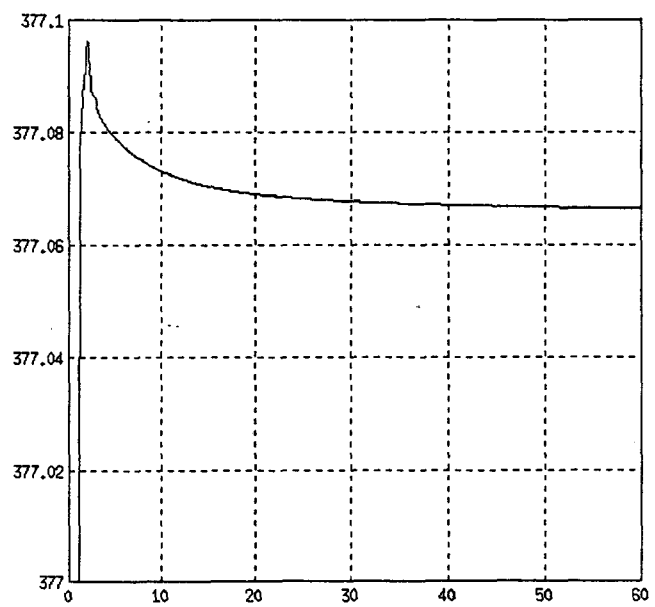


Fig 6.12 - Velocidade na máquina 1- modelo 2
 $w(\text{rad/s}) \times t(\text{s})$

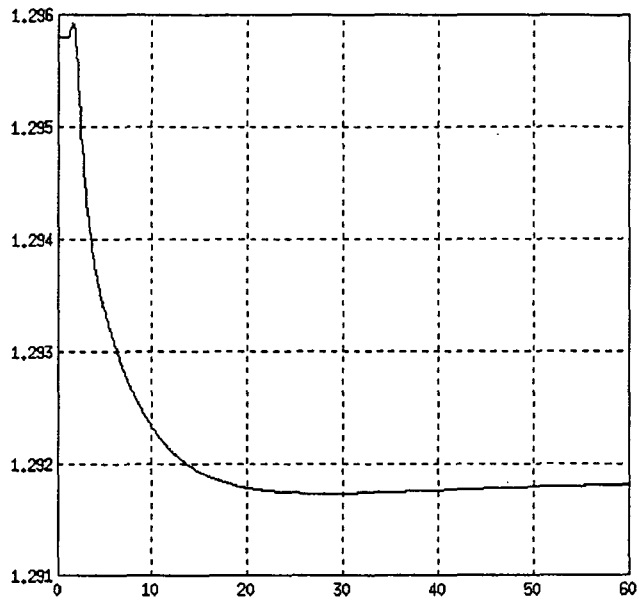


Fig 6.13 Potência mecânica na turbina 1- ger. modelo de [Irving, 87]
 $P_m(\text{pu}) \times t(\text{s})$

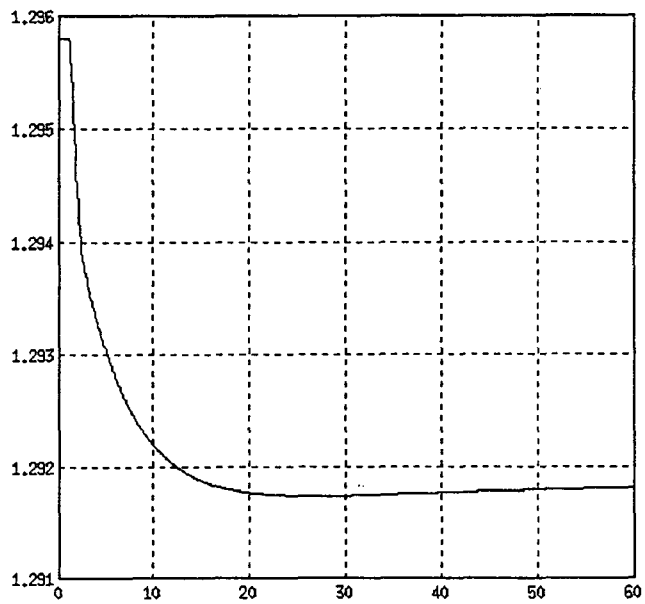


Fig. 6.14 Potência mecânica na turbina 1- ger. modelo 2
 $P_m(\text{pu}) \times t(\text{s})$

De forma geral, os gráficos apresentados descrevem o comportamento esperado para o sistema após a redução da potência ativa da carga na barra 3. Embora não se pretenda fazer comparações de modelos, nos gráficos mostrados pode-se perceber que o comportamento do sistema com o gerador proposto em [Irving, 87] é bastante semelhante ao comportamento do sistema com o gerador 2. Ressalta-se, no entanto, que o modelo de [Irving, 87] não apresentou resultados satisfatórios quando testado no sistema A2, devendo ser mais detalhadamente estudado e testado.

CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentados resultados de simulações realizadas com a estrutura computacional desenvolvida. Alguns dos modelos para os diversos componentes do sistema de potência propostos no capítulo 3 foram utilizados nestas simulações.

Com o atual estágio de desenvolvimento, o programa permite a análise de uma série de modelos que necessitam estudos mais aprofundados, especialmente o modelo do gerador proposto em [Irving, 87] e o modelo para a geração de vapor.

Embora não seja possível avaliar a flexibilidade da estrutura sem que sejam feitos testes sistemáticos de sua utilização, verificou-se que após a definição da estrutura hierárquica e de processamento, a implementação dos modelos não ofereceu dificuldades, e poucas alterações tiveram que ser feitas em códigos desenvolvidos em níveis hierárquicos superiores.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Este trabalho teve por objetivo principal o projeto e a implementação de um programa computacional destinado a simular o comportamento dinâmico lento do sistema elétrico de potência. Este programa constitui o primeiro passo no desenvolvimento do módulo dinâmico do simulador de sistemas de potência.

