



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

GABRIEL JOSÉ ALVES DOS SANTOS

**SIMULADOR INTERATIVO DA ESTABILIDADE DE USINAS
TERMELÉTRICAS DE CICLO COMBINADO PARA PROJETO,
PESQUISA E TREINAMENTO**

**FORTALEZA
2012**

GABRIEL JOSÉ ALVES DOS SANTOS

**SIMULADOR INTERATIVO DA ESTABILIDADE DE USINAS
TERMELÉTRICAS DE CICLO COMBINADO PARA PROJETO,
PESQUISA E TREINAMENTO**

Dissertação submetida à
Coordenação do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Federal do Ceará
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Almeida
do Nascimento

Coordenador do Curso: Fernando
Luiz Marcelo Antunes

**FORTALEZA
2012**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências Tecnologia

- S237s Santos, Gabriel José Alves dos.
Simulador interativo da estabilidade de usinas termelétricas de ciclo combinado para projeto,
pesquisa e treinamento / Gabriel José Alves dos Santos, 2012.
114 f. ; il. color. enc.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2012.
Área de Concentração: Sistema Elétrico de Potência
Orientação: Prof. Dr. José Almeida Nascimento
- 1 . Usina termelétrica - Brasil 2. Sistema de potência I. Título

CDD 621.312430981

GABRIEL JOSÉ ALVES DOS SANTOS

**SIMULADOR INTERATIVO DA ESTABILIDADE DE USINAS
TERMELÉTRICAS DE CICLO COMBINADO PARA PROJETO,
PESQUISA E TREINAMENTO**

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Almeida do Nascimento

Coordenador do Curso: Fernando Luiz Marcelo Antunes

Aprovada em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Almeida do Nascimento (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Carlos Teles Campos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profª. Dra. Gabriela Helena Sérgio Bauab Shiguemoto
Examinadora Externa ao Programa

*Dedico este trabalho aos meus pais:
Emerson Santos (em memória) e Maria
Ernestina que muito contribuíram de forma
direta e indiretamente para a elaboração e
execução desta dissertação.*

A todos da minha família.

*Aos professores, colegas e funcionários da
UFC.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, pela saúde, pela sabedoria, discernimento e pela oportunidade de realizar este trabalho;

Agradeço aos meus familiares, em especial, minha mãe Maia Ernestina e meus irmãos, Emerson Junior e Vanessa, que sempre me apoiaram e incentivaram a continuar, todas as vezes que demonstrei certo desânimo frente aos obstáculos que surgiram durante esta longa caminhada;

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Almeida do Nascimento, pelo seu incentivo na realização deste trabalho, pela paciência, compreensão e direcionamento. A você minha admiração e agradecimentos;

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) que contribuiu com o apoio financeiro necessário à realização desse trabalho e desenvolvimento científico;

À Laryssa e Maria Fernanda pelo amor, carinho e motivação em todos os momentos;

Aos companheiros de trabalho, que fazem parte de um grupo bastante unido e responsável, respeitando o limite e a capacidade de cada um, nas pessoas de José Sergio Aguiar, Carlos Eduardo, Alexandre Valério e Bruno Viana;

Aos professores da UFC Arthur Plínio, José Carlos Teles, Otacílio Mota, Laurinda Reis, Bismark Torrico, Fernando Antunes e Almeida pelos ensinamentos, que durante o curso, e que de forma valiosa contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho;

E aos professores do Centro de Ciências Tecnológicas da UNIFOR, pelos ensinamentos durante a graduação no curso de Engenharia de Elétrica;

Espero que os leitores deste trabalho possam aproveitar ao máximo as informações nele apresentadas, já que foi feito com muita dedicação.

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido o estudo e as aplicações das condições de estabilidade na operação do sistema elétrico de potência incorporado em um simulador interativo de usinas termelétricas de ciclo combinado, que permita melhorar os processos de treinamento e, conseqüentemente, o nível de qualidade dos futuros operadores e mantenedores de usinas termelétricas, bem como manter atualizados os atuais operadores. Um pequeno conjunto de definições e conceitos das áreas de “estabilidade, confiabilidade e análise de desempenho de sistemas de potência” é apresentado com o objetivo de distinguir a operação no sistema de potência. O simulador contempla a modelagem matemática de 3ª e 6ª ordem das partes físicas e elétricas da máquina síncrona, a modelagem de seus controladores projetados como compensador dinâmico e métodos numéricos para a resolução da equação diferenciais. O cálculo dos parâmetros é realizado através de um programa desenvolvido com a ferramenta computacional MATLAB e comparados aos implementados em uma UTCC. As simulações e validação de variações dos modelos são realizadas com os programas ANATEM - CEPEL para analisar a eficiência do sistema projetado e avaliar a melhoria do desempenho dinâmico do sistema.

Palavras-chave: Simulador Interativo da Estabilidade de Usinas Termelétricas de Ciclo Combinado. Estabilidade de Sistema de Potência. Operação do Sistema de Potência.

ABSTRACT

This work was developed the study and application of conditions of stability in the operation of power system embedded in an interactive simulation of combined cycle power plants that will improve the training processes and therefore the quality of the future operators and maintainers of thermoelectric plants and keep up the current operators. A small set of definitions and concepts in the areas of "stability, reliability and performance analysis of power systems" is presented in order to distinguish the operation in the power system. The simulation includes the modeling of the 6th order of the parts of the physical and electrical synchronous machine, the modeling of its Controlled designed as dynamic and rewarding numerical methods for solving differential equation. The calculation of the parameters is accomplished through a program developed with MATLAB software tool and compared to those implemented at the plant. The simulations and validation of variations of the model are performed with the programs ANATEM - CEPEL to analyze the efficiency of the system designed to evaluate and improve the dynamic performance of the system.

Keywords: Simulator Interactive Fired Power Plant Combined Cycle. Power System Stability. Power System Operation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de Gás Natural 2011.....	366
Figura 2 – Representação esquemática da termelétrica em estudo.....	388
Figura 3 – Diagrama de blocos das malhas de controle de um sistema de potência.....	40
Figura 4 – Diagrama esquemático dos enrolamentos de uma máquina síncrona.....	444
Figura 5 – Simulador de Treinamento simulador de treinamento de UTCC.	655
Figura 6 – Diagrama fasorial da máquina síncrona em regime permanente.....	677
Figura 7 – Representação gráfica de um e de vários passos da integração numérica.	70
Figura 8 – Representação gráfica do método de Euler modificado	711
Figura 9 – Sistema de referência para medição da posição do rotor.	744
Figura 10 – Potência elétrica traçada como função de δ , com $P_e > P_m$ em δ_{max} , sistema estável.....	788
Figura 11 – Potência elétrica traçada como função de δ , com $P_e < P_m$ em δ_{max} , sistema instável	799
Figura 12 – Curva $P_e \times \delta$ (ângulo crítico para extinção de defeito).....	80
Figura 13 – Modelo do PSS em série com o sinal de velocidade.....	833
Figura 14 – Diagrama de blocos da equação de oscilação eletromecânica.	844
Figura 15 – Diagrama de blocos de gerador síncrono eixo direto.....	844
Figura 16 – Bloco do ganho.	855
Figura 17 – Bloco da soma.....	855
Figura 18 – Bloco export.....	866
Figura 19 – Bloco import.	877
Figura 20 – Bloco washout.....	877
Figura 21 – Bloco ledlag.....	888
Figura 22 – Bloco limita	899
Figura 23 – PSS criado através de blocos do CDU.	90
Figura 24 – Funcionamento Básico Algoritmo Genético.....	933
Figura 25 – Funcionamento Básico Algoritmo Genético.....	966
Figura 26 – Ajuste do Controlador PID através do AG.....	966
Figura 27 – Janela inicial do programa desenvolvido.	988
Figura 28 – Janela correspondente ao Exemplo 1 do programa desenvolvido.	999
Figura 29 – Gráfico correspondente a um exemplo de análise da equação de oscilação.....	100
Figura 30 – Curva $P_e \times \delta$ (ângulo crítico para extinção de um defeito.	1011
Figura 31 – Diagrama de blocos da simulação computacional do simulador.	1022
Figura 32 – Representação do sistema que interliga máquina a barra infinita.	1044
Figura 33 – Gráfico da análise do Critérios das áreas iguais no Caso 1 utilizando método de Euler Modificado.....	1055
Figura 34 – Gráfico da análise da equação de oscilação para o Caso 1 utilizando o método de Euler Modificado.....	1066
Figura 35 – Representação do sistema que interliga CGTF.	1077
Figura 36 – Representação do sistema modelado.	1077

Figura 37 – Curto circuito nos terminais do gerador, solução até 5.0s.....	1099
Figura 38 – Diagrama de Bode do sistema compensado.	110
Figura 39 – Resposta degrau ao sinal de controle para o sistema compensado com o controlador PID ajuste Ziegler-Nichols (linha vermelha) e sistema a resposta degrau com controlador PID ajuste pelo algoritmo genético (linha azul).	1111
Figura 40 – Potência elétrica na barra infinita.	1122
Figura 41 – Fluxo de Carga do sistema de 6 Barra.	1133
Figura 42 – Gráfico simulação Matlab.	1155
Figura 43 – Gráfico simulação ANATEM.....	1166

TABELAS

Tabela 1 – Reservas de gás natural por região de produção em bilhões de m ³	355
Tabela 2 – Empreendimentos em Operação.	422
Tabela 3 – Algoritmos Genéticos e o Sistema Natural.	922
Tabela 4 – Dados do sistema e Gerador.....	966
Tabela 5 – Constantes e ganhos da função de transferência.....	977
Tabela 6 – Dados de gerador na base da máquina.	1088
Tabela 7 – Resultado do fluxo de carga.....	1088
Tabela 8 – Dados de gerador na base da máquina.	1133
Tabela 9 – Dados do sistema de excitação.	1133
Tabela 10 – Resultado do fluxo de carga.....	1144
Tabela 11 – Parametros do PSS.	1144

ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS

ANAREDE	Programa de Análise de Redes
ANATEM	Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CCPE	Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos
CCPP	Combined Cycle Power Plant
CDU	Controlador Definido pelo Usuário
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CGTF	Central Geradora Térmica Fortaleza
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
EOL	Central Geradora Eólica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GN	Gás Natural
MAE	Mercado Atacadista de Energia
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PSS	Power System Stabilizer
RAT	Regulador Automático de Tensão
SEB	Setor Elétrico Brasileiro
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia
UTE	Usina Termelétrica de Energia
UTN	Usina Termonuclear

SÍMBOLOS DE UNIDADES DE GRANDEZAS FÍSICAS

Símbolo	Significado
Ω	Ohm
A	Ampère
Hz	Hertz
rad	Radiano
s	Segundo
V	Volt
W	Watt
mm	Milímetro
N	Newton
m	Metro

SIMBOLOGIA

E_{fd}	Tensão de excitação
E_I	Tensão proporcional à corrente de campo
E_{lkq}	Tensão proporcional à corrente do enrolamento amortecedor no eixo em quadratura
e'_d	Tensão interna atrás da reatância transitória no eixo direto
e'_q	Tensão interna atrás da reatância transitória no eixo em quadratura
e''_d	Tensão interna atrás da reatância subtransitória no eixo direto
e''_q	Tensão interna atrás da reatância subtransitória no eixo em quadratura
f	Frequência
f_{osc}	Frequência de corte
H	Constante de inércia
i_{abc}	Corrente de fase na armadura
J	Momento de inércia
K_e	Ganho estático do regulador de tensão
L_{al}	Indutância de dispersão da armadura
$L_{ij} = M_i$	Indutância própria ou mútua
L_m	Indutância de magnetização
L_s	Indutância do estator
M_s	Parte constante da indutância mútua
P	Número de pólos
P_e	Potência elétrica
P_i	Potência ativa
Q_i	Potência reativa
$R_{a,b,c}$	Resistência de fase da armadura
R_e	Resistência no enrolamento amortecedor
R_{fd}	Resistência de campo

R_{kd}	Resistência do enrolamento amortecedor no eixo direto
R_{kq}	Resistência do enrolamento amortecedor no eixo em quadratura
T_e	Constante de tempo do regulador de tensão
T_{el}	Torque elétrico
T_l	Torque líquido
T_m	Torque mecânico
T'_{d0}	Constante de tempo transitória de eixo direto com estator em circuito aberto
T'_{q0}	Constante de tempo transitória de eixo em quadratura com estator em circuito aberto
T_q	Constante de tempo do filtro passa-alta
T''_{d0}	Constante de tempo subtransitória de eixo direto com estator em circuito aberto
T''_{q0}	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura com estator em circuito aberto
$T_{1,2,3,4}$	Constantes de tempo controlador avanço-atraso de fase
$v_{a,b,c}$	Tensões de fase na armadura
v_{fd}	Tensão no enrolamento de campo
V_∞	Tensão barra infinita
V_{ST}	Tensão da saída do estabilizador
$V_{ST\min}$	Tensão de referência mínima do estabilizador
$V_{ST\max}$	Tensão de referência máxima do estabilizador
x_{ad}	Reatância mútua no eixo direto
x_{aq}	Reatância mútua no eixo em quadratura
x_a	Reatância da armadura
x_d	Reatância síncrona de eixo direto
x_e	Reatância própria do circuito do ferro do rotor
x_{eq}	Reatância equivalente
x_{fd}	Reatância própria do campo principal

x_{kd}	Reatância própria do enrolamento amortecedor do eixo direto
x_{kq}	Reatância própria do enrolamento amortecedor do eixo em quadratura
x_l	Reatância de dispersão
x'_d	Reatância transitória de eixo direto
x_q	Reatância síncrona de eixo em quadratura
x'_q	Reatância transitória de eixo em quadratura
x''_d	Reatância subtransitória no eixo direto
x''_q	Reatância subtransitória no eixo em quadratura
δ	Ângulo de torque
θ_e	Ângulo elétrico
θ_m	Ângulo mecânico
θ_t	Ângulo da tensão terminal da máquina
φ_i	Fluxo concatenado nos enrolamentos
ω	Velocidade angular
ω_{osc}	Velocidade angular correspondente à frequência de corte
ω_0	Velocidade nominal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	188
1.1	Geração de energia em ciclo combinado a gás.....	188
1.2	Operação do setor elétrico no Brasil.....	19
1.3	Revisão Bibliográfica	22
1.3.1	Usinas termelétricas de ciclo combinado.....	22
1.3.2	O setor elétrico brasileiro e sua operação	22
1.3.3	A estabilidade de sistema de potência.....	23
1.3.4	Modelagem dinâmica das usinas termelétricas de ciclo combinado.....	23
1.4	Justificativa e motivação.....	25
1.5	Objetivo	26
1.5.1	Objetivo geral	26
1.5.2	Objetivos específicos.....	26
1.6	Contribuições	27
1.7	Desenvolvimento da dissertação.....	27
2	ESTABILIDADE DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	28
2.1	Introdução ao estudo de estabilidade do sistema de potência.....	28
2.2	Estudo de estabilidade angular do rotor	30
2.3	Estudo de estabilidade de tensão.....	30
2.4	Estudo de estabilidade de frequência	31
3	GERAÇÃO TÉRMICA A GÁS E CICLO COMBINADO.....	32
3.1	Geração de usinas termica a gás	32
3.1.1	Gás natural.....	34
3.1.1.1	Usos	34
3.1.1.2	Produção.....	34
3.1.1.3	Reservas brasileiras de gás natural	35
3.1.2	Componentes da usina	36
3.2	O processo de produção de energia da UTCC.....	37
3.2.1	Vantagens e desvantagens das termelétricas de ciclo combinado.....	40
3.2.1.1	Vantagens.....	40
3.2.1.2	Desvantagens.....	41
4	MÁQUINAS SÍNCRONAS PARA SIMULAÇÃO DINÂMICA UTILIZANDO MODELO DE 6ª ORDEM.....	41

4.1	Modelo matemático para simulação dinâmica de máquina síncrona	42
4.1.1	Modelo matemático da parte elétrica da máquina síncrona	44
4.1.1.1	Valores das indutâncias como função do rotor e indutâncias mutuas.	46
4.1.1.2	Equações partes elétricas definidas por eixo	49
4.1.1.3	Equações das partes elétricas definidas por eixo em sistema (p.u.).....	50
4.1.1.4	Equações que descrevem o comportamento dinâmico das máquinas síncronas expressas em por unidade (Parte Elétrica)	52
4.1.1.5	Modelo para simulação dinâmica da máquina síncrona em função de reatâncias e constantes de tempo.	54
4.1.1.6	Equação para a variação do fluxo no campo principal da máquina	54
4.1.1.7	Equação expressão para a tensão proporcional à corrente de campo E_f	56
4.1.1.8	Equação para a variação do fluxo no circuito do ferro no eixo quadratura	59
4.1.1.9	Equação para a variação do fluxo no enrolamento amortecedor do eixo em quadratura	61
4.1.1.10	Expressões para as componentes da tensão interna e'' :.....	61
4.1.1.11	Expressão para a tensão proporcional à corrente do circuito do ferro no eixo em quadratura.....	62
4.2	Modelo de 6ª ordem utilizado para simulação dinâmica da máquina.....	62
5	SIMULADOR INTERATIVO DA ESTABILIDADE	63
5.1	Simulador de treinamento de UTCC.....	64
5.2	Características do simulador.....	66
5.3	Simulação dinâmica do gerador ligado à rede de transmissão	66
5.3.1	Métodos numéricos das equações diferenciais para simulação dinâmica da máquina	68
5.3.1.1	Método de euler	69
5.3.1.2	Método de euler modificado	70
5.3.1.3	Método de Runge-Kutta	71
5.3.1.4	Comparação dos métodos	72
5.4	Análise pela equação de oscilação da máquina síncrona.....	73
5.5	Análise pelo critério de igualdade de área	76
5.5.1	Condição de estabilidade através das áreas	77
5.5.2	Cálculo do ângulo crítico de extinção de faltas através das áreas	79
5.5.3	Cálculo de tempo crítico de extinção de faltas através das áreas	80

5.6	Análise no projeto do Power System Stabilizers (PSS).....	82
5.7	Implementação do estabilizador de sistema de potência no ANATEM.....	83
5.7.1	CDU – Controlador Definido pelo Usuário.....	84
5.8	Implantação de controlador PID e algoritmo genético na planta da UTCC	91
5.8.1	Descrição algoritmos genéticos.....	92
5.8.2	Representação	93
5.8.3	Inicialização da população.....	94
5.8.4	Função de avaliação	94
5.8.5	Seleção	94
5.8.6	Operadores genéticos	94
5.8.7	Parâmetros do algoritmo genético	95
5.8.8	Modelagem da máquina síncrona de seus controladores	95
5.9	Desenvolvimento e aplicação do Simulador.....	97
6	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E RESULTADOS EXPERIMENTAIS ..	103
6.1	Análise de resultados.....	103
6.1.1	Caso 1.....	103
6.1.2	Caso 2.....	106
6.1.2.1	Análise pela equação de oscilação.....	109
6.1.2.2	Projeto do sinal estabilizador (PSS).....	110
6.1.2.3	Simulação controlador PID e Algoritmo Genético.....	111
6.1.2.4	Simulação ANATEM	112
6.1.3	Caso 3.....	112
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	116
7.1	Conclusões.....	116
7.2	Sugestão para trabalhos futuros	117
	REFERÊNCIAS	118
	APÊNDICE A	12222

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, apresenta-se a geração de energia elétrica a gás natural, a operação do sistema elétrico brasileiro, contextualizando as condições de estabilidade do Sistema Elétrico de Potência na operação com usinas termelétricas de ciclo combinado, destacando a revisão bibliográfica do assunto com a apresentação da motivação, dos objetivos e do desenvolvimento desta dissertação.