Por fazer parte de um projeto mais amplo - o desenvolvimento de um simulador para ensino e treinamento (SET), foram aplicadas técnicas de programação orientada para objetos, dando-se ênfase ao tema flexibilidade. Através da flexibilidade buscou-se aumentar as facilidades de reutilização e manutenção do programa, aumentando sua vida útil e a produtividade.

No desenvolvimento de software, quanto menos restrito é seu emprego, menor o número de definições impostas e maior a importância da etapa de projeto. Em POO, pelo compromisso de flexibilidade e facilidade de reutilização, a fase de projeto tem uma importância ainda maior no desenvolvimento de um programa. Deve ser observado, no entanto, que a realização do projeto completo de uma estrutura computacional antes do início das atividades de implementação, pressupõe um conhecimento prévio de todos os futuros requisitos da estrutura e dos meios de alcançar estes requisitos. Este conhecimento, por seu aspecto genérico e amplo, é de difícil obtenção. Neste trabalho as etapas de projeto, de estudo e seleção dos métodos de solução e dos modelos e de implementação foram realizadas simultaneamente. Desta forma, algumas estruturas tiveram de ser reformuladas ao longo do trabalho, de forma a adaptarem-se às necessidades de simulação. Somente após a conclusão de uma versão preliminar do programa foi possível a visualização do processo total de estruturação e simulação do modelo do sistema de potência.

Após a conclusão desta versão preliminar, novos requisitos serão impostos ao programa para permitir sua inclusão no ambiente de simulação em operação no LABSPOT [Machado, 93]. Destes requisitos destaca-se a necessidade de adoção de técnicas que possibilitem a simulação em tempo real. Das técnicas modernas de processamento, a POO vincula-se mais diretamente à programação distribuída, com objetos distribuídos. Estima-se que quanto maior a autonomia de cada objeto mais eficiente tornar-se-á o processamento distribuído.

Em um plano mais imediato, sem considerar o compromisso com simulação em tempo real, o acoplamento entre os dois programas solicitará adaptações entre as linguagens empregadas - Fortran 77, C e C++, entre as metodologias estruturada e orientada para objetos e ampliações nas atuais atribuições do programa de dinâmica. Um exemplo destas ampliações é a consideração do ilhamento. O simulador do LABSPOT, em seu estágio atual, permite a continuidade da simulação mesmo estando o sistema sob condição de ilhamento, mas esta situação não foi prevista no programa de simulação dinâmica. Uma possibilidade de adaptação é através da inclusão de uma classe "ilha". Hierarquicamente esta classe ocuparia a posição da atual classe "sistema" e para o processamento seria considerado que o sistema possui uma ou mais ilhas, para as situações de operação normal e com ilhamento, respectivamente. Em uma análise preliminar, avalia-se que a adaptação do programa para simulações onde o ilhamento é considerado não impõe mudanças significativas na estrutura. Alterações desta natureza deverão ocorrer durante o processo de adaptação do programa ao SET e a facilidade com que estas alterações serão executadas permitirá avaliar o nível de flexibilidade alcançado no programa desenvolvido.

Outro tema abordado neste trabalho foi a formulação matemática do problema de simulação dinâmica e a seleção dos métodos e das técnicas de solução apropriados, tendo sido verificado um estreito relacionamento entre os mesmos. Como observado em [Stagg, 68], o relacionamento entre a formulação matemática de um problema e a escolha das técnicas de solução é de difícil avaliação antes do

desenvolvimento completo do programa e da comparação das alternativas. Na seleção dos métodos de solução partiu-se da especificação forte de utilização do método simultâneo. Para adaptar o método simultâneo à programação orientada para objetos foi utilizado o método de decomposição de matrizes exposto no capítulo 4. Este método, aproveitando a estrutura em blocos da matriz jacobiana, facilitou a aplicação dos conceitos de POO por permitir a realização de um grande número de operações encapsuladas na classe "unidade de geração". No entanto, dentro da unidade de geração foi necessário estabelecer um grande fluxo de informações entre seus componentes. Uma opção ao método simultâneo é o método de solução alternado. A utilização do método alternado permite que cada elemento torne-se responsável pela integração de suas variáveis, adaptando-se mais facilmente à programação orientada para objetos e permitindo a criação de objetos com maior autonomia. Este método também apresenta a vantagem de permitir a utilização de passos de integração diferentes para elementos com diferentes ordens de constantes de tempo.

Dentre as perspectivas do trabalho, além da reavaliação dos métodos de solução, destacam-se o estudo e a implementação de novos modelos de componentes, especialmente aqueles com comportamento dinâmico lento. A inclusão do modelo do sistema de geração de vapor em unidades térmicas, por exemplo, permitirá o acompanhamento de oscilações com maior duração, características de estudos de dinâmica lenta. A modelagem do controle automático de geração (CAG) e a modelagem dinâmica das cargas são também de extrema importância em simulações de dinâmica lenta, e especialmente importantes em simuladores para treinamento, onde o compromisso com o comportamento do sistema real é o requisito essencial. Ainda dentro deste compromisso com o comportamento do sistema real, percebe-se a necessidade de desenvolver, paralelamente ao estudo de modelos, projetos que possibilitem sua validação.

Acredita-se que tendo sido completada uma versão do programa, novas seleções e implementações de métodos e modelos poderão ser feitas com o

aproveitamento da estrutura desenvolvida e testes e comparações entre os mesmos poderão ser estabelecidas.