1.1 Geração de energia em ciclo combinado a gás

Os relevantes custos financeiros, ecológicos e sociais decorrentes da construção de grandes hidrelétricas e longas linhas de transmissão têm estimulado a geração distribuída de energia elétrica, com usinas localizadas junto aos consumidores. Além desses fatores, há uma pressão governamental e pública para a diversificação da matriz energética nacional, atualmente centralizada na geração hidráulica.

A geração de energia elétrica a partir de gás natural (GN) passou a ser parte importante da matriz energética nacional. Cabe destacar que o GN é um combustível caro, porém, sua utilização em sistemas com alta eficiência térmica, característica típica das modernas instalações de ciclo combinado, é inteiramente justificada.

Neste contexto, as Usinas Termelétricas de Ciclo Combinado (UTCC), surgem como uma alternativa para os grandes centros urbanos, vez que possuem associadas à mesma planta, turbinas a gás natural e a vapor gerando energia elétrica com maior eficiência.

Uma usina termelétrica operando em ciclo combinado pode ser definida como um conjunto de obras e equipamentos cuja finalidade é a geração de energia elétrica, através de um processo que combina a operação de uma turbina a gás, movida pela queima de GN ou outros combustíveis (termelétrica convencional), diretamente acoplada a um gerador, onde posteriormente os gases de escape da turbina a gás, devido à temperatura, promovem a transformação da água em vapor para o acionamento de uma turbina a vapor, nas mesmas condições descritas no processo de operação de uma termelétrica convencional. A potência média dessas centrais vem a ser de 300 MW, muito inferior à de uma termelétrica convencional (AMBIENTE ENERGIA, 2010).

As usinas termelétricas estão situadas próximas aos centros de carga, permitindo a redução de carregamentos no sistema de transmissão, melhor controle do perfil de tensão,

redução de perdas na transmissão e uma melhoria da estabilidade de tensão. Nas UTCC as massas das partes girantes da turbina, do eixo e do gerador possuem pequena inércia, armazenando pouca energia cinética, utilizada para o amortecimento de oscilações eletromagnéticas resultantes do desequilíbrio entre a carga e geração.

Para melhorar o desempenho dinâmico do sistema são utilizados os reguladores de velocidade das turbinas, os reguladores de tensão dos geradores e os estabilizadores de sistema de potência. A estabilidade do Sistema Elétrico de Potência (SEP) é alcançada quando todas as máquinas síncronas interligadas estão funcionando em sincronismo, isto é, operando em paralelo com a mesma frequência. A perda de estabilidade pode ocorrer pelo desequilíbrio entre a geração e a carga, causada por falhas nos geradores, linhas, transformadores ou variações bruscas na demanda. Entretanto, as tecnologias utilizadas exigem constantes análises, pesquisas e treinamentos de operadores e mantenedores das UTCC.

1.2 Operação do setor elétrico no Brasil

O Setor Elétrico Brasileiro (SEB) tem o seu marco inicial em meados de 1879, quando foi inaugurada a iluminação elétrica na estação central da ferrovia Dom Pedro II (Central do Brasil), no Rio de Janeiro, cuja fonte de energia era um dínamo. Em 1881, instala-se a primeira iluminação pública ainda alimentada por dínamos. Já em 1883 o Brasil inaugurava a sua primeira central geradora termelétrica com 52 kW de capacidade, movida a lenha, que alimentava 39 lâmpadas na cidade de Campos/RJ, inaugurando a prestação do serviço público de iluminação na América do Sul. A preferência pelo modelo hidrelétrico também é antiga: a primeira hidrelétrica brasileira também foi construída em 1883, em Diamantina/MG (NEOENERGIA, 2011).

Ao longo dos anos 40, seguindo a tendência de outros setores estratégicos, o Estado amplia seu papel e passa a atuar diretamente na produção. O primeiro investimento nesse sentido foi à criação da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) em 1945. Décadas mais tarde, o governo promoveria importantes mudanças na legislação tarifária brasileira. Uma lei de 1971 (5.655/71) estabeleceu a garantia de 10% a 12% de retorno sobre o capital investido a ser computada na tarifa. A medida visava dar sustentação financeira ao setor e serviu também para financiar sua expansão. Havia, ainda, a facilidade de obtenção de recursos junto à Eletrobrás e a entrada de empréstimos externos. Foi um período em que o setor desenvolveu sólidas bases financeiras (NEOENERGIA, 2011).

A década de 90 foi um período de mudanças profundas. O primeiro passo foi dado em 1993 com a extinção da equalização tarifária e a criação dos contratos de suprimento entre geradores e distribuidores, começando a se preparar o mercado para a desestatização. Depois, vieram as licitações para novos empreendimentos de geração; a criação da figura do produtor independente de energia e a determinação do livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição, juntamente com a liberdade para os grandes consumidores escolherem onde adquirir seus suprimentos de energia.

Desde então o SEB vem passando por profundas transformações institucionais ao longo dos últimos dezesseis anos, no primeiro momento, entre 1995 e 2002, sob o governo Fernando Henrique Cardoso, o horizonte que orientou as mudanças foi justamente a perspectiva de privatizar o SEB e permitir que sua expansão fosse orientada basicamente pelos sinais de mercado com relação à demanda futura de energia elétrica. A reformulação do setor elétrico iniciou-se com a Lei 8.987 de 14 de fevereiro de 1995, conhecida como a Lei de Concessões dos Serviços Públicos, e com a Lei 9.074 de 19 de maio de 1995, a partir das quais foram estabelecidas as bases para um novo modelo institucional do setor elétrico. Simultaneamente, foram empreendidas a reestruturação organizacional e de propriedade do setor, esta através da privatização de empresas e da atração dos capitais privados para assegurar a sua expansão.

Em 1996, além do Decreto 2003, que regulou a atuação dos Produtores Independentes e Autoprodutores, foi criada, pela Lei 9.427, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com o objetivo de regulamentar e fiscalizar a produção, a transmissão, a distribuição e a comercialização de energia elétrica (ONS, 2011).

Em 1997 e 1998, novas regulamentações foram feitas destacando-se a Lei 9.648/98 que instituiu o Mercado Atacadista de Energia (MAE) e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), autorizando o Poder Executivo a promover a reestruturação da Eletrobrás e suas subsidiárias e estabelecendo a transição de modelos, com a assinatura dos contratos iniciais. Nesta lei foi prevista a segmentação setorial e definida a progressiva abertura à competição dos mercados, a partir de 2003 (ONS, 2011).

Ainda em 1998, foi criado o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) que tem por objetivos: promover o aproveitamento racional de energia; a proteção ao consumidor em termos de preços; qualidade e oferta de produtos; a proteção ao Meio Ambiente; o incremento do uso do GN; a utilização de fontes renováveis de energia; a

promoção da livre concorrência; a ampliação da competitividade e a atração de capitais para a produção de energia. Já no ano de 1999, foi criado o Comitê Coordenador do Planejamento da expansão dos Sistemas Elétricos (CCPE), entidade responsável pelo planejamento da expansão do sistema elétrico (ONS, 2011).

No segundo momento, iniciado em 2003, sob o governo Luiz Inácio Lula da Silva, novas mudanças institucionais foram introduzidas, desta vez tendo como norte a retomada do papel do estado no planejamento da expansão do setor e na organização do mercado de contratação de energia. Criaram-se a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) em substituição ao Mercado Atacadista de Energia (MAE), e foram instituídos os leilões de comercialização de energia de longo prazo. Vale destacar, por oportuno, que as concessionárias de energia elétrica estatais remanescentes, foram retiradas do Plano Nacional de Desestatização, passando o governo a subsidiar o seu desenvolvimento e expansão.

Na operação do sistema elétrico atual, enquadram-se os projetos destinados ao desenvolvimento de metodologias, técnicas e ferramentas de auxílio à operação de sistemas elétricos, incluindo os segmentos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, no âmbito do SIN ou dos sistemas isolados.

Nos dias atuais, no segmento de geração, as usinas precisam garantir a oferta de energia com o custo otimizado, neste sentido é importante o desenvolvimento de projetos voltados a assuntos como a otimização do despacho hidrotérmico e a redução da indisponibilidade de usinas térmicas.

No que concerne ao segmento de transmissão, a rede tem importante papel na garantia da qualidade e confiabilidade do suprimento de energia, bem como nos seus preços finais. Assim, além do investimento em tecnologias de transmissão que permitam aumentar a capacidade de transporte e a confiabilidade do sistema, devem ser desenvolvidas metodologias de diagnóstico, preferencialmente em regime energizado, para identificar a confiabilidade do sistema em operação e avaliar o risco de falha de equipamentos, componentes e instalações de rede e técnicas de operação, manutenção e extensão da vida útil das instalações existentes.

Já no que é pertinente à distribuição, a regulação por comparação de desempenho vem forçando as empresas de energia elétrica a oferecerem qualidade crescente nos serviços prestados, trabalhando sempre no sentido de reduzirem seus custos, aumentando, dessa forma, sua competitividade.

1.3 Revisão Bibliográfica

1.3.1 Usinas termelétricas de ciclo combinado

Até a segunda metade do século XX, a geração térmica de energia elétrica era propiciada por turbinas a vapor. Os estudos dos fundamentos termodinâmicos e a eficiência da utilização de ciclos combinados de gás (ciclo de Brayton) e vapor (ciclo de Rankine) eram conhecidos, no entanto, não havia tecnologia que permitisse o seu desenvolvimento.

As primeiras usinas termelétricas de ciclo combinado foram construídas, em 1970, nos Estados Unidos (General Electric), Alemanha (Asea Brown Boveri) e na União Soviética. O primeiro encontro internacional para discutir as centrais termelétricas de ciclo combinado foi o IEE Colloquium on Control Systems for Combined Cycle Gas Turbines, que ocorreu em Londres, em 1991. Os principais tópicos discutidos foram: as usinas de ciclo combinado com a turbina a gás, aspectos comerciais, sistemas de controle, transmissão de dados e experiência operacional.

Kehlhofer (1999) apresenta os conceitos, princípios da termodinâmica, aplicação, componentes, operação, controle, automação, considerações ambientais e exemplos de usinas termelétricas a ciclo combinado e Boyce (2002), atualizado em 2004, em seu livro apresenta todos os aspectos importantes do projeto, da operação e da manutenção de usinas. São apresentadas a otimização e a confiabilidade do ciclo combinado, os detalhes técnicos do tamanho e o layout da usina, a seleção de combustíveis, os tipos de controladores e as características de desempenho de todos os componentes importantes em uma co-geração ou usina de ciclo combinado, bem como a abordagem ao projeto, a fabricação, a instalação, a operação e a manutenção das térmicas de ciclo combinado.

1.3.2 O Setor elétrico brasileiro e sua operação

O Setor Elétrico e a Operação de Sistemas Elétrico de Potência (SEP) vêm passando por profundas transformações institucionais nos últimos anos com a criação da agência reguladora e controladora das diversas atividades no setor elétrico brasileiro, como ANEEL (1996), ONS (1996), CNPE (1998), CCPE (1999), EPE e CCEE (2003), vinculadas ao Ministério de Minas e Energia (MME).

1.3.3 A Estabilidade de sistema de potência

Os estudos dos problemas na estabilidade dos SEP tiveram início no trabalho pioneiro de Steinmetz (1920) com cálculos de circuitos de corrente alternada, histerese e fenômenos transitórios, que utilizava o modelo clássico da máquina síncrona. O modelo consiste em representá-la como uma fonte de tensão em série com uma reatância.

R.H. Park (1929) estabeleceu um método generalizado de análise do alternador síncrono trifásico permitindo o estudo da máquina em regime permanente e transitório. Nas três décadas seguintes não houve grandes avanços nestes estudos, já Heffron e Phillips (1952) apresentaram a análise da estabilidade dinâmica de um SEP constituído de um gerador, com regulador automático de tensão, conectado a uma barra infinita. O sistema foi representado através de um modelo linearizado por eles idealizado. Este trabalho mostrou o aumento de estabilidade transitória obtido pela presença do regulador automático de tensão.

DeMello, Concordia (1969) e Laskowski (1975), usando o modelo Heffron-Phillips, apresentaram o mecanismo pelo qual o regulador automático de tensão prejudica o amortecimento inerente das máquinas síncronas podendo ocorrer instabilidades em oscilações subsequentes à primeira. Propuseram a criação de um laço de realimentação da velocidade do gerador e adicionaram-no à malha do regulador automático de tensão, através de um compensador denominado estabilizador de sistemas de potência, para aumentar o amortecimento das oscilações eletromecânicas do sistema através da excitação do gerador.

Anderson e Fouad (1994) apresentaram a versão mais consagrada na indústria do projeto do estabilizador de sistema de potência, que consiste em ajustes sequenciais, com a aplicação recorrente do modelo Heffron-Phillips-DeMello-Concordia e conceitos do controle clássico, a cada máquina isoladamente. Este método é conhecido como Projeto Convencional do Estabilizador. Outras versões do método são encontradas na literatura, tendo destacado-se Larsen e Swann (1981), Kundur (1993), Sauer e Pai (1998), Ong (1998), Chaturvedi (2004) e Awed-Badeeb (2006).

1.3.4 Modelagem dinâmica das usinas termelétricas de ciclo combinado

O uso crescente de usinas termelétricas de ciclo combinado na geração de energia elétrica traz a necessidade para a indústria da modelagem dinâmica dessas usinas. O Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies (1994), do IEEE System Dynamic Performance Subcommittee, formado por F. P. DeMello

(Presidente) e D. J. Ahner com contribuições de P. M. Anderson, J. H. Doudna, P. Kundur, L. M. Richardson, G. Tandy, C. W. Taylor e F. Van de Meulebroeke, estudou vários aspectos dos ciclos combinados compostos de turbinas a gás, estudou as caldeiras de recuperação e as turbinas a vapor. Também desenvolveu modelos projetados para simular a resposta da planta de ciclo combinado para ser utilizado em estudos dinâmicos do sistema.

Undrill, J. e Garmendia, A. (2001) mostraram que enquanto o tratamento dos geradores e elementos elétricos de uma usina de ciclo combinado em estudos de regime permanente é convencional, sua operação eletromecânica exige modelagem que é substancialmente diferente daquela usada para usinas hidrelétricas e termelétricas com caldeira a vapor. Foram revisadas as características de turbinas a gás e de caldeiras de recuperação de calor que definem o comportamento de plantas de ciclo combinado. Foram propostos modelos para representar estas características em estudos da dinâmica de sistemas de potência, junto com a descrição de como usar os modelos na análise de estabilidade.