BIBLIOGRAFIA

- [Ackerman, 92] ACKERMAN, W.J., BLOCK, W.R., "Understanding Supervisory Systems", Computer Applications in Power- IEEE, vol 5, Nº 4, pg 37-40, Outubro 1992.
- [Adibi, 74] ADIBI, M.M., HIRSCH, P.M., JORDAN JR., J.A., "Solution Methods for Transient and Dynamics Stability", Proc. IEEE, vol. 62, Nº 7, pg 951-958, Julho 1974.
- [Anderson, 73] ANDERSON, P.M., "Mathematical Modeling of Boilers for Dynamic Stability Calculations", Proc. Power Plants Dynamics Control and Testing Symposium, Knoxville, TN, USA, pg 7/2-7/39, 1973
- [Anderson, 77] ANDERSON, P.M., FOUAD, A.A., "Power System Control and Stability". The Iowa State University Press, USA, 1977.
- [Anderson, 80] ANDERSON, P.M., and DEMBART, B., "Computacional Aspects of Transient Stability Analysis", Electric Power Problems: The Mathematical Challenge, SIAM, 1980.
- [Arrillaga, 83] ARRILAGA, J., ARNOLD, C.P., "Computer Modelling of Electrical Power Systems", John Wiley & Sons Ltd, Great Britain, 1983.
- [Cate, 73] CATE, E.G., GELOPULOS, D.P., "Time Frame Notion and Time Response of the models in Transient, Mid-Term and Long Term Stability Programs", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol PAS- 103, pg 143-151, Janeiro 1984.
- [Cegrel, 86] CEGREL, T., "Power System Control -Tecnology", Prentice/ Hall International (UK) Ltd, Great Britain, 1986.

- [Chu, 91] CHU, R.I., DROBROWOLSKI, E.J., and NOHI, K., BARR, E.J., McGEHAN, J., SCHEURER, D., "The uses of an operator simulator for system restoration", IEEE Trans. on Power Systems, pg 171-177, 1991.
- [deMello, 92] deMELLO, F.P., FELTES, J.W., LASKOWSKI, T.F., OPPEL, L.J., "Simulating Fast and Slow Dynamic Effects in Power Systems", Computer Applications in Power- IEEE, vol 5, Nº 3, Julho 1992.
- [Dommel, 84] DOMMEL, H.W., SATO, N., "Fast Transient Stability Solutions", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-91, pg 1643-1650, 1972.
- [Ellis, 93] ELLIS, M.A., STROUSTRUP, B., C++ Manual de Referência Comentado, Editora Campus, 1993.
- [EPRI, 84] DEMBART, B. , CHAN, Y.-W.M., LEWIS, J.G., POOLE, W.G., "Dynamic Stability Calculations Using Vector and Array Processors" EPRI Research Project RP- 670-2, Final Report, EL-3335, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, Janeiro 1984.
- [EPRI, 85] MANKE, J.W., PAULY, W.R., HEMMAPLARDTH, K., "Long-Term System Dynamics Simulations Methods", EPRI Research Project RP-1469-1, Final Report, EL-3894, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, Fevereiro 1985.
- [Ferreira, 86] FERREIRA, A.B.H., "Novo Dicionário da Língua Portuguesa", Nova Fronteira, 1986.
- [Foley, 90] FOLEY, M., CHEN, Y., and BOSE, A., "A Real Time Power System Simulation Laboratory Environment", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 5, Nº 4, pg 1400-1406, Novembro 1990.
- [Hakavik, 93] HAKAVIK, B., HOLEN, A.T., "Power System Modelling and Sparse Matrix Operations Using Object-Oriented Programming", IEEE / PES Summer Meeting, 1993.

- [IEEE C.R., 68] IEEE Committee Report, "Computer Representation of Excitation Systems", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-87, Nº 6, pg 1460-1464, Junho 1968.
- [IEEE C.R., 73] IEEE Committee Report, "Dynamic Models for Steam and Hidro Turbines in Power Systems Studies", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol PAS- 92, pg 1904-1915, Novembro 1973.
- [IEEE C.R., 81] IEEE Committee Report, "Excitation System Models for Power System Stability Studies", IEEE Trans., vol PAS-100, Nº 2, pg 494-508, Fevereiro 1981.
- [Irving, 87] IRVING, M.R., RAFIAN, M., and STERLING, M.J.H., "Real-Time Power System Simulation", Proc. IEE, vol 134, pg 206-222, Maio 1987.
- [Kola, 89] KOLA, V., BOSE, A., and ANDERSON, P. M., "Power Plant Models for Operator Training Simulators", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 4, Nº 2, pg 559-565, Maio 1989.
- [Lamont, 80] LAMONT, J. W., PODMORE, R., TINNEY, W. F., LIACCO, T.E., HAPP, H.H., ANDERSON, P. M., "An Introduction and Overview of Future Power System Computing Requeriments: A Panel Discussion", Electrical Power Problems: The Mathematical Challenge, SIAM 1980.
- [Machado, 91] MACHADO, L.J.B., "O Simulador de Sistemas de Potência do LABSPOT", Nota interna do Grupo de Sistemas de Potência da UFSC, Abril 1991 .
- [Machado, 93] MACHADO, L.J.B., "Simuladores para Treinamento na Operação do Sistema Elétrico", Encontro para Debates de Assuntos de Operação, Sao Paulo, Novembro 1993.
- [Neyer, 90] NEYER, A.F., WU, F.F., IMNHOF, K., "Object-Oriented Programming for Flexible Software: Example of a Load Floaw", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 5, Nº 3, pg 689-696, Agosto 1990.

- [Prais, 88] PRAIS, M., BOSE, A., "A Topology Processor That Tracks Network Modifications Over Time", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 3, Nº 3, pg 992-998, Agosto 1988.
- [Prais, 89] PRAIS, M., ZHANG G., CHEN Y., BOSE A., and CURTICE, D., "Operator Training Simulator: Algorithms and Test Results", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 4, Nº 3, pp 1154-1159, Agosto 1989.
- [Prais b, 89] PRAIS, M., JOHNSON, C., BOSE, A., CURTICE, D., "Operator Training Simulator: Component Models", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 4, Nº 3, pg 1160-1166, Agosto 1989.
- [Saikawa, 84] SAIKAWA, K., GOTO, M., IMAMURA, Y., TAKATO, M., and KANKE, T., "Real Time Simulation System of Large-Scale Power System Dynamics", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, Nº 12, pg 3496-3501, Dezembro 1984.
- [Sasano, 83] SASANO, C.N., "Modelagem de usinas reversíveis e intercâmbios probabilísticos de potência em um modelo estocástico de produção de energia elétrica", Dissertação de Mestrado, GSP/ LABSPOT, Abril 1983.
- [Smith, 93] SMITH, L.H., BLOCK, W.R., "RTUs Slave for Supervisory Systems", Computer Applications in Power- IEEE, vol. 6, Nº 1, Janeiro 1993.
- [Stagg, 68] STAGG, G.W., EL-ABIAD, A.H., Computer Methods in Power System Analysis, New-York Mcgraw-Hill, 1968.
- [Stott, 79] STOTT, B., "Power Dynamic Response Calculations", Proc. IEEE, vol 67, pg 219-240, Fevereiro 1979.
- [Wiener, 91] WIENER, R.S., PINSON, L.J., "C ++ Programação Orientada para Objeto - Manual Prático e Profissional", McGraw-Hill Ltda., 1991.
- [Young, 72] YOUNG, C.C., "Equipment and system modeling for large-scale stability studies", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-91, pg 99-109, Jan/ Fev 1972.

[Zhang, 89] ZHANG, G., BOSE, A., "Scenario Building for Operator Training Simulator using a Transient Stability Program", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 4, N^o 4, pg 1542-1549, Outubro 1989.

APÊNDICE A

Neste apêndice são apresentados os dados dos sistemas-teste utilizados no capítulo 6, sendo fornecido seu diagrama unifilar, os dados das linhas, das barras e dos elementos das unidades de geração. Os sistemas-teste empregados são:

A.1 - Duas máquinas e cinco barras;

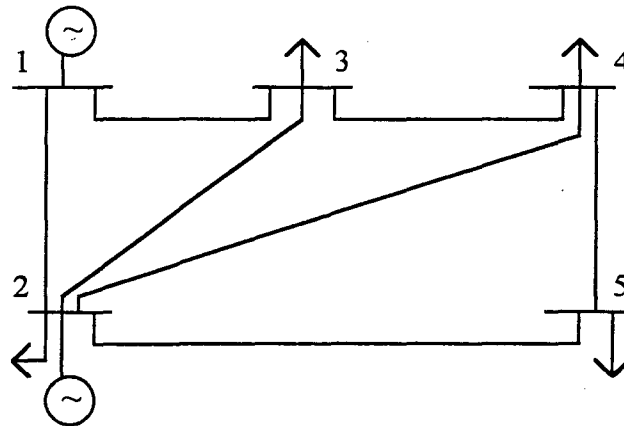
A.2 - Cinco máquinas e sete barras;

Para os reguladores de tensão, turbinas, compensadores e reguladores de velocidade foram empregados os modelos descritos no capítulo 3, tendo sido utilizados os parâmetros típicos encontrados na bibliografia. A notação empregada neste apêndice para designar os parâmetros dos modelos corresponde à notação adotada no capítulo 3, onde os mesmos foram definidos.

A.1 - DADOS DO SISTEMA DE DUAS MÁQUINAS

Este sistema foi apresentado em [Stagg, 68], sendo constituído por duas máquinas e cinco barras, conforme ilustrado no diagrama unifilar seguinte. Os dados estão calculados em p.u., na base de 100 MVA e os ângulos estão em radianos.

DIAGRAMA UNIFILAR



DADOS DAS LINHAS

Código da barra p-q	R p-q	X p-q	y' / 2
1-2	0,02	0,06	0,03
1-3	0,08	0,24	0,025
2-3	0,06	0,18	0,02
2-4	0,06	0,18	0,02
2-5	0,04	0,12	0,015
3-4	0,01	0,03	0,01
4-5	0,08	0,24	0,025

DADOS DAS BARRAS

Barra	V	θ	Pgerada	Qgerada	Pcarga	Qcarga
1	1,06	0,0	1,3	-0,074	0,0	0,0
2	1,047	-0,05	0,4	-0,30	0,2	0,1
3	1,024	-0,087	0,0	0,0	0,5	0,15
4	1,023	-0,09	0,0	0,0	0,4	0,05
5	1,018	-0,107	0,0	0,0	0,6	0,1

DADOS DOS GERADORES

Em [Stagg, 68] foi adotado o modelo clássico para representar os geradores, tendo sido fornecidos apenas os valores de $x'd$. Neste trabalho foram utilizados os valores mostrados a seguir.

Barra	1	2
x_d	1,5	1,5
x_q	1,5	1,5
$x'd$	0,3	0,3
H	5,0	5,0
D	0,1	0,1
T'do	5	5

DADOS DOS REGULADORES E DAS TURBINAS

Reguladores de tensão

Ka	30
----	----

Reguladores de velocidade

Krv	0.06
Trv	0.3

Turbinas hidráulicas

Tw	1,0
----	-----

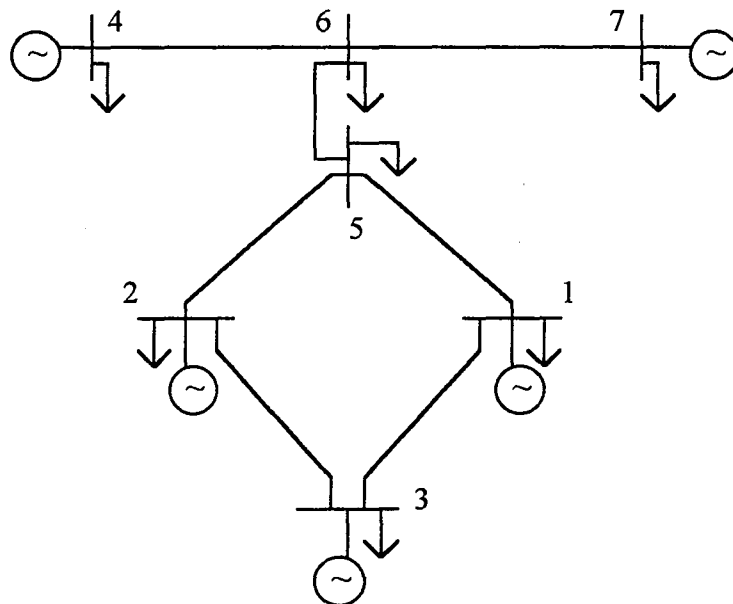
Compensadores dos reguladores de velocidade associados às turbinas hidráulicas