Kunitomi, K. (2003) mostrou que a máxima produção de potência contínua de uma usina de ciclo combinado depende da frequência do sistema e a da temperatura ambiente. O controle de temperatura de uma turbina a gás limita a temperatura de exaustão dos gases, tanto reduzindo o fluxo de combustível como fazendo diminuições do fluxo de ar. No artigo, um modelo simples de uma usina de ciclo combinado é derivado de um modelo de projeto detalhado. O modelo é apropriado para simulação a longo prazo do desempenho dinâmico do sistema de potência operando em condições de frequência anormais.

Lora e Nascimento (2004) apresentaram o planejamento, o projeto e a operação, o suprimento energético, os fundamentos da geração, as caldeiras de vapor convencionais e de recuperação, as turbinas a vapor, as turbinas a gás, os equipamentos e dispositivos elétricos das usinas termelétricas. São apresentadas as centrais termelétricas a vapor, as centrais termelétricas de ciclo simples com turbinas a gás e de ciclo combinado, o controle, a operação e manutenção dessas usinas, a interligação das centrais termelétricas ao sistema elétrico e os exemplos de geração termelétrica no Brasil.

Kakimoto e Baba (2003) comprovaram que uma usina termelétrica de ciclo combinado, com uma turbina a gás e uma turbina a vapor, pode alcançar boa eficiência na geração de energia. Relatam que muitas usinas foram instaladas no mundo e que na Malásia, em 1996, usinas de ciclo combinado com turbinas a gás foram desligadas. Acreditaram que a causa deste desligamento foi uma oscilação na frequência do sistema. Os autores mostraram a importância de estudar o comportamento dinâmico das usinas de ciclo combinado. Vários modelos dinâmicos da planta de ciclo combinado foram propostos. Nessa análise, os autores

utilizaram alguns modelos existentes, como também construíram um modelo para uma usina termelétrica e executaram simulações numéricas para observar o comportamento do ciclo combinado diante das oscilações de frequência do sistema.

Lettas, (2005) analisa como um curto-circuito trifásico em uma linha de distribuição próxima a uma usina termelétrica de ciclo combinado com um eixo único influencia a operação do gerador elétrico. O estudo de cálculos dos transientes consistiu em especificar o período de tempo de extinção da falta em que o gerador permanece em sincronismo sem ocorrer deslizamento de pólo como consequência do curto-circuito trifásico na linha de distribuição. Além disso, as correntes do curto-circuito trifásico foram estimadas em diferente locais da rede.

Lalor (2005) mostra um modelo apropriado para estudar a resposta dinâmica de curto prazo de uma turbina a gás de ciclo combinado para uma variação de frequência do sistema. O modelo foi usado junto com um modelo de sistema de grande porte para estudar o impacto de níveis crescentes de geração de usinas termelétricas a ciclo combinado no controle da frequência do sistema de uma pequena ilha. O estudo considera apenas contingências simples. Uma conclusão dos resultados é que o aumento do número e capacidade das usinas termelétricas de ciclo combinado pode tornar o controle de frequência mais difícil. Os resultados indicaram que a adição de usinas termelétricas de ciclo combinado no sistema leva à possibilidade de ocorrência de grandes oscilações de frequência e os operadores do sistema de transmissão da ilha da Irlanda, precisaram revisar suas estratégias de controle da frequência para evitar futuramente o desligamento dos consumidores.

1.4 Justificativa e motivação

A pequena quantidade de pesquisas em estabilidade dinâmica das UTCC é decorrente da operação usual das usinas termelétricas que funcionam interligadas unicamente aos seus consumidores, através de linhas de distribuição, sem conexão com outras usinas.

No Brasil, as UTCC foram interligadas ao SIN, um dos maiores sistemas de potência do mundo, com predominância de grandes usinas hidrelétricas, transformadores de grande potência e longas linhas de transmissão de energia elétrica.

Na operação interligada, o estudo da dinâmica do funcionamento das UTCC é indispensável para uma operação segura. Entretanto, a falta de técnicas específicas para o estudo desse tipo de operação, tem levado à utilização de modelagens matemáticas, ferramentas computacionais e métodos de análise que não levam em conta as características

específicas do funcionamento, parâmetros e operação interligada destas usinas. A motivação principal desta pesquisa é a necessidade do desenvolvimento de ferramentas de análise e de técnicas de ajuste para estabilidade do SEP, tendo em vista a indisponibilidade de testes e ensaios em tempo real.

1.5 Objetivo

1.5.1 Objetivo geral

O objetivo desta pesquisa é desenvolver um novo simulador interativo incluindo as condições de estabilidade de um SEP da operação das UTCC, para serem incorporados e utilizados em processos de treinamento e pesquisas em projeto, avaliação dos esquemas térmicos de centrais termelétricas e sistemas de geração. Apresentando também, as principais restrições operativas destas centrais e seus efeitos no sistema elétrico, no qual o operador possa tomar as providências necessárias e corretas no menor espaço de tempo.

1.5.2 Objetivos específicos

- Melhorar taxas de disponibilidade, eficiência e segurança da central geradora diante de uma melhor formação da equipe de operação e manutenção;
- Conhecer em detalhes a lógica de controle do processo, e em que influenciam os principais componentes de operação;
- Criar um ambiente de aprendizagem com as seguintes características: flexibilidade, rapidez e componentes multimídia;
- Agilizar e otimizar a transferência de conhecimentos dentro do ambiente de trabalho;
- Estudar o funcionamento das usinas de geração térmica de ciclo combinado para modelar e programar computacionalmente os equipamentos de controle;
- Analisar de maneira coordenada e sistemática a operação no sistema de potência de UTCC interligadas ao sistema com geração predominantemente hidráulica.

1.6 Contribuições

As principais contribuições desta pesquisa são:

Proporcionar a preparação de operadores e mantenedores para a dificuldade da análise e verificação de contingências e dos defeitos na operação no sistema elétrico de Potência para termelétricas, em tempo real, havendo possibilidade de prever determinadas situações de funcionamento de um sistema e proceder à sua análise de estabilidade com eficiência;

A modelagem matemática da dinâmica completa para máquinas síncronas em uma UTCC;

Implementação do programa, ferramenta computacional para obter parâmetros que ajustassem com mais exatidão os controladores da UTCC estudada em tempo real;

Implementação da dinâmica do Controlador Definido pelo Usuário (CDU), linguagem proprietária do Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM).

1.7 Desenvolvimento da dissertação

O desenvolvimento desta dissertação está dividido em sete capítulos, incluindo este capítulo de introdução, onde se vislumbra a explanação de todo o desenvolvimento do SEB e sua operação, com destaque para a eficiência das UTCC, passando pela revisão bibliográfica do assunto, a motivação e os objetivos da presente pesquisa.

No capítulo 2, são apresentados alguns conceitos básicos e a visão geral de estabilidade no SEP; a caracterização dos tipos de estabilidade; os estudos da estabilidade angular, de tensão e de frequência; os principais fatores que podem causar a instabilidade e as melhorias na estabilidade.

No capítulo 3, apresentada a descrição da geração de energia elétrica a GN, com explanação do seu processo de produção de energia elétrica, descrição dos princípios básicos dos componentes da usina, o combustível que abastece a térmica, suas reservas, vantagens e desvantagens do uso do ciclo combinado de geração de energia.

O capítulo 4 trata da modelagem matemática para simulação dinâmica de máquinas síncrona e seu comportamento durante um transitório.

No capítulo 5, tem-se a apresentação de um simulador de treinamento da termelétrica em estudo, a descrição e metodologia adotada para simulação e a verificação dos resultados.

No capítulo 6, demonstram-se os resultados das simulações, verificando com casos e modelos desenvolvidos, incorporados no simulador.

Finalmente são apresentadas as conclusões, as sugestões para trabalhos futuros e as referencias bibliográficas consultadas.

2 ESTABILIDADE DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Neste capítulo será apresentado o conceito de estabilidade de sistemas elétricos de potência, com as três classes distintas de estabilidade: estabilidade angular do rotor, estabilidade de tensão e estabilidade de frequência, o comportamento das máquinas síncronas durante transitório, as características da perda de estabilidade, a representação do modelo das máquinas síncronas e os métodos numéricos das equações diferenciais para simulação dinâmica da máquina síncrona, destacando ainda a abordagem dos fatores que podem causar a instabilidade em sistemas potência e alternativas que possibilitam a melhoria da estabilidade.

2.1 Introdução ao estudo de estabilidade do sistema de potência

Com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país encontram-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados, principalmente, na região amazônica (ONS, 2011).

As grandezas dos sistemas de geração e transmissão interligados vêm sendo construídas e projetadas para atender a crescente demanda de energia elétrica na sociedade atual. Idealmente, as cargas devem ser constantemente alimentadas com tensões e frequência constantes, ou em termos práticos, dentro de certa tolerância tais que satisfaçam as exigências dos consumidores. Para que isto se verifique, a estabilidade dos sistemas de potências é imprescindível. A estabilidade de SEP pode ser definida como capacidade que os sistemas

possuem de se manter em equilíbrio sob condições normais de operação, ou de atingir um estado de equilíbrio após ser submetido a algum distúrbio.

Caso a perturbação não envolva qualquer mudança na configuração do sistema, as máquinas deverão retornar ao mesmo estado inicial de operação em um tempo finito após a eliminação da perturbação. Porém, se houver qualquer mudança na configuração do sistema, tais como: carga, geração, linhas de transmissão, etc., haverá um desbalanço entre geração e carga. Conseqüentemente, as máquinas deverão se estabelecer em um novo ponto de operação. Em qualquer caso, todas as máquinas síncronas interligadas deverão permanecer em sincronismo se o sistema é estável, isto é, operando em paralelo com a mesma velocidade.

Entre os distúrbios, aos quais um SEP pode ser submetido, nos estudos de estabilidade, podem-se destacar alguns tipos: um curto-circuito em um elemento importante (transformadores e linhas de transmissão no lado de alta tensão), saída de operação de grandes blocos de carga ou de geração, suave mudança no carregamento do sistema e variações de tensões nas máquinas. Com relação às perturbações, além do tipo, outras informações são importantes nos estudos de estabilidade. Por exemplo: sua localização, a coordenação global e local dos sistemas de controle e proteção, os esquemas especiais de emergências de alívio de carga, as flutuações de carga entre outros, bem como as influências dos elementos componentes do sistema de potência. Nestes estudos devem ser considerados os efeitos de equipamentos como geradores e seus dispositivos de controle e proteção, linhas de transmissão e seus elementos de compensação, proteção e controle, transformadores e seus respectivos controles de tap, cargas de tipos e características diversas, entre outros.

Sobre suas características a estabilidade do sistema de potência pode ser determinada a partir da análise de resposta em frequência. Através desta técnica de análise se obtém os efeitos dos parâmetros das máquinas e do sistema, dos ganhos dos reguladores de tensão e dos estabilizadores de sistemas de potência.

Com a dependência das configurações do sistema e das condições operativas, há diversas formas diferentes de se manifestar a instabilidade de sistema de potência, mantendo o sincronismo na operação das unidades geradoras, entre outras formas de manifestar, como por exemplo: um sistema composto por uma máquina síncrona que alimenta um motor de indução (carga) através de uma linha de transmissão. Neste caso a instabilidade se configura pelo colapso de tensão na carga.

Em estudos de estabilidade podem ser descritos três situações distintas, sendo estas de acordo com a severidade dos impactos considerados, o tempo de avaliação e as características dos elementos e processos envolvidos. As três situações de estabilidade são:

estabilidade angular do rotor, estabilidade de tensão e estabilidade de frequência. Cada uma destas tem características e peculiaridades próprias.

2.2 Estudo de estabilidade angular do rotor

No estudo de estabilidade angular do rotor avalia-se a capacidade do SEP interconectado com suas unidades geradoras, se mantendo operando em condições de sincronismo após algum distúrbio. Este problema de estabilidade envolve estudos das oscilações eletromecânicas inerentes ao sistema de potência. Um fator fundamental no problema de estabilidade angular do rotor é a forma na qual a potência entregue pela máquina síncrona varia com as oscilações do seu rotor (KUNDUR, 1994).

No funcionamento da máquina síncrona, não mantendo o sincronismo com o restante do sistema, seu rotor gira com velocidade maior ou menor do que aquela requerida para gerar tensões na frequência do sistema. O defasamento entre a frequência do sistema e a frequência do rotor da máquina resulta, conseqüentemente, em variações na potência, na corrente e na tensão da máquina.

Como conseqüência, tem-se a ação de sistemas de proteção para isolar a máquina do sistema. A perda de sincronismo pode ser observada entre uma máquina e o sistema ou entre grupos de máquinas. Neste último, o sincronismo pode ser mantido com a separação dos grupos com comportamentos distintos (MENDES, 2005).

2.3 Estudo de estabilidade de tensão

O estudo de estabilidade de tensão analisa a habilidade do SEP em manter um perfil adequado de tensão em todos os seus barramentos, tanto em condições normais de operação, quanto em situações de distúrbio. O critério para estabilidade de tensão é dado por uma condição operativa para todos os barramentos do sistema, a magnitude de tensão nas barras aumenta com o aumento da injeção de potência reativa nas barras. Se a tensão em uma barra do sistema diminui, quando há um aumento da injeção de potência reativa nesta barra, fica caracterizada uma instabilidade de tensão.

A instabilidade de tensão se manifesta por meio de um declínio de tensão de forma contínua e incontrolável causado por uma perturbação (elevação de carga ou alteração na configuração). Esta redução progressiva da magnitude da tensão está relacionada substancialmente à indisponibilidade, ou dificuldade de suprimento de potência reativa. Este

fenômeno inicia-se de forma local e pode expandir-se até mesmo por todo o sistema interligado, causando colapso na operação (CALDEIRA, 2009).

A instabilidade de tensão é um fenômeno local, entretanto, suas consequências podem se manifestar por todo o sistema. Colapso de tensão é mais severo que um simples problema de instabilidade de tensão. O colapso, usualmente, é o resultado de uma sequência de eventos que acompanham uma instabilidade de tensão levando a um perfil de baixa tensão em parte significativa do sistema.

O estudo de estabilidade de tensão pode ser dividido em duas classes de estudo, que são as seguintes: estudo de estabilidade de tensão de regime permanente ou para pequenos impactos e estudo de estabilidade de tensão para grandes impactos (CALDEIRA, 2009).

2.4 Estudo de estabilidade de frequência

O estudo de estabilidade de frequência avalia a habilidade de um sistema de potência em manter sua frequência constante após ser submetido a uma perturbação severa, que resulte em um desequilíbrio significativo entre o montante de potência gerado e a carga consumida no sistema. Esta habilidade do sistema em manter o balanço entre geração e carga está associada à capacidade do mesmo em manter ou atingir um novo ponto de equilíbrio com uma perda mínima de carga de forma involuntária (CALDEIRA, 2009).

A instabilidade de frequência é caracterizada pela oscilação sustentada da frequência, o que resulta na saída de operação de unidades geradoras e/ou corte de carga. Os impactos severos, considerados nestes estudos, geralmente resultam em grandes excursões de frequência, de tensão, de fluxos de potência e de outras variáveis do sistema.

Isto implica a ação de elementos de controle e proteção que não são normalmente modelados nos estudos de estabilidade transitória e de tensão. As dinâmicas destes elementos são bastante lentas como, por exemplo, as caldeiras e os sistemas de proteção Voltz/Hertz que só atuam em condições extremas (CALDEIRA, 2009).

Em um grande sistema interligado, impactos mais severos podem resultar em situações de ilhamento. Neste caso a condição de estabilidade refere-se à capacidade de cada um dos sistemas ilhados de atingir um estado de operação equilibrado com a menor perda possível de carga. Este novo estado é determinado pela resposta global do sistema e evidenciado pela nova de operação (CALDEIRA, 2009).

De forma geral, os problemas de estabilidade de frequência estão associados à respostas inadequadas de equipamentos, como coordenação precária dos sistemas de controle e proteção ou a uma reserva de geração insuficiente. Em um sistema ilhado a estabilidade de frequência pode ser associada a qualquer distúrbio que resulte em uma perda significativa de carga e/ou geração (KUNDUR, 1994).

3 GERAÇÃO TÉRMICA A GÁS E CICLO COMBINADO

Neste capítulo é apresentada a descrição do processo de produção de energia elétrica a partir do Gás Natural, dos princípios básicos, dos componentes da usina, dos combustíveis que abastecem a térmica, suas reservas, as vantagens e desvantagens do uso do ciclo combinado de geração de energia.

3.1 Geração de usinas térmicas a gás

Embora a geração hidrelétrica seja predominante na matriz energética brasileira, a adoção das usinas termelétricas tende a mudar o cenário na próxima década. E essa mudança trará desafios ambientais no controle de gases poluentes. Dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) indicam que existem 81 usinas térmicas projetadas até 2017.

Com estes novos projetos a geração térmica a gás será responsável por 10,59% da matriz energética brasileira (em 2010 era 7%), enquanto que a geração a óleo combustível passaria de 1% para 5,7%, para ficar em dois exemplos. A energia hidrelétrica nacional, por sua vez, hoje corresponde a 65,58% da matriz energética brasileira (ANEEL, 2012).

As usinas termelétricas produzem energia elétrica a partir da queima de carvão, óleo combustível ou GN em uma caldeira projetada para esta finalidade específica, ou seja, quando na turbina ocorre a transformação da energia química em energia mecânica e pela conversão da energia mecânica, necessária para girar o eixo do gerador, em energia elétrica. O funcionamento das centrais termelétricas é semelhante, independentemente do combustível utilizado (AMBIENTE ENERGIA, 2010).