Tr	6
r	0.25

A.2 - DADOS DO SISTEMA COM CINCO MÁQUINAS

Este sistema baseia-se no modelo equivalente com 7 barras utilizado nos estudos iniciais de geração e transmissão AC de Itaipu [IEEE, 89]. No entanto, valores de geração e modelos de componentes foram alterados, não tendo havido preocupação em manter as características do equivalente original. Para efeito de demonstração dos modelos de componentes, a unidade geradora localizada na barra 1 foi considerada termoelétrica.

DIAGRAMA UNIFILAR



DADOS DAS LINHAS

Código da barra p-q	R p-q	X p-q
1-3	0,003	0,038
2-3	0,005	0,076
4-6	0,0029	0,0734
5-1	0,019	0,245
5-2	0,015	0,225
6-5	0,0	0,039
6-7	0,004	0,057

DADOS DAS BARRAS

Sbase = 1000 MVA

Barra	V	θ	Pgerada	Qgerada
1	1,03	0,295	1,658	-0,551
2	1,03	0,342	1,332	-0,350
3	1,029	0,331	1,54	-0,446
4	1,039	0,548	4,503	0,572
5	1,031	0,237	0,0	0,0
6	1,033	0,241	0,0	0,0
7	0,966	0,0	-1,327	-0,572

Barra	Pcarga	Qcarga	Shunt (pu)
1	2,405	-0,467	0,1792
2	0,6923	-0,184	0,1491
3	0,6882	-0,235	0,1142
4	0,0626	0,0243	0,0368
5	0,8464	-0,0108	0,0330
6	-0,0083	0,0307	2,1420
7	2,884	-0,196	0,0420

DADOS DOS GERADORES

Barra	1	2	3	4	7
MVA	1900	1400	1944	6633	6000
xd	0,85	0,85	0,88	0,9	1,0
xq	0,7	0,7	0,69	0,68	0,7
x'd	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
H	4,5	4,5	4,5	5,07	5,0
D	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
T'do	5	5	5	7,6	8,0

DADOS DOS REGULADORES E DAS TURBINAS

Para os reguladores de tensão e velocidade, as turbinas hidráulicas e os compensadores, foram utilizados os mesmos parâmetros do sistema anterior (A.1).
Para a turbina térmica utilizou-se:

Turbina térmica

Tch	0,3
Trh	7,0
Tco	0,2
Fhp	0,3
Fip	0,4
Flp	0,3

APÊNDICE B

Neste apêndice são apresentadas as equações algebrizadas para os elementos do sistema elétrico cujos modelos foram apresentados no capítulo 4. É mostrada a aplicação da regra trapezoidal às equações diferenciais e o conjunto de equações algébricas resultante é colocado na forma $F(Y) = 0$.

B.1 - MÁQUINAS SÍNCRONAS

Para o modelo 2 da máquina síncrona, descrito pelas equações (3.3), (3.4), (3.8), (3.9) e (3.10), pode ser formado o sistema de equações algébricas descrito a seguir.

B.1.1 - OBTENÇÃO DE $F_{\omega} = 0$

Com as expressões para v_d e v_q (3.7) e (3.8) tem-se a expressão para a potência elétrica P_e :

$$P_e = I_d V_d + I_q V_q = -r_a I_d^2 - r_a I_q^2 - I_d I_q (x_q - x'_d) + I_q$$

que substituída em (3.3) resulta:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_s}{2H} \left\{ P_m + r_a I_d^2 + r_a I_q^2 + I_d I_q (x_q - x'_d) - I_q E'_q - D (\omega - \omega_s) \right\}$$

Aplicando a regra trapezoidal (eq.(4.13)) à equação acima tem-se:

$$\omega_1 = \omega_0 + \frac{\Delta t}{2} \left\{ \frac{\omega_s}{2H} \left\{ P_{m1} + r_a I_{d1}^2 + r_a I_{q1}^2 + I_{d1} I_{q1} (x_q - x'_d) - I_{q1} E'_{q1} - D (\omega_1 - \omega_s) \right\} + \right. \\ \left. + \frac{\omega_s}{2H} \left\{ P_{m0} + r_a I_{d0}^2 + r_a I_{q0}^2 + I_{d0} I_{q0} (x_q - x'_d) - I_{d0} I_{q0} - I_{q0} E'_{q0} - D (\omega_0 - \omega_s) \right\} \right\}$$

Nesta expressão, assim como em todo este trabalho, o índice 1 refere-se ao valor das variáveis no tempo t e o índice 0 refere-se ao valor das variáveis no tempo t- Δt .