Em ciclo simples, os gases são resfriados e liberados na atmosfera por meio de uma chaminé. No ciclo combinado, ainda em alta temperatura, os gases são transformados em vapor que, direcionados às turbinas, novamente provocam o seu movimento. Assim, a

característica básica de termelétricas a ciclo combinado é a operação conjunta de turbinas movidas a gás e a vapor.

A tecnologia do ciclo combinado é recente (década de 80) e passa por processo de expansão em todo o mundo, inclusive no Brasil. Embora exija maiores investimentos que aqueles aplicados nas usinas de ciclo simples, aumenta a eficiência do processo de geração. Em outras palavras: com a mesma quantidade de gás natural é possível obter maior produção de energia elétrica.

O sistema de co-geração é semelhante ao de ciclo combinado, ocorrendo a geração de energia elétrica e térmica a partir da queima de algum combustível. Entretanto, o vapor produzido é utilizado no processo industrial como secagem, aquecimento, cozimento entre outros (GASNET, 2010).

Qualquer produto capaz de gerar calor pode ser usado como combustível. Os combustíveis mais utilizados são: óleo combustível, óleo diesel, GN, urânio enriquecido e carvão mineral. As usinas termelétricas passaram a ganhar força no País, principalmente, pela evolução tecnológica, crescimento da malha de gasodutos e maior facilidade em se adquirir o GN, combustível principal desse tipo de unidade geradora, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012).

O custo da operação e a especificação dos componentes da usina estão relacionados ao tipo de combustível adotado. A termelétrica, que utiliza o GN como combustível, tem como principal vantagem a possibilidade de ser implantada junto aos grandes centros de consumo de energia, desde que atendidas as normas de proteção ao meio ambiente local. A instalação da usina próxima aos consumidores possibilita a redução de perdas nas linhas de transmissão, assim como, a diminuição de riscos de descontinuidade dos sistemas de transmissão.

Uma usina termelétrica de ciclo combinado tem associada à sua planta, turbinas a gás e a vapor, gerando energia elétrica através de um processo que combina a operação do ciclo Brayton (duas turbinas a combustão) e do ciclo Rankine (turbinas a vapor gerando pela recuperação de energia dos produtos de combustão).

Usinas termelétricas que utilizam o GN como combustível apresentam ainda vantagens de caráter ambiental quando comparadas com as equivalentes a carvão ou óleo mineral. O GN é, em princípio, isento de enxofre e de cinzas, o que torna dispensáveis as custosas instalações de desulfurização e eliminação de cinzas que são exigidas nas térmicas a carvão e a óleo. Além disso, a contribuição para o aquecimento global por kW gerado é menor devido à melhor eficiência térmica.

3.1.1 Gás Natural

O gás natural é qualquer hidrocarboneto ou mistura de hidrocarbonetos que permaneça em estado gasoso nas condições atmosféricas normais. É resultante da decomposição da matéria orgânica fóssil no interior da terra. O GN é composto, principalmente, pelo gás metano, apresentando também o etano, o propano e o butano. Substitui combustíveis considerados muito poluidores como carvão e lenha. É mais leve que o ar, portanto em caso de vazamento se dissipa rapidamente para a atmosfera, assim, é um gás inodoro, incolor, inflamável, podendo ser asfixiante se aspirado em altas concentrações.

3.1.1.1 Usos

O GN tem um amplo espectro de aplicações. Suas principais utilizações tem sido como combustível industrial, comercial, domiciliar e residencial, e na recuperação secundária de petróleo em campos petrolíferos, através de sua reinjeção. Também é utilizado como matéria-prima nas indústrias petroquímica (plásticos, tintas, fibras sintéticas e borracha) e de fertilizantes (ureia, amônia e seus derivados), e para redução do minério de ferro na indústria siderúrgica.

Outra forma de utilização de GN é como combustível na geração de eletricidade, seja em usinas termelétricas, seja em unidades industriais, instalações comerciais e de serviços, em regime de cogeração (produção combinada de vapor e eletricidade). O GN é a terceira maior fonte de energia primária no mundo, somente superado pelo petróleo e pelo carvão.

O uso do GN nas residências, seja para cocção, seja para calefação, além da segurança e praticidade, tem a vantagem de substituir o GLP (derivado de petróleo importado pelo Brasil), que exige complexa infraestrutura de transporte e armazenamento.

Nos segmentos de transporte coletivo e de cargas, a utilização do GN assume importância na redução de agentes poluentes.

3.1.1.2 Produção

O GN é produzido, muitas vezes juntamente com o petróleo, através da extração nas bacias sedimentares da crosta terrestre. Ao chegar à superfície ele é tratado para remoção

de impurezas, como água e outros gases. A seguir ele é transportado por gasodutos para as zonas de consumo e refino.

Plantas elétricas e algumas indústrias podem utilizar o GN diretamente, captado dos gasodutos. Residências e pequenas indústrias adquirem o gás de empresas distribuidoras. As empresas distribuidoras adicionam substância odorante ao gás por medida de segurança, para facilitar a identificação de vazamentos.

3.1.1.3 Reservas brasileiras de gás natural

Mais de 50% das reservas totais de gás, ou seja, 205,8 bilhões de m³, estão localizadas na Bacia de Campos e o restante, 49,8%, distribuído nas demais unidades operativas da Petrobras. A maior parte das reservas totais de gás está localizada no *offshore*, onde se concentram 252,6 bilhões de m³. Grande parte das reservas está localizada em lâmina d'água superior a 1.000 m (GASNET, 2010).

Tabela 1 – Reservas de gás natural por região de produção em bilhões de m³

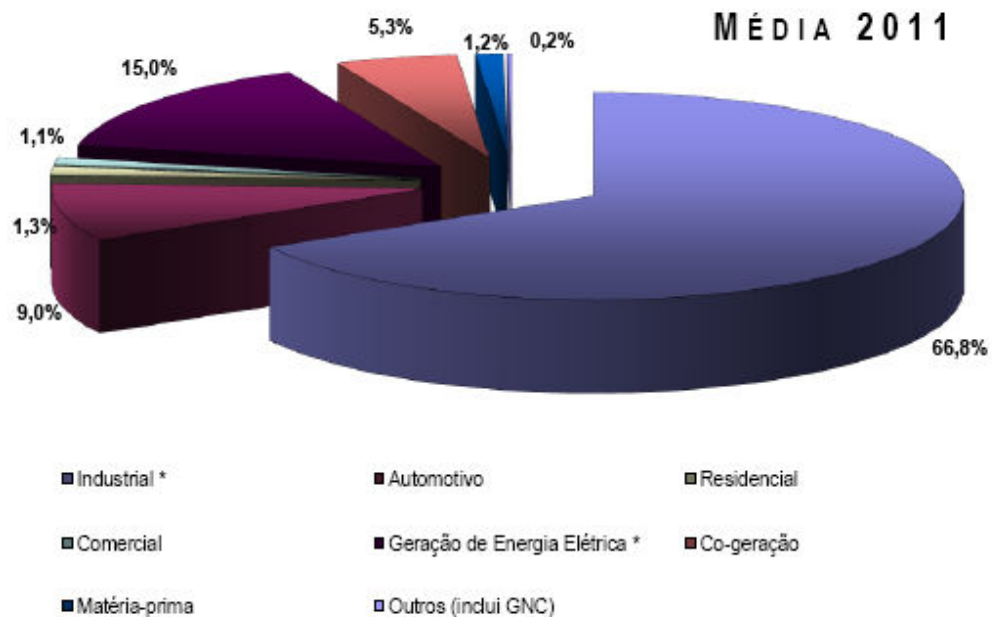
Unidade Operativa	Provada	Provável + Possível	Total
Amazônia	060,0	036,8	096,8
Bahia	024,8	019,1	043,9
Bacia de Campos	094,4	111,4	205,8
Espírito Santo	005,8	002,9	008,7
R.G.Norte/Ceará	018,4	007,8	026,2
Sergipe/Alagoas	014,2	005,5	019,7
Sul	008,3	000,4	008,7
Petrobras	225,9	183,9	409,8
Total	451,8	367,8	819,6

Fonte: Site do Gás Natural – GASNET (2010).

A OGX energia, braço de exploração de petróleo no Maranhão do grupo EBX, do empresário Eike Batista, descobriu uma reserva gigante de gás na cidade de Capinzal do Norte, localizada a 260 km de São Luís. As reservas, segundo a OGX, têm o equivalente a 15 milhões de metros m³ por dia – metade do que a Bolívia manda ao Brasil diariamente. A expectativa da OGX energia é começar a explorar comercialmente essa reserva dentro de um ano e meio ou no máximo dois anos (JUREMA, 2010).

Em números, hoje o Brasil produz aproximadamente 60 milhões de m³ de gás. Se a projeção anunciada for confirmada, somente com a produção desse campo gigante, o Maranhão será responsável pelo aumento de 25% da capacidade de produção de gás em todo o Brasil nos próximos anos. (JUREMA, 2010)

Figura 1 – Consumo de Gás Natural 2012



Fontes: Abegás, Petrobras e ANP (2012)

3.1.2 Componentes da usina

Os principais componentes que constituem uma usina termelétrica a ciclo combinado, podem ser divididos em:

a) Compressores: são utilizados para proporcionar a elevação da pressão de um gás. Ele comprime o ar atmosférico procedente dos filtros de admissão e direciona para a câmara de combustão.

b) Câmara de Combustão: tem a finalidade de queimar uma quantidade de gás fornecido pelo injetor, com uma grande quantidade de ar proveniente do compressor, e liberar o calor de maneira que o ar é expandido e acelerado para dar uma corrente suave e uniforme ao gás quente.

c) Turbina: motor térmico rotativo, constituída basicamente por aletas montadas sobre um eixo, com uma aerodinâmica projetada para converter a energia térmica e de pressão do gás ou vapor em energia mecânica, que aciona um gerador elétrico.

d) Gerador: máquina que converte a energia mecânica fornecida pela turbina, em energia elétrica.

e) Caldeiras de Recuperação de Calor: geradores de vapor que utilizam o calor de escape das turbinas a gás, como fonte de calor para geração de energia elétrica.

f) Condensador: trocador de calor no qual se realiza a conversão do vapor de exaustão da turbina ao estado líquido, utilizando água como fluido de resfriamento.

g) Aquecedores: trocadores de calor que permitem o aquecimento da água de alimentação num ciclo de vapor utilizando vapor das extrações da turbina.

h) Sistema de excitação: é de fundamental importância para prover a alimentação em corrente contínua ao enrolamento de campo do gerador síncrono. A ele também são atribuídos os controles da tensão e da potência reativa gerada.

3.2 O processo de produção de energia da UTCC

As usinas termelétricas se beneficiam da tecnologia do ciclo combinado para melhor aproveitar o GN e conseqüentemente aumentar seu rendimento. Tratando-se de uma tecnologia relativamente recente, há ainda oportunidades abertas para o desenvolvimento de técnicas que promovam aumento na eficiência térmica e no rendimento dos equipamentos envolvidos, tornando ainda mais atrativa a instalação deste tipo de empreendimento.

Usinas termelétricas que utilizam o GN como combustível apresentam ainda vantagens de caráter ambiental quando comparadas com as equivalentes a carvão ou óleo mineral. O GN é, em princípio, isento de enxofre e de cinzas, o que torna dispensáveis as custosas instalações de desulfurização e eliminação de cinzas que são exigidas nas térmicas a carvão e a óleo. Além disso, a contribuição para o aquecimento global por kW gerado é menor devido à melhor eficiência térmica.

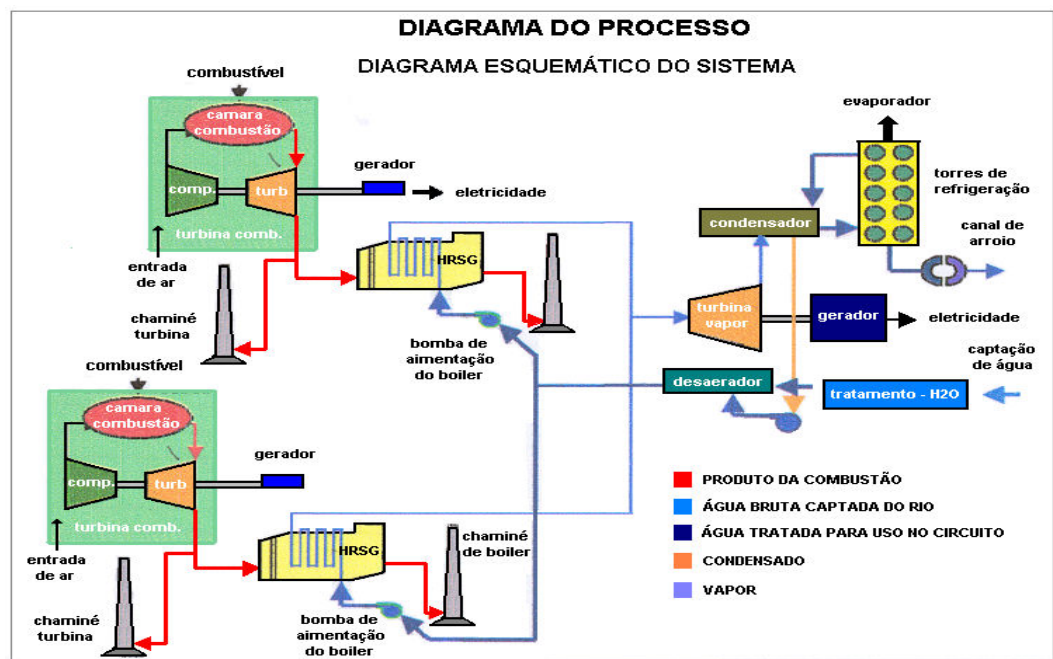
A termelétrica em estudo possui uma potência instalada de 310,7 MW, sendo composta por: (I) duas turbinas a gás, cada uma com potência nominal de 112,8 MW, (II) uma turbina a vapor, com potência nominal de 113,1 MW, (III) duas caldeiras de recuperação de calor, (IV) dois conjuntos-geradores de 133,8 MVA e (V) um conjunto gerador com potência nominal de 147 MVA.

O processo de geração de energia elétrica em uma UTCC inicia-se com o ar atmosférico sendo sugado pelos compressores das turbinas de combustão. O ar é comprimido, misturado com o GN, e em seguida esta mistura é queimada. Este processo origina gases a altas temperaturas e pressões que são enviados para a turbina responsável por converter a

energia térmica em mecânica. O gerador elétrico acoplado ao eixo da turbina converte a energia mecânica em elétrica. O processo, até esta etapa, caracteriza-se como geração de energia por ciclo simples.

Após a expansão, os gases são enviados para as caldeiras de recuperação, onde se aproveitará o calor dos gases quentes provenientes das turbinas a gás para gerar o vapor que movimentará a turbina a vapor. Ao sair da turbina, o vapor é condensado e retorna para as caldeiras de recuperação, fechando o ciclo. Esta turbina converte a energia mecânica armazenada no vapor em alta pressão e a alta temperatura em energia de rotação, que é transformada em energia elétrica pelo gerador. A figura 2 ilustra o processo de produção de energia elétrica da termelétrica em estudo.

Figura 2 – Representação esquemática da termelétrica em estudo



Fonte: Central Geradora Termelétrica Fortaleza S/A – ENDESA (2008)

A Central Geradora Termelétrica Fortaleza S/A (CGTF), considerada como produtor independente de energia, é capaz de gerar 346.630 kW de potência. Sua produção de energia representa 0,3596% da capacidade do país.

Para melhorar o desempenho dinâmico do sistema são utilizados os reguladores de velocidade das turbinas, os reguladores de tensão dos geradores e os estabilizadores de sistema de potência.

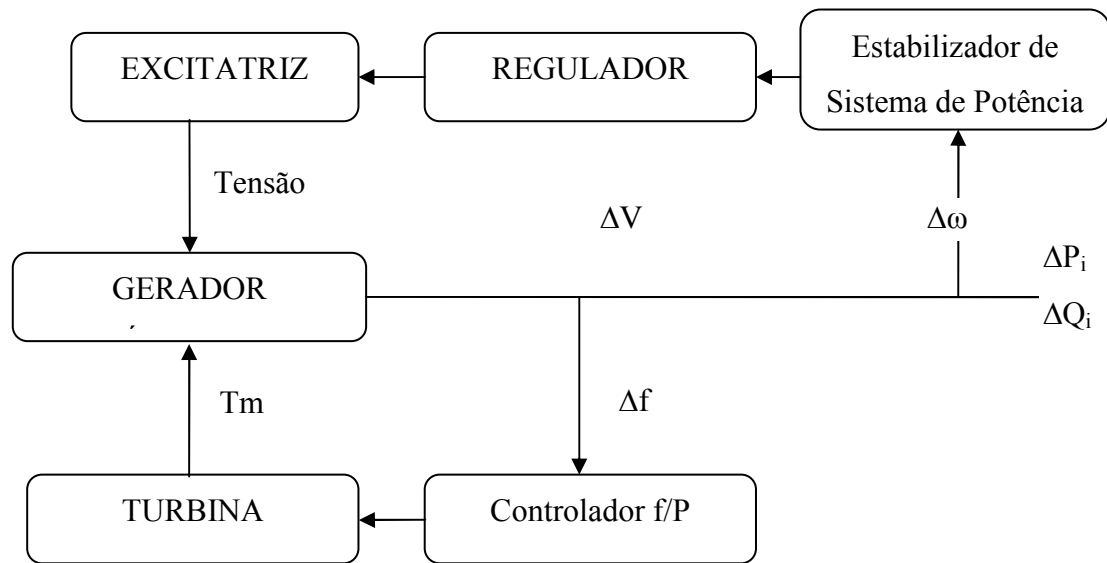
Para evitar desequilíbrios no sistema, os geradores síncronos, principais responsáveis pela geração de energia elétrica, são equipados com Reguladores Automáticos de Tensão (RAT) que têm por função manter a tensão terminal dos geradores no nível desejado.

O crescimento dos SEP tem gerado a necessidade de utilização de RAT que atuem cada vez mais rápido no restabelecimento do nível da tensão do gerador, diminuindo o tempo de desequilíbrio entre a carga e a geração, melhorando a estabilidade do sistema a grandes defeitos. Entretanto, o RAT prejudica a capacidade inerente das máquinas síncronas de amortecer as oscilações eletromecânicas que ocorrem no sistema, podendo ocorrer instabilidades em oscilações subsequentes à primeira.

Por isso, os geradores síncronos são equipados com estabilizadores de sistemas de potência, equipamentos que atuam através da adição de sinais suplementares, aplicados à excitação dos geradores síncronos, para aumentar o amortecimento das oscilações eletromecânicas de unidades geradoras.

O estabilizador de sistemas de potência ou Power System Stabilizer (PSS) é um circuito de avanço de fase, projetado para compensar os atrasos que ocorrem na malha do controle de tensão. Ele opera via regulador de tensão do gerador, influenciando seu ponto de ajuste. O diagrama de blocos das malhas de controle de um sistema de potência é ilustrado na Figura 3.

Figura 2 – Diagrama de blocos das malhas de controle de um sistema de potência



Fonte: Dissertação de Mestrado - Francis (2007)

Nas usinas termelétricas de ciclo combinado as massas das partes girantes da turbina, do eixo e do gerador possuem pequena inércia em comparação com as usinas hidroelétricas, tendendo a manifestar situações de baixo amortecimento nas condições de operação de carga pesada, provocando oscilações significativas dos fluxos de potência. Tais oscilações podem levar à atuação da proteção e saída de operação de componentes importantes do sistema de transmissão.

O uso de reguladores de tensão rápidos suplementados com estabilizadores de sistemas de potência é, sem dúvida, o método mais efetivo e econômico de aumentar a estabilidade dinâmica do sistema (KUNDUR, 1993).

3.2.1 Vantagens e desvantagens das termelétricas de ciclo combinado

3.2.1.1 Vantagens

A possibilidade de construção das termelétricas de ciclo combinado em locais onde se originam a necessidade de energia, visto que minimiza o alto custo com as linhas de transmissão. Outra vantagem é a não dependência de fatores climáticos como chuvas e ventos para o seu funcionamento.

A UTCC apresenta maior rendimento térmico que a termelétrica de ciclo aberto. A usina de ciclo aberto possui um rendimento de aproximadamente 36%, ou seja, mais de

60% do calor gerado na queima é perdido através dos gases de exaustão. As UTCC além de possuir melhor eficiência do que as de ciclo aberto, possuem a característica de que suas turbinas a gás podem ser trazidas à plena carga em poucos minutos, tempo bastante reduzido em relação a unidades térmicas a vapor que chegam a levar horas. Essa característica da turbina a gás a torna adequada para prover capacidade de suprimento no pico ou em situações de emergência. As termelétricas movidas a gás natural representam um impacto ambiental menor.

O GN utilizado para gerar eletricidade é considerado menos poluente que os combustíveis derivados do petróleo e o carvão, apresentando a vantagem de emitir menos gases poluentes comparados a outros combustíveis fósseis. A utilização do GN também proporciona a redução de custos, pois dispensa as instalações de desulfurização e eliminação de cinzas que são exigidas nas térmicas a carvão e a óleo, devido em princípio, ser isento de enxofre e de cinzas, bem como dispensam áreas para estocagem de carvão ou parque de tanques de óleo.

3.2.1.2 Desvantagens

Uma das desvantagens das termelétricas que utilizam GN é que esta é considerada uma energia não renovável, portanto finita. O GN, por ser um combustível fóssil, corre o risco de se esgotar, pois é utilizado com uma velocidade maior do que o tempo necessário para a sua formação. O alto preço do combustível também é considerado como grande desvantagem, pois gera problemas de abastecimento e confiabilidade de suprimento.

As termelétricas causam alguns impactos ambientais indesejáveis, como poluição do ar e necessidade de um sistema de resfriamento, cujo fluido refrigerante é normalmente a água. Além de possuir um alto custo de operação, em detrimento das hidrelétricas. Faz-se necessário, também, analisar e equacionar os problemas do transporte e do fornecimento de combustível.

4 MÁQUINAS SÍNCRONAS PARA SIMULAÇÃO DINÂMICA UTILIZANDO MODELO DE 6ª ORDEM

A energia elétrica produzida a partir de hidrelétricas representa 69,19% da produção de energia elétrica brasileira. Nelas a energia potencial da água é transformada em

energia cinética e esta é transformada em energia elétrica através da conversão eletromecânica que ocorre no interior das máquinas síncronas.

Além das hidrelétricas, as máquinas síncronas também são utilizadas nas usinas térmicas e nucleares, as quais produzem 25,22% e 1,82%, respectivamente, totalizando 96,23% da produção de energia elétrica produzida no Brasil. Os 3,77% da energia elétrica restantes é produzida a partir de outras máquinas, como as assíncronas na geração eólica, ou armazenada através de geração fotovoltaica. A Tabela 2 exibe a quantidade de energia elétrica produzida por cada tipo de usina nos empreendimentos em operação no país (ANEEL, 2011).

Devido à elevada participação das máquinas síncronas na geração de energia elétrica, o desenvolvimento de ferramentas didáticas para entender o seu funcionamento, e o efeito dos controladores a ela associado, é de extrema importância para o ensino e treinamento de profissionais que atuam no setor de geração e de proteção do SEP.

Tabela 2 – Empreendimentos em Operação

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
CGH	320	184.101	182.500	0,17
EOL	45	796.932	793.336	0,72
PCH	373	3.241.874	3.193.423	2,89
UHE	173	76.921.587	76.412.720	69,19
UTE	1.361	29.859.221	27.857.700	25,22
UTN	2	2.007.000	2.007.000	1,82
Total	2.277	113.010.751	110.446.715	100

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2011).

4.1 Modelo matemático para simulação dinâmica de máquina síncrona

A máquina síncrona é constituída por um elemento girante, acoplado mecanicamente ao eixo da turbina, denominado rotor, e outro fixo montado na carcaça, chamado estator. Aplicando corrente contínua à bobina, denominada enrolamento de campo, induz-se uma tensão senoidal nas bobinas presas ao estator, devido ao campo girante criado no rotor. A máquina síncrona funcionando como gerador absorve energia mecânica, fornecida em seu eixo pela turbina, e a transforma em energia elétrica, disponíveis em seus terminais.

Em usinas termelétricas, como as máquinas operam em alta velocidade, os geradores possuem um ou dois pares de polos, para obtenção de uma frequência de 60 Hz. Seu rotor é cilíndrico, de pequeno diâmetro e elevado comprimento.

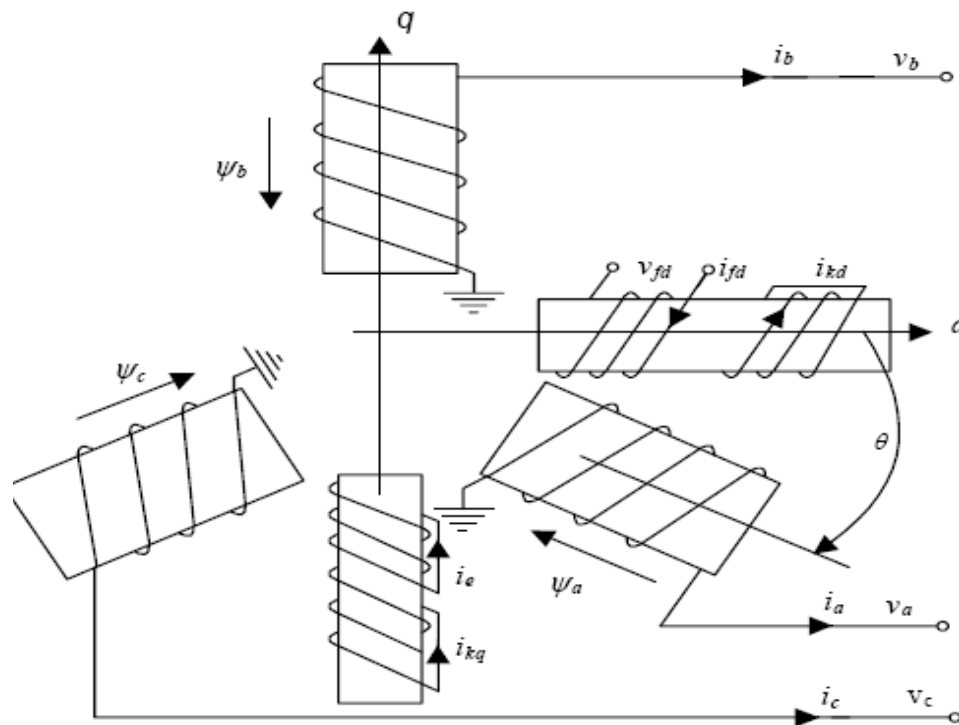
O comportamento dinâmico de máquinas em sistemas elétricos é de fundamental importância para o desempenho global e continuidade do fornecimento de potência. O sucesso da operação de um SEP depende da habilidade de várias máquinas síncronas manterem o sincronismo em condições transitórias, que podem ser criadas por diferentes distúrbios.

Usualmente, os estudos de estabilidade de máquina síncrona são feitos de duas formas. A primeira chamada de “elementar”, na qual o torque elétrico é calculado em regime e, em seguida, utilizado na equação diferencial do movimento do rotor. A outra forma, chamada de “completa”, na qual é estabelecido um modelo de ordem elevada (maior ou igual à sétima ordem) o qual leva em consideração todas as variáveis de estado envolvidas (GUAZZELLI, 1977).

O estudo do comportamento transitório das máquinas síncronas envolve tanto o fenômeno elétrico, que relaciona fluxos e correntes, como o fenômeno mecânico, que descreve as variações da velocidade do eixo e dos ângulos rotóricos. Este modelo foi desenvolvido a partir das equações de Park (1929) com adição de mais um enrolamento amortecedor no eixo em quadratura a fim de melhor modelar as máquinas com rotor de pólos lisos. Na figura 4 é mostrada uma máquina síncrona funcionando como gerador. Considerando-se: três enrolamentos na armadura; fases a, b, e c, quatro enrolamentos no rotor: dois no eixo direto e dois no eixo em quadratura, aos quais se associam equações algébricas e diferenciais.

No eixo direto tem-se o enrolamento de campo e um amortecedor, enquanto que no eixo em quadratura situam-se dois enrolamentos amortecedores. A utilização de um segundo enrolamento amortecedor no eixo em quadratura é usada para incluir uma porção substancial do efeito de amortecimento num gerador com turbina a vapor devido às correntes no ferro do rotor.

Figura 4 – Diagrama esquemático dos enrolamentos de uma máquina síncrona



Fonte: Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência. MOTA – (2006).

4.1.1 Modelo matemático da parte elétrica da máquina síncrona

As equações que representam as variações dos fluxos concatenados, tensões e correntes de vários enrolamentos em uma máquina síncrona podem ser escritas como função do movimento do rotor baseado na teoria de circuitos magnéticos lineares acoplados.

Utiliza-se uma referência girante com o rotor. Nessa estimativa, a corrente de armadura e as tensões são modificadas em dois conjuntos de variáveis ortogonais, um conjunto alinhado com o eixo magnético do enrolamento de campo, conhecido como eixo direto (eixo d), e um segundo conjunto alinhado com o eixo 90° elétricos atrasados em relação ao eixo do enrolamento de campo. Este segundo é conhecido como eixo em quadratura (eixo q). A terceira variável é uma corrente estacionária que é proporcional a corrente de sequência zero.

O modelo apresentado foi desenvolvido a partir das equações de Park com adição de mais um enrolamento amortecedor no eixo em quadratura a fim de aperfeiçoar a modelagem das máquinas com rotor de polos lisos. Na máquina síncrona funcionando como gerador são feitas as seguintes considerações: (i) três enrolamentos na armadura e (ii) quatro

enrolamentos no rotor: dois no eixo direto e dois no eixo em quadratura. No eixo direto encontram-se o enrolamento de campo e um amortecedor, enquanto que no eixo em quadratura situam-se dois enrolamentos amortecedores. A utilização de um segundo enrolamento amortecedor no eixo em quadratura é usada para incluir uma porção substancial do efeito de amortecimento num gerador com turbina a vapor devido às correntes no ferro do rotor (MOTA, 2006).

As equações dos circuitos para cada enrolamento são apresentadas, logo abaixo:

Na armadura,

$$v_a = -R_a i_a + \frac{d}{dt} \varphi_a \quad (4.1)$$

$$v_b = -R_b i_b + \frac{d}{dt} \varphi_b \quad (4.2)$$

$$v_c = -R_c i_c + \frac{d}{dt} \varphi_c \quad (4.3)$$

No rotor,

$$v_{fd} = -R_{fd} i_{fd} + \frac{d}{dt} \varphi_{fd} \quad (4.4)$$

$$0 = -R_e i_e + \frac{d}{dt} \varphi_e \quad (4.5)$$

$$0 = -R_{kq} i_{kq} + \frac{d}{dt} \varphi_{kq} \quad (4.6)$$

Os Fluxos concatenados para cada enrolamento podem ser expressos por:

$$\begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \\ \varphi_{fd} \\ \varphi_e \\ \varphi_{kd} \\ \varphi_{kq} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} -L_{aa} & -L_{ab} & -L_{ac} & L_{afd} & L_{ae} & L_{akd} & L_{akq} \\ -L_{ba} & -L_{bb} & -L_{bc} & L_{bfd} & L_{be} & L_{bkd} & L_{bkq} \\ -L_{ca} & -L_{cb} & -L_{cc} & L_{cfd} & L_{ce} & L_{ckd} & L_{ckq} \\ L_{fda} & L_{fdb} & L_{fdc} & L_{fdfd} & L_{fde} & L_{fdkd} & L_{fdkq} \\ L_{ea} & L_{eb} & L_{ec} & L_{efd} & L_{ee} & L_{ekd} & L_{ekq} \\ L_{kda} & L_{kdb} & L_{kdc} & L_{kdfd} & L_{kde} & L_{kdkd} & L_{kdkq} \\ L_{kqa} & L_{kqb} & L_{kqc} & L_{kqfd} & L_{kqe} & L_{kqkd} & L_{kqkq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_{fd} \\ i_e \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{aa} & -L_{ab} & -L_{ac} \\ -L_{ba} & -L_{bb} & -L_{bc} \\ -L_{ca} & -L_{cb} & -L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{afd} & L_e & L_{akd} & L_{akq} \\ L_{bfd} & L_{be} & L_{bkd} & L_{bkq} \\ L_{cfd} & L_{ce} & L_{ckd} & L_{ckq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_e \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Ou

$$\begin{bmatrix} \varphi_{fd} \\ \varphi_e \\ \varphi_{kd} \\ \varphi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{fda} & L_{fdb} & L_{fdc} \\ L_{eda} & L_{edb} & L_{edc} \\ L_{kda} & L_{kdb} & L_{kdc} \\ L_{kqa} & L_{kqb} & L_{kqc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{fdfd} & L_{fdle} & L_{fdkd} & L_{fdkq} \\ L_{efld} & L_{ee} & L_{ekd} & L_{ekq} \\ L_{kdfd} & L_{kde} & L_{kdkd} & L_{kdkq} \\ L_{kqfd} & L_{kqe} & L_{kqkd} & L_{kqkq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_e \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

4.1.1.1 Valores das indutâncias como função do rotor e indutâncias mútuas

A variação da indutância própria da fase a, L_{aa} , pode ser expressa como uma série de Fourier truncada, na forma:

$$L_{aa} = L_s + L_m \cos 2\theta \quad (4.10)$$

Em que $L_s > L_m$ (KIMBARK, 1956).