Reescrevendo a equação acima na forma F(Y)= 0, tem-se:

$$\omega_1 \left(1 + \frac{\Delta t \omega_s}{4H} \right) - \frac{\Delta t \omega_s}{4H} P_{m1} - \frac{\Delta t \omega_s}{4H} r_a I_{d1}^2 - \frac{\Delta t \omega_s}{4H} r_a I_{q1}^2 - \frac{\Delta t \omega_s}{4H} I_{d1} I_{q1} (x'_q - x'_d) + I_{q1} E'_{q1} + \\ \omega_0 \left(-1 + \frac{\Delta t \omega_s}{4H} \right) - \frac{\Delta t \omega_s}{4H} P_{m0} - \frac{\Delta t \omega_s}{4H} r_a I_{d0}^2 - \frac{\Delta t \omega_s}{4H} r_a I_{d0}^2 - \frac{\Delta t \omega_s}{4H} I_{d0} I_{q0}^2 (x'_q - x'_d) + I_{q0} E'_{q0} = 0 \quad (B.1)$$

3.1.2 - OBTENÇÃO DE $F_\delta = 0$

À partir da equação diferencial para δ (3.4), reescrita abaixo,

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s$$

e, com a aplicação da regra trapezoidal, tem-se $F_\delta = 0$ mostrada abaixo:

$$\delta_1 - \frac{\Delta t}{2} \omega_1 - \delta_0 - \frac{\Delta t}{2} \omega_0 + \Delta t \omega_s = 0 \quad (B.2)$$

3.1.3 - OBTENÇÃO DE $F_{E'Q} = 0$

Aplicando a regra trapezoidal à equação (3.10) reescrita abaixo, obtém-se

$$F_{E'q} = 0.$$

$$\frac{d E'q}{dt} = \frac{E_{fd} + (x_d - x'_d) I_d - E'q}{\tau' d_0}$$

$$\begin{aligned} E'_{q1} \left(1 + \frac{\Delta t}{2\tau' d_0} \right) - \frac{\Delta t}{2\tau' d_0} E_{fd1} - \frac{\Delta t}{2\tau' d_0} (x_d - x'_d) I_{d1} - \frac{\Delta t}{2\tau' d_0} E'_{q1} + \\ + E'_{q0} \left(1 + \frac{\Delta t}{2\tau' d_0} \right) - \frac{\Delta t}{2\tau' d_0} E_{fd0} - \frac{\Delta t}{2\tau' d_0} (x_d - x'_d) I_{d0} - \frac{\Delta t}{2\tau' d_0} E'_{q0} \end{aligned} \quad (B.3)$$

3.1.4 - OBTENÇÃO DE $F_{Id} = 0$ E $F_{Iq} = 0$

Neste trabalho optou-se pela inclusão das variáveis I_d e I_q no vetor Y . Assim, para todos os modelos de máquina síncronas utilizados, foram desenvolvidas expressões para F_{Id} e F_{Iq} .

Aplicando-se a transformação (3.5) nas expressões para v_d e v_q ((3.8) e (3.9)) pode-se escrever:

$$\begin{bmatrix} -\text{sen}\delta & \text{cos}\delta \\ \text{cos}\delta & \text{sen}\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{re} \\ v_{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_a & -x_q \\ x'_d & -r_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E'q \end{bmatrix}$$

Explicitando I_d e I_q e escrevendo já na forma $F_{Id} = 0$ e $F_{Iq} = 0$, tem-se:

$$I_d - \frac{1}{r_a^2 + x'_d x_q} \left[r_a (v_{re} \text{sen}\delta - v_{im} \text{cos}\delta) + x_q (v_{re} \text{cos}\delta + v_{im} \text{sen}\delta + E'q) \right] = 0 \quad (B.4)$$

$$I_q - \frac{1}{r_a^2 + x'dx_q} \left[r_a (-v_{re} \sin \delta - v_{im} \cos \delta - E'_{q'}) + x'd (v_{re} \cos \delta + v_{im} \sin \delta) \right] = 0 \quad (B.5)$$

Em (B.1) os termos P_{m1} e P_{m0} referem-se à potência mecânica fornecida pela turbina, sendo calculados por expressões que variam com o modelo de turbina adotado. Esta mesma dependência das expressões de outros elementos pode ser observada nos termos E_{fd1} e E_{fd0} da equação (B.3).

Para o modelo da máquina síncrona proposto em [Rafian, 87], a aplicação da regra trapezoidal às equações (3.37), (3.38) e (3.39) e a organização do sistema de equações algébricas resultante, incluindo as equações (3.40) e (3.41) resulta no sistema seguinte:

$$F_{\omega} = 0$$

$$\begin{aligned} \omega_1 \left(1 + \frac{\Delta t \omega_s}{4H} \right) - \frac{\Delta t \omega_s}{4H} P_{m1} - \frac{\Delta t \omega_s}{4H} r_a I_{d1}^2 - \frac{\Delta t \omega_s}{4H} r_a I_{q1}^2 - \frac{\Delta t \omega_s}{4H} I_{d1} I_{q1} (x_q - x_d) + I_{q1} E'_{q1} + \\ + \omega_0 \left(-1 + \frac{\Delta t \omega_s}{4H} \right) - \frac{\Delta t \omega_s}{4H} P_{m0} - \frac{\Delta t \omega_s}{4H} r_a I_{d0}^2 - \frac{\Delta t \omega_s}{4H} r_a I_{q0}^2 - \frac{\Delta t \omega_s}{4H} I_{d0} I_{q0} (x_q - x_d) + I_{q0} E'_{q0} = 0 \end{aligned} \quad (B.6)$$

$$F_{\delta} = 0$$

$$\delta_1 - \frac{\Delta t}{2} \omega_1 - \delta_0 - \frac{\Delta t}{2} \omega_0 + \Delta t \omega_s = 0 \quad (B.7)$$

$$F_E = 0$$

$$E_1 \left(1 + \frac{\Delta t}{2\tau'_{do}} \right) - \frac{\Delta t}{2\tau'_{do}} E_{fd1} - \frac{\Delta t}{2\tau'_{do}} E_1 + E_0 \left(1 + \frac{\Delta t}{2\tau'_{do}} \right) - \frac{\Delta t}{2\tau'_{do}} E_{fd0} - \frac{\Delta t}{2\tau'_{do}} E_0 \quad (B.8)$$

$$F_{Id} = 0$$

$$I_d - \frac{1}{r_a^2 + x'dx_q} \left[r_a (v_{re} \sin \delta - v_{im} \cos \delta) + x_q (v_{re} \cos \delta + v_{im} \sin \delta + E) \right] = 0 \quad (B.9)$$

$$F_{Iq} = 0$$

$$I_q - \frac{1}{r_a^2 + x'dx_q} [r_a(-v_{re} \sin\delta - v_{im} \cos\delta - E) + x_d(v_{re} \cos\delta + v_{im} \sin\delta)] = 0 \quad (\text{B.10})$$

B.2 SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

No capítulo 3 foi apresentado um modelo simplificado para representar o sistema de excitação (Fig. 3.5 e eq. (3.42)), sendo sua função de transferência um ganho KA. Por ser uma expressão algébrica simples, na implementação realizada neste trabalho não foi incluída uma função F_{efd} no vetor $F(Y)$. O valor de efd é calculado internamente em um método da classe "regulador de tensão", a partir do valor atualizado da tensão, e enviado aos demais objetos do sistema, quando solicitado (por exemplo, enviado ao gerador para atualização da função F_E).