Da mesma forma,

$$L_{bb} = L_s + L_m \cos 2(\theta - 120^\circ) \quad (4.11)$$

$$L_{cc} = L_s + L_m \cos 2(\theta + 120^\circ) \quad (4.12)$$

As indutâncias mútuas entre dois enrolamentos quaisquer da armadura podem ser expressas como seguem:

$$L_{ab} = L_{ba} = -[M_s + L_m \cos 2(\theta + 30^\circ)] \quad (4.13)$$

$$L_{ac} = L_{ca} = -[M_s + L_m \cos 2(\theta - 210^\circ)] \quad (4.14)$$

$$L_{cb} = L_{bc} = -[M_s + L_m \cos 2(\theta + 30^\circ)] \quad (4.15)$$

A indutância mútua de qualquer enrolamento no eixo direto com qualquer fase da armadura tem valor máximo quando o eixo direto coincide com o eixo daquela fase, e são dados por:

$$L_{afd} = L_{fda} = M_{fd} \cos 2\theta \quad (4.16)$$

$$L_{bfd} = L_{fdb} = M_{fd} \cos(\theta - 120^\circ) \quad (4.17)$$

$$L_{cfd} = L_{fdc} = M_{fd} \cos(\theta + 120^\circ) \quad (4.18)$$

$$L_{ae} = L_{ea} = M_e \cos(\theta + 90^\circ) \quad (4.19)$$

$$L_{be} = L_{eb} = M_e \cos(\theta - 30^\circ) \quad (4.20)$$

$$L_{ce} = L_{ec} = M_e \cos(\theta - 150^\circ) \quad (4.21)$$

$$L_{akd} = L_{kda} = M_{kd} \cos \theta \quad (4.22)$$

$$L_{bkd} = L_{kdb} = M_{kd} \cos(\theta - 120^\circ) \quad (4.23)$$

$$L_{ckd} = L_{kdc} = M_{kd} \cos(\theta + 120^\circ) \quad (4.24)$$

$$L_{akq} = L_{kqa} = M_{kq} \cos(\theta + 90^\circ) \quad (4.25)$$

$$L_{bkq} = L_{kqb} = M_{kq} \cos(\theta - 30^\circ) \quad (4.26)$$

$$L_{ckq} = L_{kqc} = M_{kq} \cos(\theta - 150^\circ) \quad (4.27)$$

As indutâncias L_{fdfd} , L_{kdkd} , L_{kqkq} e L_{ee} são constantes.

As indutâncias mútuas entre os eixos direto e quadratura são nulas.

$$L_{fdkq} = L_{fde} = L_{kdkq} = L_{kde} = 0$$

No eixo direto, $L_{fdkd} = L_{kdfd}$ e são constantes.

No eixo em quadratura $L_{ekq} = L_{kqe}$ e são constantes.

Transformação e variáveis de Park:

Para eliminar a aparência explícita dos parâmetros variáveis no tempo das equações apresentadas, usa-se a transformação de Park para se obter um conjunto de equações com coeficientes invariáveis no tempo. As variáveis de fase (a,b,c), que decompõem as equações diferenciais que definem as tensões nos enrolamentos da máquina em coeficientes constantes são em (d,q,0) da forma mostrada a seguir.

Considerando-se uma variável qualquer, que pode representar tensão, corrente, fluxo etc. tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \bar{T} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Em que \bar{T} é a matriz de transformação de Park, dada por:

$$\bar{T} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen} \theta & 1 \\ \cos(\theta - 120^\circ) & -\text{sen}(\theta - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta + 120^\circ) & -\text{sen}(\theta + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Inversamente,

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \bar{T}^{-1} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Com

$$\bar{T}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\text{sen} \theta & -\text{sen}(\theta - 120^\circ) & -\text{sen}(\theta + 120^\circ) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Fluxos concatenados em termos das variáveis de Park

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{aa} & -L_{ab} & -L_{ac} \\ -L_{ba} & -L_{bb} & -L_{bc} \\ -L_{ca} & -L_{cb} & -L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \bar{T}^{-1} \begin{bmatrix} L_{afd} & L_e & L_{akd} & L_{akq} \\ L_{bfd} & L_{be} & L_{bkd} & L_{bkq} \\ L_{cfd} & L_{ce} & L_{ckd} & L_{ckq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_e \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad \text{ou} \quad (4.32)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{fd} \\ \varphi_e \\ \varphi_{kd} \\ \varphi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{fda} & L_{fdb} & L_{fdc} \\ L_{eda} & L_{edb} & L_{edc} \\ L_{kda} & L_{kdb} & L_{kdc} \\ L_{kqa} & L_{kqb} & L_{kqc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{fdfd} & L_{fde} & L_{fdkd} & L_{fdkq} \\ L_{efd} & L_{ee} & L_{ekd} & L_{ekq} \\ L_{kdfd} & L_{kde} & L_{kdkd} & L_{kdkq} \\ L_{kqfd} & L_{kqe} & L_{kqkd} & L_{kqkq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_e \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Após algumas manipulações trigonométricas tem-se:

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_d i_d + M_{fd} i_{fd} + M_{kd} i_{kd} \\ -L_q i_q + M_{fq} i_{fq} + M_{kq} i_{kq} \\ -L_0 i_0 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{fd} \\ \varphi_e \\ \varphi_{kd} \\ \varphi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3/2M_{fd} & 0 & 0 & L_{fdfd} & 0 & L_{fdkd} & 0 \\ 0 & -3/2M_e & 0 & 0 & L_{ee} & 0 & L_{ekq} \\ -3/2M_{kd} & 0 & 0 & L_{kdfd} & 0 & L_{kdkd} & 0 \\ 0 & -3/2M_{kq} & 0 & 0 & L_{kqe} & 0 & L_{kqkq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_e \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Em que $L_d=L_s+M_s+3/2L_m$ e $L_q=L_s+M_s-3/2L_m$

Equações dos circuitos em termos das variáveis de Park

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \bar{T}^{-1} \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \bar{T}^{-1} \frac{d}{dt} \bar{T} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_0 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

Após determinadas manipulações trigonométricas, onde $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$,

$$\text{tem-se, } \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_d - \dot{\theta} \varphi_q \\ \dot{\varphi}_q + \dot{\theta} \varphi_d \\ \dot{\varphi}_0 \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

4.1.1.2 Equações das partes elétricas definidas por eixo

Por eixo, têm-se as seguintes equações que descrevem o comportamento dinâmico das máquinas síncronas expressas em unidades definidas (parte elétrica).

Fluxos concatenados no eixo direto:

$$\varphi_d = -L_d i_d + M_{fd} i_{fd} + M_{kd} i_{kd} \quad (4.38)$$

$$\varphi_{fd} = -\frac{3}{2} M_{fd} i_d + L_{fdfd} i_{fd} + L_{fkkd} i_{kd} \quad (4.39)$$

$$\varphi_{kd} = -\frac{3}{2}L_{kd}i_d + L_{kffd}i_{fd} + L_{kdkd}i_{kd} \quad (4.40)$$

Fluxos concatenados no eixo em quadratura:

$$\varphi_q = -L_q i_q + M_e i_e + M_{kq} i_{kq} \quad (4.41)$$

$$\varphi_e = -\frac{3}{2}M_e i_q + L_{ee} i_e + L_{ekq} i_{kq} \quad (4.42)$$

$$\varphi_{kq} = -\frac{3}{2}L_{kq} i_q + L_{kqe} i_e + L_{kqkq} i_{kq} \quad (4.43)$$

Tensões no eixo direto:

$$v_d = \dot{\varphi}_d - R_a i_d - \varphi_q \dot{\theta} \quad (4.44)$$

$$v_{fd} = \dot{\varphi}_{fd} - R_{fd} i_{fd} \quad (4.45)$$

$$0 = \dot{\varphi}_{kd} - R_{kd} i_{kd} \quad (4.46)$$

Tensões no eixo em quadratura:

$$v_q = \dot{\varphi}_q - R_a i_q - \varphi_d \dot{\theta} \quad (4.47)$$

$$0 = \dot{\varphi}_e - R_e i_e \quad (4.48)$$

$$0 = \dot{\varphi}_{kd} - R_{kd} i_{kd} \quad (4.49)$$

4.1.1.3 Equações das partes elétricas definidas por eixo em sistema por unidade (p.u.)

Em estudos de Sistemas de Potência, é conveniente expressar as equações (4.38 a 4.49) em por unidade (*p.u.*).

Para a armadura, a tensão base é escolhida como o valor de pico da tensão nominal do estator, \hat{V} , e a corrente base é escolhida como o valor de pico da corrente nominal do estator \hat{I} . As seguintes relações definem o sistema *p.u.*

Mesma potência base nos diversos enrolamentos da máquina.

$$\frac{3}{2} \hat{V} \hat{I} = v_{fd} I_{fd} = v_e I_e = v_{kd} I_{kd} = v_{kq} I_{kq} \quad (4.50)$$

Mesmo fluxo induzido na linha do entreferro pelas correntes nos diversos enrolamentos da máquina em que L_{al} é a indutância de dispersão da armadura.

$$I_{fd} = \frac{L_d - L_{al}}{M_{fd}} \hat{I} \quad (4.51)$$

$$I_e = \frac{L_q - L_{al}}{M_e} \hat{I} \quad (4.52)$$

$$I_{kd} = \frac{L_d - L_{al}}{M_{kd}} \hat{I} \quad (4.53)$$

$$I_{kq} = \frac{L_q - L_{al}}{M_{kq}} \hat{I} \quad (4.54)$$

Para expressar as equações em *p.u.*, tem-se como procedimento para os fluxos:

- Dividir as equações pelo fluxo base;
- Dividir cada corrente pela correspondente corrente de base.

$$\frac{\omega_0 \varphi_d}{\hat{V}} = - \frac{\omega_0 L_d \hat{I} i_d}{\hat{V} \hat{I}} + \frac{\omega_0 M_{fd} I_{fd} i_{fd}}{\hat{V} I_{fd}} + \frac{\omega_0 M_{Kd} I_{Kd} i_{Kd}}{\hat{V} I_{Kd}} \quad (4.55)$$

$$\frac{\omega_0 \varphi_{Fd}}{V_{fd}} = - \frac{3}{2} \frac{\omega_0 M_{fd} \hat{I} i_d}{V_{fd} \hat{I}} + \frac{\omega_0 L_{fdfd} I_{fd} i_{fd}}{V_{fd} I_{fd}} + \frac{\omega_0 L_{fdKd} I_{Kd} i_{Kd}}{V_{fd} I_{Kd}} \quad (4.56)$$

$$\frac{\omega_0 \varphi_{kd}}{V_{kd}} = - \frac{3}{2} \frac{\omega_0 M_{kd} \hat{I} i_d}{V_{kd} \hat{I}} + \frac{\omega_0 L_{kdfd} I_{fd} i_{fd}}{V_{kd} I_{fd}} + \frac{\omega_0 L_{kdKd} I_{Kd} i_{Kd}}{V_{kd} I_{Kd}} \quad (4.57)$$

4.1.1.4 Equações que descrevem o comportamento dinâmico das máquinas síncronas expressas em por unidade (parte elétrica)

Fluxos concatenados no eixo direto

A partir das equações (4.54) a (4.57) e usando-se as relações (4.50) e (4.51) a (4.54) referentes à armadura, definem-se os seguintes parâmetros em p.u deste sistema.

$$x_d = \omega_0 L_d \frac{\hat{I}}{\hat{V}} \quad (4.58)$$

$$x_{fd} = \omega_0 L_{fd} \frac{I_{fd}}{V_{fd}} = \frac{3}{2} \omega_0 L_{fd} \frac{L_{ad}^2}{M_{fd}^2} \frac{\hat{I}}{\hat{V}} \quad (4.59)$$

$$x_{kd} = \omega_0 L_{kd} \frac{I_{kd}}{V_{kd}} = \frac{3}{2} \omega_0 L_{kd} \frac{L_{ad}^2}{M_{kd}^2} \frac{\hat{I}}{\hat{V}} \quad (4.60)$$

$$x_{afd} = \omega_0 M_{fd} \frac{I_{fd}}{\hat{V}} = \frac{3}{2} \omega_0 M_{fd} \frac{\hat{I}}{V_{fd}} = \omega_0 M_{fd} \frac{I_{ad}}{M_{fd}} \frac{\hat{I}}{\hat{V}} = \omega_0 L_{ad} \frac{\hat{I}}{\hat{V}} = x_{ad} \quad (4.61)$$

$$x_{akd} = \omega_0 M_{kd} \frac{I_{kd}}{\hat{V}} = \frac{3}{2} \omega_0 M_{kd} \frac{\hat{I}}{V_{kd}} = \omega_0 M_{kd} \frac{I_{ad}}{M_{kd}} \frac{\hat{I}}{\hat{V}} = \omega_0 L_{ad} \frac{\hat{I}}{\hat{V}} = x_{ad} \quad (4.62)$$

$$x_{fdkd} = \omega_0 L_{fdkd} \frac{I_{kd}}{V_{fd}} = \frac{3}{2} \frac{L_{fdkd} L_{ad}}{M_{fd} M_{kd}} \omega_0 L_{ad} \frac{\hat{I}}{\hat{V}} \quad (4.63)$$

O termo $\frac{3}{2} \frac{L_{fdkd} L_{ad}}{M_{fd} M_{kd}} = 1$

Se N_a é o número de espiras da fase “a” da armadura, N_{fd} e N_{kd} do campo e enrolamento amortecedor respectivamente, e μ_d o coeficiente de permeância no eixo direto.

Nas equações acima vê-se que $L_{fdkd} L_{ad} = \frac{3}{2} M_{fd} M_{kd}$

Consequentemente, substituindo-se esta relação em (4.58) a (4.63), em p.u tem-se as seguintes simplificações: $x_{akd} = x_{ad}$ e $x_{fdkd} = x_{afd}$.

Analogamente com algumas substituições algébricas podem-se escrever as equações (4.38) a (4.49) em p.u. da seguinte forma:

Fluxos concatenados no eixo direto:

$$\varphi_d = -x_d \dot{i}_d + x_{ad} \dot{i}_{kd} + x_{ad} \dot{i}_{fd} \quad (4.64)$$

$$\varphi_{fd} = -x_{ad} \dot{i}_d + x_{ad} \dot{i}_{kd} + x_{fd} \dot{i}_{fd} \quad (4.65)$$

$$\varphi_{kd} = -x_{ad} \dot{i}_d + x_{kd} \dot{i}_{kd} + x_{ad} \dot{i}_{fd} \quad (4.66)$$

Fluxos concatenados no eixo em quadratura:

$$\varphi_q = -x_q \dot{i}_q + x_{aq} \dot{i}_{kq} + x_{aq} \dot{i}_e \quad (4.67)$$

$$\varphi_e = -x_{aq} \dot{i}_q + x_{aq} \dot{i}_{kq} + x_e \dot{i}_e \quad (4.68)$$

$$\varphi_{kq} = -x_{aq} \dot{i}_q + x_{aq} \dot{i}_{kq} + x_{aq} \dot{i}_{eq} \quad (4.69)$$

Tensões no eixo direto:

$$v_d = \frac{1}{\omega_0} \dot{\varphi}_d - r_a \dot{i}_d - \frac{1}{\omega_0} \varphi_q \dot{\theta} \quad (4.70)$$

$$v_{fd} = \frac{1}{\omega_0} \dot{\varphi}_{fd} + r_{fd} \dot{i}_{fd} \quad (4.71)$$

$$0 = \frac{1}{\omega_0} \dot{\varphi}_{kd} + r_{kd} \dot{i}_{kd} \quad (4.72)$$

Tensões no eixo em quadratura:

$$v_q = \frac{1}{\omega_0} \dot{\varphi}_q - r_a \dot{i}_q + \frac{1}{\omega_0} \varphi_d \dot{\theta} \quad (4.73)$$

$$0 = \frac{1}{\omega_0} \dot{\varphi}_e + r_e \dot{i}_e \quad (4.74)$$

$$0 = \frac{1}{\omega_0} \dot{\varphi}_{kd} + r_{kd} \dot{i}_{kd} \quad (4.75)$$

4.1.1.5 Modelo para simulação dinâmica da máquina síncrona em função de reatâncias e constantes de tempo

Para o estudo de estabilidade de SEP os programas na sua maioria utilizam os modelos para máquinas síncronas expressos em função de reatâncias e constantes de tempo, pois são quase sempre fornecidos pelos fabricantes das máquinas. Este modelo será desenvolvido a partir das equações mostradas no item anterior com algumas relações entre parâmetros obtidos de outras definições apresentadas em (HAMMONS, 1971) e com isso chega-se ao modelo sugerido por (YOUNG, 1972) para simulação de máquinas síncronas em estudos de estabilidade.

Utilizando-se outras definições abaixo, apresentadas em (HAMMONS, 1971):

- $x'_d = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{fd}}$ e $x'_q = x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_e}$, são as reatâncias transitórias nos eixo

direto e quadratura.

- $T'_{d0} = \frac{x_{fd}}{\omega_0 r_{fd}}$ e $T'_{q0} = \frac{x_e}{\omega_0 r_e}$, são as constantes de tempo transitórias de circuito

aberto no eixo direto e quadratura.

- $T''_{d0} = \frac{1}{\omega_0 r_{kd}} \frac{x_{kd} x_{fd} - x_{ad}^2}{x_{fd}}$ e $T''_{q0} = \frac{1}{\omega_0 r_{kq}} \frac{x_{kq} x_e - x_{aq}^2}{x_e}$, são as constantes de

tempo subtransitórias de circuito aberto no eixo direto e quadratura.

- $x_l = x_d - x_{ad} = x_q - x_{aq}$, é a reatância de dispersão da armadura.

A partir das definições acima são encontradas equações para simulação dinâmica das máquinas síncronas.

4.1.1.6 Equação para a variação do fluxo no campo principal da máquina

Para a equação da tensão de campo V_{fd} definida em (4.71) tem-se:

$$r_{fd} E_{fd} = \frac{1}{\omega_0} \dot{\varphi}_{fd} + r_{fd} i_{fd} \quad (4.76)$$

Segundo (KIMBARK, 1956) tem-se que a tensão interna fictícia na armadura proporcional ao fluxo concatenado no campo em unidades definidas é a seguinte:

$$e'_q = \frac{\omega_0 M_{fd}}{L_{fdfd}} \varphi_{fd} \quad (4.77)$$

A fim de transformar para valores em p.u do sistema adotado, são obtidas as seguintes manipulações:

Dividindo-se ambos os membros de (4.77) por \hat{V} (tensão base da armadura) e multiplicando-se e dividindo-se o segundo membro por V_{fd} (tensão base do campo) tem-se,

$$\frac{e'_q}{\hat{V}} = \frac{M_{fd} V_{fd}}{\hat{V} L_{fdfd}} \frac{\omega_0 \varphi_{fd}}{V_{fd}} \quad (4.78)$$

Multiplicando-se e dividindo-se o segundo membro de (4.78) por $\omega_0 I_{fd}$ (sendo I_{fd} a corrente base do campo) tem-se,

€

$$\frac{e'_q}{\hat{V}} = \frac{\omega_0 I_{fd}}{\omega_0 I_{fd}} \frac{M_{fd} V_{fd}}{\hat{V} L_{fdfd}} \frac{\omega_0 \varphi_{fd}}{V_{fd}} \quad (4.79)$$

Agora em p.u do sistema adotado, a equação (4.77) fica:

$$e'_q = \frac{x_{ad}}{x_{fd}} \varphi_{fd} \quad (4.80)$$

Também pode ser considerando que:

$$T'_{d0} = \frac{x_{fd}}{\omega_0 r_{fd}} \quad (4.81)$$

Chamando-se $x_{ad}I_{fd}$ de E_I (Tensão proporcional a corrente de campo), a equação (4.76) fica na seguinte forma:

$$\dot{e}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} (E_{fd} - E_I) \quad (4.82)$$

Onde se tem a corrente i_{kd} e a Tensão proporcional a corrente de campo após algumas manipulações algébricas em (MOTA, 2006):

4.1.1.7 Equação expressas para a tensão proporcional à corrente de campo E_I

Sendo E_I igual a:

$$E_I = x_{ad}i_{fd} \quad (4.83)$$

Substituindo i_{fd} em (4.134), tem-se E_I igual a:

$$E_I = x_{ad} \left[\frac{x_{kd}\varphi_{fd} - x_{ad}\varphi_{kd}}{x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2} + \frac{x_{kd}x_{ad} - x_{ad}^2}{x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2} i_d \right] \quad (4.84)$$

Fazendo a substituição de φ_{fd} em E_I :

$$E_I = x_{ad} \left[\frac{x_{kd}x_{fd} / x_{ad} e'_q - x_{ad}\varphi_{kd}}{x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2} + \frac{x_{kd}x_{ad} - x_{ad}^2}{x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2} i_d \right] \quad (4.85)$$

Reescrevendo a equação (4.85).

$$E_I = e'_q \frac{x_{kd}x_{fd}}{x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2} - \varphi_{kd} \frac{x_{ad}^2}{x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2} + \frac{x_{kd}x_{ad} - x_{ad}^3}{x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2} i_d \quad (4.86)$$

Para o termo e'_q , tensão interna atrás da reatância transitória no eixo em quadratura, utiliza-se a relação:

$$1 + \frac{(x'_d - x''_d)(x_d - x'_d)}{(x'_d - x_l)^2} = \frac{x_{fd}}{(x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2)} \quad (4.87)$$

Para o termo em φ_{kd} , são utilizadas as seguintes relações:

$$x'_d - x_l = \frac{x_{ad}}{x_{fd}}(x_{fd} - x_{ad}) \quad (4.88)$$

$$x'_d - x''_d = \frac{x_{ad}^2}{x_{fd}} \frac{(x_{fd} - x_{ad})^2}{(x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2)} \quad (4.89)$$

que resultam em:

$$\frac{x_{ad}^2}{x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2} = \frac{(x_d - x''_d)}{(x'_d - x_l)}(x_d - x'_d) \quad (4.90)$$

Utilizando as relações (4.91) e (4.92):

$$1 - \frac{(x'_d - x''_d)}{(x'_d - x_l)} = \frac{x_{fd}(x_{kd} - x_{ad})}{(x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2)} \quad (4.91)$$

$$x_d - x'_d = \frac{x_{ad}^2}{x_{fd}} \quad (4.92)$$

E realizando determinadas operações, é obtida a equação (4.93):

$$\frac{x_{kd}x_{ad}^2 - x_{ad}^3}{x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2} = x_d - x'_d - \frac{(x_d - x''_d)}{(x'_d - x_l)}(x_d - x'_d) \quad (4.93)$$

Portanto, a expressão E_I pode ser escrita como:

$$E_I = e'_q \left[1 + \frac{(x_d - x''_d)(x_d - x'_d)}{(x'_d - x_l)^2} \right] + i_d \left[(x_d - x'_d) - \frac{(x_d - x''_d)(x_d - x'_d)}{x'_d - x_l} \right] K$$

$$L - \varphi_{kd} \left[\frac{(x_d - x''_d)(x_d - x'_d)}{(x'_d - x_l)^2} \right] \quad (4.94)$$

Ou, de forma reorganizada:

$$E_I = e'_q + (x_d - x'_d)i_d - \frac{(x_d - x''_d)(x_d - x'_d)}{(x'_d - x_l)^2} [\varphi_{kd} - e'_q + (x'_d - x_l)i_d] \quad (4.95)$$

Substituindo-se o terceiro termo da equação por i_{kd} ,

$$i_{kd} = \frac{\varphi_{kd} - e'_q + (x'_d - x_l)i_d}{(x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2) / x_{fd}} \quad (4.96)$$

Obtém-se:

$$E_I = e'_q + (x_d - x'_d)(i_d - i_{kd}) \quad (4.97)$$

Expressão para corrente i_{kd} tem-se que:

$$i_{kd} = \frac{-x_{ad}\varphi_{fd} + x_{fd}\varphi_{kd}}{x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2} + \frac{x_{fd}x_{ad} - x_{ad}^2}{x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2} i_d \quad (4.98)$$

Substituindo-se a expressão de φ_{fd} em (4.98):

$$i_{kd} = \frac{-e'_q x_{fd} + x_{fd}\varphi_{kd}}{x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2} + \frac{x_{fd}x_{ad} - x_{ad}^2}{x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2} i_d \quad (4.99)$$

$$i_{kd} = \frac{-e'_q + \varphi_{kd} + x_{ad} / x_{fd} (x_{fd} - x_{ad}) i_d}{(x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2) / x_{fd}} \quad (4.100)$$

A equação (4.100) torna-se:

$$i_{kd} = \frac{\varphi_{kd} - e'_q + (x'_d - x_l) i_d}{(x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2) / x_{fd}} \quad (4.101)$$

Portanto,

$$\frac{(x'_d - x_l)^2}{x'_d - x_d''} = \frac{(x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2)}{x_{fd}} \quad (4.102)$$

o que produz:

$$i_{kd} = \frac{(x'_d - x_d'')}{(x'_d - x_l)^2} [\varphi_{kd} - e'_q + (x'_d - x_l) i_d] \quad (4.103)$$

4.1.1.8 Equação para a variação do fluxo no circuito do ferro no eixo em quadratura

Das equações (4.73) a (4.75) tem-se:

$$0 = \frac{1}{\omega_0} \dot{\varphi}_e + r_e i_e \quad (4.104)$$

Similarmente, tem-se que a tensão proporcional ao fluxo concatenado no circuito do ferro em *p.u.* do sistema adotado é a seguinte:

$$e'_d = \frac{x_{aq}}{x_e} \varphi_e \quad (4.105)$$

Também pode ser considerando que:

$$T'_{q0} = \frac{x_e}{\omega_0 r_e} \quad (4.106)$$

E chamando-se $x_{aq} I_{fq}$ de E_{Iq} (Tensão proporcional a corrente do circuito do ferro no eixo em quadratura), a equação (4.104) fica na seguinte forma:

$$\dot{e}'_d = \frac{1}{T'_{q0}} (-E_{Iq}) \quad (4.107)$$

Equação para a variação do fluxo no enrolamento amortecedor do eixo direto das equações (4.70) a (4.72) tem-se:

$$0 = \frac{1}{\omega_0} \dot{\varphi}_{kd} + r_{kd} i_{kd} \quad (4.108)$$

Onde temos a corrente i_{kd} após algumas manipulações algébricas em (MOTA, 2006):

$$i_{kd} = \frac{(x'_d - x''_d)}{(x'_d - x_l)^2} [\varphi_{kd} - e'_q + (x'_d - x_l) i_d]$$

Usando-se a equação (4.108) e a expressão da corrente i_{kd} temos:

$$\dot{\varphi}_{kd} = -\omega_0 r_{kd} \frac{(x'_d - x''_d)}{(x'_d - x_l)^2} [\varphi_{kd} - e'_q + (x'_d - x_l) i_d]$$

Se expressa com algumas manipulações algébricas T''_d , temos:

$$T''_{d0} = \frac{1}{\omega_0 r_{kd}} \frac{(x'_d - x_l)^2}{(x'_d - x''_d)} \quad (4.110)$$

Agora a equação (4.109) pode ser escrita como:

$$\dot{\varphi}_{kd} = -\frac{1}{T''_{d0}} [\varphi_{kd} - e'_q + (x'_d - x_l) i_d]$$

4.1.1.9 Equação para a variação do fluxo no enrolamento amortecedor do eixo em quadratura

Similarmente, tem-se a variação do fluxo no enrolamento amortecedor do eixo direto:

$$\dot{\varphi}_{kq} = -\frac{1}{T''_{q0}} [\varphi_{kq} - e'_d + (x'_q - x_l) i_q] \quad (4.111)$$

4.1.1.10 Expressões para as componentes da tensão interna e'' :

A vantagem deste modelo é que a tensão interna da máquina pode ser calculada em função da variação dos fluxos calculados, como segue abaixo.

Expressão para tensão interna do eixo em quadratura e''_q :

Sendo:

$$e''_q = \frac{(x_{ad} x_{kd} - x_{ad}^2) \varphi_{fd} + (x_{ad} x_{fd} - x_{ad}^2) \varphi_{kd}}{x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2} \quad (4.112)$$

$$e'_q = \frac{x_{ad}}{x_{fd}} \varphi_{fd} \quad (4.113)$$

$$e''_q = \frac{(x_{kd} - x_{ad}) x_{fd} e'_q + (x_{ad} x_{fd} - x_{ad}^2) \varphi_{kd}}{x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2} \quad (4.114)$$

Considerando:

$$\frac{x''_d - x_l}{x'_d - x_l} = \frac{(x_{kd} - x_{ad}) x_{fd}}{x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2} \quad (4.115)$$

Substituindo na expressão de e_q'' .

$$e_q'' = \frac{x_d'' - x_l}{x_d' - x_l} e_q' + \varphi_{kd} \left(1 - \frac{x_d'' - x_l}{x_d' - x_l} \right) \quad (4.116)$$

Reorganizando a equação, tem-se que:

$$e_q'' = \varphi_{kd} + \left(\frac{x_d'' - x_l}{x_d' - x_l} \right) (e_q' - \varphi_{kd}) \quad (4.117)$$

Expressão para e_d'' :

De forma análoga:

$$e_d'' = -\varphi_{kd} - \left(\frac{x_q'' - x_l}{x_q' - x_l} \right) (e_d' - \varphi_{kq}) \quad (4.118)$$

4.1.1.11 Expressão para a tensão proporcional à corrente do circuito do ferro no eixo em quadratura:

De forma similar a E_l' :

$$E_{lq} = e_d' + (x_q - x_q') i_q - \frac{(x_q - x_q')(x_q - x_q'')}{(x_q' - x_l)^2} [\varphi_{kq} - e_d' + (x_q' - x_l) i_d] \quad (4.119)$$

4.2 Modelo de 6ª ordem utilizado para simulação dinâmica da máquina

As equações apresentadas neste item representam o modelo de sexta ordem para simulação dinâmica da máquina síncrona. Esse modelo é utilizado pelas empresas de energia para simulação do comportamento dinâmico dos sistemas de potência.

Equação para a variação do fluxo no campo principal da máquina, onde $\frac{de}{dt} = \&$:

$$\dot{\phi}_q = \frac{1}{T_{d0}'} (E_{fd} - E_f) \quad (4.120)$$

Equação para a variação do fluxo no circuito do ferro no eixo em quadratura:

$$\dot{\phi}_d = \frac{1}{T_{q0}'} (-E_{Iq}) \quad (4.121)$$

Equação para a variação do fluxo no enrolamento amortecedor do eixo direto:

$$\dot{\phi}_{kd} = -\frac{1}{T_{d0}''} [\varphi_{kd} - e_q' + (x_d' - x_l) i_d] \quad (4.122)$$

Equação para a variação do fluxo no enrolamento amortecedor do eixo em quadratura:

$$\dot{\phi}_{kq} = -\frac{1}{T_{q0}''} [\varphi_{kq} - e_d' + (x_q' - x_l) i_q] \quad (4.123)$$

Equação de oscilação da máquina síncrona:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) \quad (4.124)$$

5 SIMULADOR INTERATIVO DA ESTABILIDADE

Neste capítulo é apresentada a descrição dos princípios básicos, da fundamentação e operação do simulador de treinamento, bem como o desenvolvimento e a aplicabilidade da ferramenta computacional desenvolvida, com a demonstração dos procedimentos para construção da análise da estabilidade e a validação da metodologia através do software de análise de transitório eletromecânico (ANATEM-CEPEL).

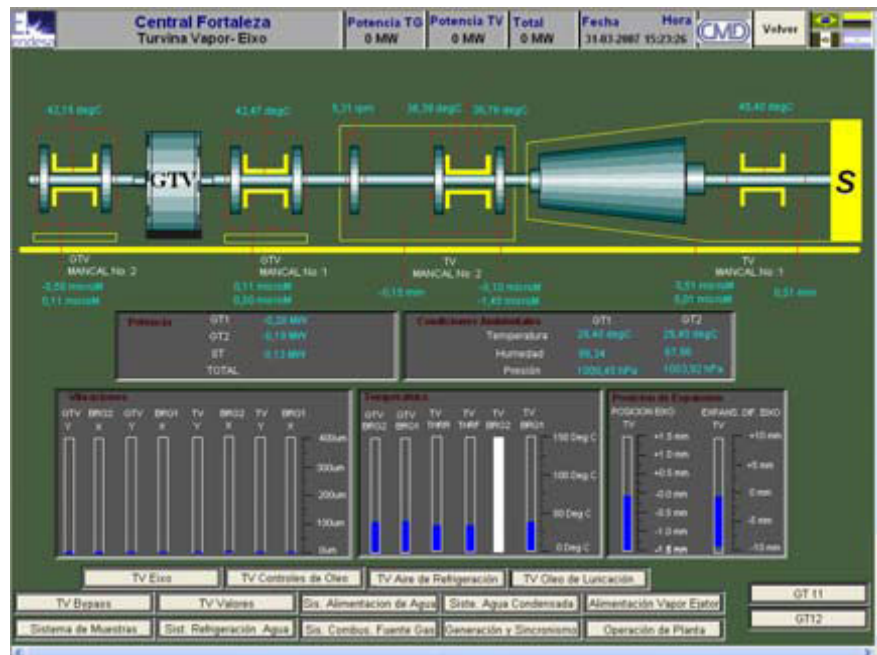
5.1 Simulador de treinamento de UTCC

Para operação interligada no SIN, o estudo da dinâmica do funcionamento da UTCC é imprescindível para uma operação segura. Contudo, a falta de técnicas específicas para o estudo desse tipo de operação, tem levado à utilização de modelagem, ferramentas computacionais e métodos de análise que não levam em conta as características específicas do funcionamento, parâmetros e operação interligada destas usinas. Tendo em conta esta afirmação, com o simulador é possível prever determinadas situações de funcionamento de um sistema, proceder à sua análise de estabilidade e o seu comportamento quanto à ocorrência de um defeito a partir da rede da UTCC existente e outras configurações.

O simulador interativo de UTCC para treinamento de operadores e mantenedores é um complemento da ferramenta desenvolvida com uma tecnologia de treinamento dinâmico de funcionamento, das contingências e dos defeitos da UTCC desenvolvido em 2007 e publicado em Nascimento (2008), com algumas modelagens inseridas no programa PI System da OSIsoft, que é um software de gerenciamento de informações de processos utilizado pela UTCC desenvolvidos para automatizar totalmente a coleta de dados, armazenamento, análise e apresentação das informações da planta de um processo.

Cumprе salientar, que o simulador acima aludido é empregado em processos de capacitação de pessoal, pesquisas, projeto, avaliação de esquemas térmicos de centrais termelétricas e sistemas de geração, funcionando como servidor para o armazenamento do histórico dos dados desses processos (NASCIMENTO, 2008).