A seguir é mostrada a expressão F_{efd} para o modelo de primeira ordem do regulador de tensão.

Sendo a equação diferencial para este modelo:

$$\frac{d E_{fd}}{dt} = \frac{KA(V_{ref} - V_t)}{TA}$$

a aplicação da regra trapezoidal resulta:

$$E_{fd1} \left(1 + \frac{\Delta t}{2TA} \right) - \frac{\Delta t}{2TA} KA(V_{ref} - V_{t1}) + E_{fd0} \left(-1 + \frac{\Delta t}{2TA} \right) - \frac{\Delta t}{2TA} KA(V_{ref} - V_{t0}) = 0 \quad (\text{B.11})$$

B.3 REGULADORES DE VELOCIDADE

Para os modelos simplificados de reguladores de velocidade de unidades de geração térmicas e hidráulicas (Fig. 3.8a , Fig. 3.8b e eq. (3.44) a (3.49)) pode-se desenvolver as expressões algébricas mostradas a seguir.

B.3.1 - REGULADORES DE VELOCIDADE DE UNIDADES GERADORAS TÉRMICAS

Sendo a equação diferencial para este modelo:

$$\frac{d \Delta P}{dt} = \frac{\Delta P - P_{GV}}{T_{rv}} = \frac{P_{ref} - K(\omega - \omega_s) - P_{GV}}{T_{rv}}$$

a aplicação da regra trapezoidal permite a obtenção da seguinte expressão para $F_{P_{GV}} = 0$:

$$P_{GV1} \left(1 + \frac{\Delta t}{2T_{rv}} \right) + \frac{\Delta t}{2T_{rv}} K \omega_1 + P_{GV0} \left(-1 + \frac{\Delta t}{2T_{rv}} \right) + \frac{\Delta t}{2T_{rv}} K \omega_0 - \frac{\Delta t}{T_{rv}} P_{ref} - \frac{\Delta t}{T_{rv}} \omega_s = 0 \quad (B.12)$$

B.3.2 - REGULADORES DE VELOCIDADE PARA UNIDADES GERADORAS HIDRÁULICAS:

As equações para este modelo, apresentadas no capítulo 3 e reescritas aqui, são:

$$\frac{d \Delta P}{dt} = \frac{K(\omega - \omega_s) - \Delta P}{T_{rv}}$$

e

$$P_{GV} = P_{ref} - \Delta P$$

Algebrizando a equação diferencial obtem-se a expressão para $F_{\Delta P} = 0$:

$$\Delta P_1 \left(1 + \frac{\Delta t}{2T_{rv}} \right) - \frac{\Delta t}{2T_{rv}} K_{\omega 1} + \Delta P_0 \left(-1 + \frac{\Delta t}{2T_{rv}} \right) - \frac{\Delta t}{2T_{rv}} K_{\omega 0} = 0 \quad (B.13)$$

A expressão acima é incluída no vetor $F(Y)$ e a solução iterativa fornece o valor de ΔP . O valor de P_{GV} é calculado internamente em um método da classe "reg_velocidade_hidraulico" a partir de ΔP e de P_{ref} .

B.4 TURBINAS HIDRÁULICAS

Devido a presença de um zero na função de transferência do modelo para turbinas hidráulicas (Fig. 3.9), a seguinte equivalência é utilizada:

$$\frac{P_m}{P_{comp}} = \frac{X}{P_{comp}} + \frac{Y}{P_{comp}}$$

sendo X e Y variáveis intermediárias. Pode-se então escrever:

$$\frac{X}{P_{comp}} = \frac{3}{1 + 0.5 s T_w}$$

ou

$$\frac{dX}{dt} = \frac{3 P_{comp} - X}{0.5 T_w}$$

e

$$\frac{Y}{P_{comp}} = -2$$

A algebrização da equação diferencial de X fornece:

$$F_X = 0$$

$$X_1 \left(1 + \frac{\Delta t}{T_w} \right) - \frac{3 \Delta t}{T_w} P_{comp_1} + X_0 \left(1 + \frac{\Delta t}{T_w} \right) - \frac{3 \Delta t}{T_w} P_{comp_0} = 0 \quad (B.14)$$

Com o valor atualizado de X calcula-se P_m internamente na classe turbina através de:

$$P_{m1} = X_1 - 2 P_{comp_1} \quad (B.15)$$

A função de transferência do compensador associado à turbina hidráulica, por também apresentar um zero, é decomposta nos termos abaixo:

$$\frac{P_{comp}}{PGV} = \frac{V}{PGV} + \frac{Z}{PGV}$$

onde:

$$\frac{V}{PGV} = \frac{R}{r}$$

e

$$\frac{Z}{PGV} = \frac{r-R}{r} \frac{1}{1+s \frac{r}{R} Tr}$$

Definindo $Tr' = r/R Tr$, $b_r = (r-R)/r$ e algebrizando a equação diferencial assim obtida, mostrada abaixo:

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{b_r PGV - Z}{Tr'}$$

pode-se escrever a expressão $F_Z = 0$ seguinte:

$$Z_1 \left(1 + \frac{\Delta t}{2 Tr'} \right) - \frac{\Delta t}{2 Tr'} b_r PGV_i + Z_0 \left(-1 + \frac{\Delta t}{2 Tr'} \right) - \frac{\Delta t}{2 Tr'} b_r PGV_o = 0 \quad (B.16)$$

B.5 TURBINAS TÉRMICAS

Para o modelo de turbina térmica implementado (Fig. 3.11 e eq. (3.52) à (3.56)) tem-se o seguinte sistema de equações algébricas, obtidas à partir da aplicação da regra trapezoidal às equações diferenciais descritivas do modelo:

$$P_{HPi} \left(1 + \frac{\Delta t}{2 Tch} \right) - \frac{\Delta t}{2 Tch} PGV_i + P_{HPo} \left(-1 + \frac{\Delta t}{2 Tch} \right) - \frac{\Delta t}{2 Tch} PGV_o = 0 \quad (B.17)$$

$$P_{IRi} \left(1 + \frac{\Delta t}{2 Trh} \right) - \frac{\Delta t}{2 Trh} P_{HPi} + P_{IPo} \left(-1 + \frac{\Delta t}{2 Trh} \right) - \frac{\Delta t}{2 Trh} P_{HPo} = 0 \quad (B.18)$$

$$P_{LPi} \left(1 + \frac{\Delta t}{2 Tco} \right) - \frac{\Delta t}{2 Tco} P_{IRi} + P_{LPo} \left(-1 + \frac{\Delta t}{2 Tco} \right) - \frac{\Delta t}{2 Tco} P_{IPo} = 0 \quad (B.19)$$

$$P_m = P_{HP} F_{HP} + P_{IP} F_{IP} + P_{LP} F_{LP} = 0 \quad (B.20)$$

As equações (B.17), (B.18) e (B.19) são solucionadas iterativamente no sistema $F(Y) = 0$ e a equação (B.20) é solucionada internamente em um método da classe "turbina_termica".

B.6 CALDEIRAS

A algebrização da equação diferencial do modelo de caldeira descrito no capítulo 3 (eq. (3.61)) resulta na expressão seguinte:

$$PD_1 - \frac{\Delta t}{2 C_b} S f_1 + \frac{\Delta t}{2 C_b} \Delta p_{hp1} - PD_0 - \frac{\Delta t}{2 C_b} S f_0 + \frac{\Delta t}{2 C_b} \Delta p_{hp0} = 0 \quad (B.21)$$

Esta expressão (B.21) é incluída no sistema $F(Y) = 0$ e as demais equações algébricas do modelo (eq. (3.62) e (3.63)) são solucionadas internamente na classe "caldeira".

A equação algebrizada para o estágio de alta pressão da turbina térmica, modificada pela inclusão do sinal da caldeira, será:

$$P_{HP1} \left(1 + \frac{\Delta t}{2T_{ch}} \right) - \frac{\Delta t}{2T_{ch}} P_{GV1} + \frac{\Delta t}{2T_{ch}} K_1 \Delta PD_1 + \\ + P_{HP0} \left(-1 + \frac{\Delta t}{2T_{ch}} \right) - \frac{\Delta t}{2T_{ch}} P_{GV0} + \frac{\Delta t}{2T_{ch}} K_1 \Delta PD_0 = 0 \quad (B.22)$$

Para o sistema de controle da caldeira (eq. (3.65)) foi adotado o método de Euler por indicação de [Rafian, 87].

As funções de transferência para o modelo de sistema de controle são:

$$\frac{\Delta PR}{\Delta PT} = K_1$$

$$\frac{\Delta BC}{\Delta PR} = \frac{1+s T_b}{s}$$

$$\frac{\Delta CD}{\Delta BC} = \frac{1+s T_a}{1+s T_a}$$

$$\frac{\Delta FD}{\Delta CD} = e^{-s T_D}$$

$$\frac{\Delta SF}{\Delta FD} = \frac{1}{1+s T_v}$$

Para a função de transferência $\Delta BC/\Delta PR$ pode-se utilizar a seguinte equivalência:

$$\frac{\Delta BC}{\Delta PR} = \frac{X}{\Delta PR} + \frac{Y}{\Delta PR}$$

sendo X e Y variáveis intermediárias e $\Delta BC = X + Y$. Pode-se então escrever:

$$\frac{X}{\Delta PR} = \frac{1}{s}$$

ou

$$\frac{dX}{dt} = \Delta PR$$

e

$$\frac{Y}{\Delta PR} = T_b$$

Igualmente, a expressão para $\frac{\Delta CD}{\Delta BC} = \frac{1+s T_a}{1+s T_a}$ é substituída por

$$\frac{\Delta CD}{\Delta BC} = \frac{Z}{\Delta BC} + \frac{W}{\Delta BC}$$

sendo Z e W variáveis intermediárias, com $\Delta CD = Z + W$. Tem-se então:

$$\frac{Z}{\Delta BC} = \frac{-9}{1+s T_a}$$

ou

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{-9 \Delta BC - Z}{T_a}$$

e

$$\frac{H}{\Delta BC} = 10$$

Com a aplicação da regra de Euler às equações acima obtêm-se o seguinte sistema de equações algébricas para representação do sistema de controle da caldeira:

$$\Delta PR_1 = K_1 \Delta TP_0$$

$$X_1 = X_0 + \Delta t \Delta PR_0$$

$$Y_1 = T_b \Delta PR_0$$

$$\Delta BC_1 = X_1 + Y_1$$

$$Z_1 = Z_0 + \frac{\Delta t}{T_a} (-9 \Delta BC_0 - Z_0)$$

$$W_1 = 10 \Delta BC_0$$

$$\Delta CD_1 = Z_1 + W_1$$

$$\Delta FD_1 = \Delta CD_1 - TD$$

$$\Delta SF_1 = \Delta SF_0 + \frac{\Delta t}{Tva} (-\Delta FD_0 - \Delta SF_0)$$