Figura 5 – Simulador de Treinamento simulador de treinamento de UTCC



Fonte: NASCIMENTO (2008)

Neste ambiente de treinamento, simulando os eventos que poderão vir a ocorrer na operação de uma central termelétrica são demonstradas, as principais restrições operativas destas centrais e seus efeitos no sistema elétrico, possibilitando que o operador devidamente treinado possa tomar as providências necessárias e corretas no menor espaço de tempo, utilizando-se de uma modelagem específica pra UTCC de gás e vapor, com as seguintes dinâmicas:

- Partida da turbina a gás, que por ter acoplado em seu eixo um compressor, exige que o gerador funcione inicialmente como motor;
- Conjunto turbina a gás - regenerador - turbina a vapor levando em conta suas interações (pois são percorridos pelo mesmo fluxo de potência mecânica);
- Interações entre os rápidos controladores de velocidade das turbinas a gás e os reguladores de tensão dos geradores;
- Otimização do uso dos estabilizadores de sistemas de potência e de outros fenômenos exclusivos dessas usinas de ciclo combinado.

As telas são as mesmas vistas pelos operadores. Os dados são apresentados pelo PI ProcessBook, a partir do PI DataLink e calculados no Excel, tendo como base os dados históricos do PI Server (NASCIMENTO, 2008).

Outra parte do simulador é trabalhada nessa pesquisa com o desenvolvimento do estudo e as aplicações das condições de estabilidade na operação do sistema elétrico.

5.2 Características do simulador

Para simulações do comportamento da estabilidade dinâmica de um SEP, a rede de transmissão de energia caracteriza-se de maneira análoga ao fluxo de cargas. A máquina é interligada à rede por um circuito equivalente, tensão interna atrás de uma reatância, em que o valor de tensão interna varia de acordo com a modelagem escolhida. Na interligação das máquinas à rede, as componentes reais e imaginárias de tensão e corrente devem estar em mesmo eixo de referência (MOTA, 2006).

A solução de um fluxo de carga se faz necessário para obtenção das condições iniciais do sistema em estudo, fornecendo tensão e potência para cada barramento na referência adotada para o sistema.

Em regime permanente, todas as derivadas são nulas e os estados permanecem constantes. Após a ocorrência de uma perturbação, estabelece-se um período transitório no qual o sistema se move do seu estado inicial para um regime permanente final, no caso do sistema ser estável. A forma desta variação dos estados é a resposta transitória do sistema.

O problema de simulação de transitório eletromecânico consiste na obtenção da solução do conjunto equação algébrico-diferencial que descreve o comportamento das máquinas síncronas e equipamentos (com seus respectivos controles) das redes elétricas CA e/ou CC.

Para visualizar a resposta transitória do sistema o simulador desenvolvido recorre a exemplos práticos e representativos para o estudo da estabilidade de um SEP, utilizando métodos numéricos como o Euler, Euler modificado e Runge-Kuta para solução das equações algébrico-diferencial.

5.3 Simulação dinâmica do gerador ligado à rede de transmissão

Para simulação dinâmica do gerador ligado à rede de transmissão, a simulação é feita de maneira equivalente ao fluxo de cargas. A máquina é interligada à rede através do seu circuito equivalente, tensão interna atrás de uma reatância, onde o valor da tensão interna varia de acordo com o modelo escolhido.

São necessários os cálculos para as condições iniciais do sistema com os valores do fluxo de carga normalmente fornecidos de cada barramento em relação a uma referência:

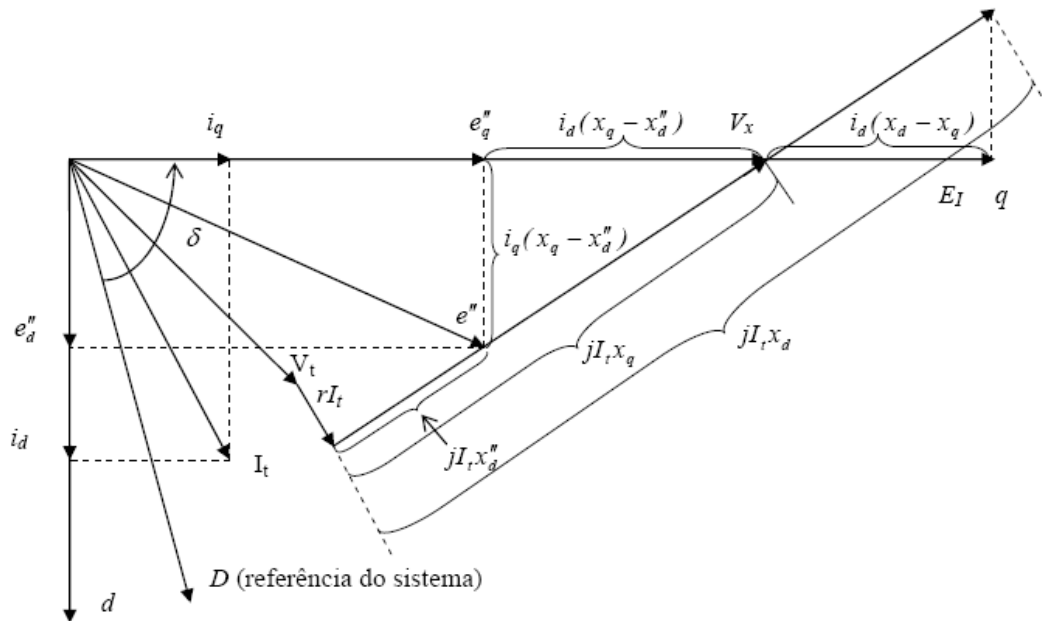
Tem-se,

$$I_{t0} = \frac{Pi - jQi}{V_t^*} \quad (5.1)$$

A tensão interna da máquina é inicialmente calculada por:

$$E_0'' = V_t + r_a I_{t0} + jx_d'' \quad (5.2)$$

Figura 6 – Diagrama fasorial da máquina síncrona em regime permanente



Fonte: Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência. MOTA – (2006).

O aspecto dinâmico do sistema parte da combinação dos modelos dos geradores, dos reguladores de tensão, turbinas e reguladores de velocidade os quais afetam a rede através da tensão interna da máquina (E'') e a equação de oscilação pela potência mecânica. Cada um desses equipamentos é caracterizado por um conjunto de equações diferenciais de estado, com suas formulações e manipulações algébricas descritas no capítulo anterior.

Calcula-se o valor da tensão interna do gerador em função das variáveis de estados φ_{kd} , e_d' , φ_{kq} e e_q' :

$$e_d'' = -\varphi_{kd} - \left(\frac{x_q'' - x_l}{x_q' - x_l} \right) (e_d' - \varphi_{kq}) \quad (5.3)$$

$$e_q'' = \varphi_{kd} + \left(\frac{x_d'' - x_l}{x_d' - x_l} \right) (e_q' - \varphi_{kd}) \quad (5.4)$$

$$E'' = e_d'' + je_q'' \quad (5.5)$$

Neste ponto, com os valores de E'' calculados, computam-se as correntes terminais das máquinas I_t e as tensões de barra V através da solução da rede de transmissão similarmente a um fluxo de carga. Transformando valores de referência de coordenadas de eixo da máquina para o eixo do sistema e vice-versa.

A rede pode ser descrita pela seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_b \\ \bar{I}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11}^{-1} & -\bar{Y}_{11}^{-1}\bar{Y}_{12} \\ \bar{Y}_{21}\bar{Y}_{11}^{-1} & -\bar{Y}_{22}\bar{Y}_{21}\bar{Y}_{11}^{-1}\bar{Y}_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_b \\ \bar{E} \end{bmatrix}$$

Onde valor de \bar{E} pode ser para modelagem da máquina de 6ª ou 3ª ordem.

Daí computa-se as seguintes equações:

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_0 \quad (5.6)$$

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) \quad (5.7)$$

em que:

$$P_e = \text{Re}(E'' I_t^*) \quad (5.8)$$

Obtendo a equação de oscilação através dos métodos de resolução das equações diferenciais.

5.3.1 Métodos numéricos das equações diferenciais para simulação dinâmica da máquina

O modelo matemático para simulação digital consiste de equações algébricas e diferenciais as quais descrevem o comportamento dinâmico das máquinas, sistemas de excitação, turbinas, reguladores de velocidade e equações que descrevem a rede interligada de linhas, cargas etc., formando um conjunto complexo de equações diferenciais e algébricas não lineares.

Além da importância de saber se a estabilidade de um sistema é ou não mantida após a ocorrência de um defeito, interessa-nos conhecer o tempo de atuação crítico. Este tempo de atuação crítico é importante para o ajuste do sistema de proteção para eliminação do defeito num tempo inferior ao tempo crítico.

Para a obtenção do referido tempo são utilizados métodos numéricos para a resolução da equação de oscilação da máquina síncrona.

As equações diferenciais nas simulações do comportamento dinâmico de sistemas de potência podem ser resolvidas com diversos métodos numéricos descritos abaixo.

5.3.1.1 Método de euler

Dada uma equação diferencial de 1ª ordem $f(t,y)$, onde t é a variável independente e y a dependente, a solução será da forma $y = g(t,c)$, em que “c” é uma constante determinada pelas condições iniciais (STAGG; EL-ABIAD,1968).

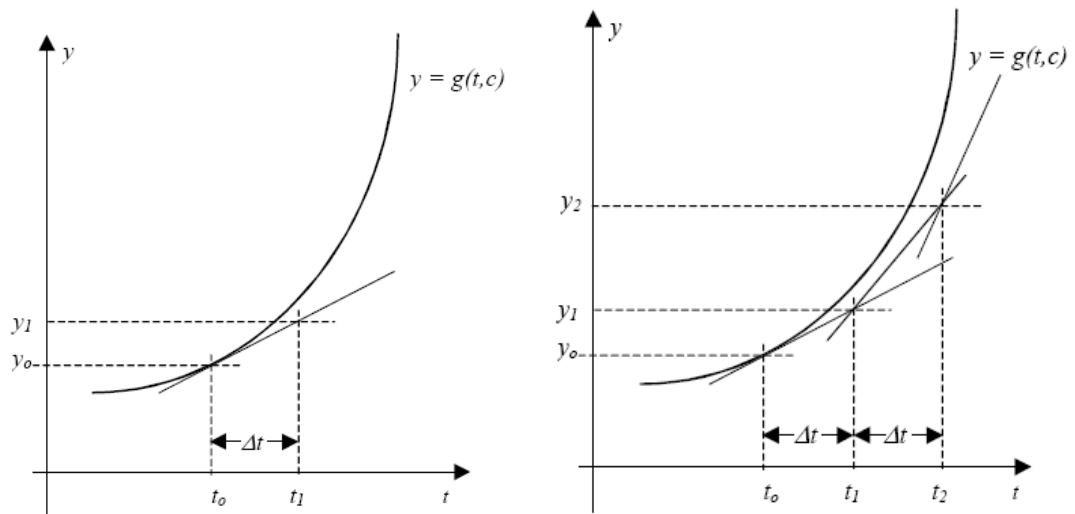
Desde que tenhamos uma curva suave e contínua, pequenos segmentos podem ser considerados como linhas retas vista na figura 7.

Para um ponto inicial (t_0, y_0) na curva, uma variação de y pode ser calculada por $\Delta y = \left. \frac{dy}{dt} \right| \Delta t$ em que dy/dt é a declividade da curva em (t_0, y_0) e pode ser obtida por substituição de (t_0, y_0) na equação diferencial $\frac{dy}{dt} = f(t, y)$, e Δt é a variação do tempo (Intervalo de integração). Então, $y_1 = y_0 + \left. \frac{dy}{dt} \right| \Delta t$

Logo, dado um valor inicial (t_0, y_0) , um novo valor de y pode ser calculado para um dado Δt : $y_2 = y_1 + \left. \frac{dy}{dt} \right|_1 \Delta t$, $y_3 = y_2 + \left. \frac{dy}{dt} \right|_2 \Delta t$ e assim por diante, apresentadas na figuras

7.

Figura 7 – Representação gráfica de um e de vários passos da integração numérica



Fonte: Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência. MOTA – (2006)

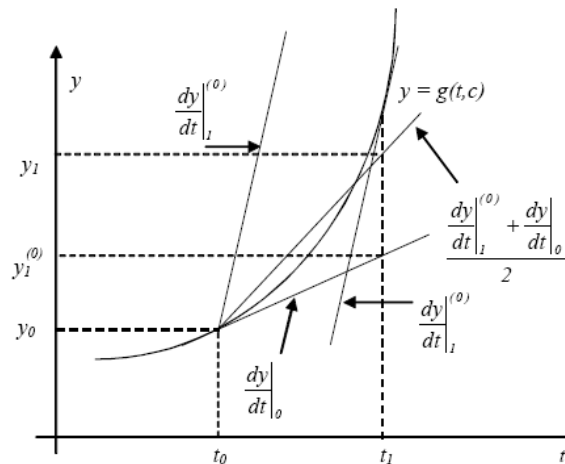
5.3.1.2 Método de euler modificado

No método de Euler, dy/dt calculado no início do intervalo permanece constante durante todo intervalo.

Um melhoramento pode ser obtido calculando-se um novo valor de dy/dt no fim do intervalo e considerando-se a média dos dois para o cálculo de y como segue:

$$y_{(t+\Delta t)} = y_{(t)} + \left[\frac{\frac{dy}{dt} \Big|_{(t)}}{2} + \frac{\frac{dy}{dt} \Big|_{(t+\Delta t)}}{2} \right] \Delta t \text{ e assim por diante, veja a ilustração na figura 8.}$$

Figura 8 – Representação gráfica do método de Euler modificado



Fonte: Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência. MOTA – (2006)

5.3.1.3 Método de Runge-Kutta

No método de Runge-Kutta os incrementos nos valores das variáveis dependentes são calculados a partir de um conjunto de fórmulas expressas em termos das derivadas calculadas num conjunto de pontos pré-fixados, uma vez que cada valor de y é determinado pelas fórmulas de uma maneira parecida.

Este método não requer, assim, repetidas aproximações como no método de Euler modificado. A sua principal vantagem tem a ver com o fato de que só é necessário conhecer o valor da função num único ponto (o inicial), para se poder determinar os seus valores nos pontos seguintes.

As fórmulas são derivadas usando uma dada aproximação para o desenvolvimento em série de Taylor da função.

Considera-se novamente um sistema de equações diferenciais de primeira ordem, que pode ser escrita na forma vetorial,

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y) \quad (5.9)$$

Sob o nome *métodos Runge-Kutta de ordem n* inclui-se todos os métodos de solução numérica de sistemas representados pela eq.(5.10) que para calcular x_{j+1} usam apenas o conhecimento de x_j . Isto exclui, por exemplo, o algoritmo de Verlet, que necessita de x_j e x_{j-1} para calcular x_{j+1} . O método de Euler, por exemplo, é um Runge-Kutta de 1^ª ordem.

Consideremos novamente o método de Euler,

$$x_{j+1} = x_j + \Delta t \cdot f(x_j, t_j) \quad (5.10)$$

Por simetria, é claro que igualmente válido seria escolher para argumento da f o extremo à direita do intervalo $[x_j, t_{j+1}]$, isto é, escrever,

$$x_{j+1} = x_j + \Delta t \cdot f(x_{j+1}, t_{j+1}) \quad (5.11)$$

Naturalmente, espera-se que soluções melhores sejam obtidas com uma forma intermediária entre as das equações, eq.(5.10) e eq.(5.11), ou seja,

$$x_{j+1} = x_j + \Delta t \cdot f\left(\frac{x_j + x_{j+1}}{2}, \frac{t_j + t_{j+1}}{2}\right) \quad (5.12)$$

A dificuldade que se apresenta é que não se conhece x_{j+1} para usar no argumento da f . Um procedimento possível é usar a eq.(5.10) para obter uma primeira aproximação par x_{j+1} a ser usado no argumento da f , ou seja,

$$x_{j+1} = x_j + \Delta t \cdot f(x_j + 0,5\Delta t, f(x_j, t_j + 0,5\Delta t)) \quad (5.13)$$

A eq.(5.14) é uma **Runge-Kutta 2ª ordem**, também chamada de "Euler modificada (BRUNET, 2011).

5.3.1.4 Comparação dos métodos

O método de Euler é o mais simples, mas também muito impreciso, a não ser que se utilize um intervalo suficientemente pequeno. Este método de Euler modificado é também simples de aplicar e tem a vantagem de se poder controlar o grau de proximidade das sucessivas aproximações obtidas. Tem contudo, também uma precisão limitada e exige pequenos intervalos para a variável independente.

O método Runge-Kutta exige um elevado número de operações aritméticas, mas os resultados são os mais precisos.

5.4 Análise pela equação de oscilação da máquina síncrona

Para esta análise, verifica-se se o sistema é estável ou não após a ocorrência de um defeito com a obtenção do deslocamento angular entre as máquinas de um SEP durante um transitório. Para isso, é necessária a resolução da equação diferencial que descreve o movimento do rotor de cada máquina síncrona, que serão definidos e analisados em seguida (MOTA, 2006).

A relação entre o torque T_l e a aceleração angular mecânica θ_m é dada por:

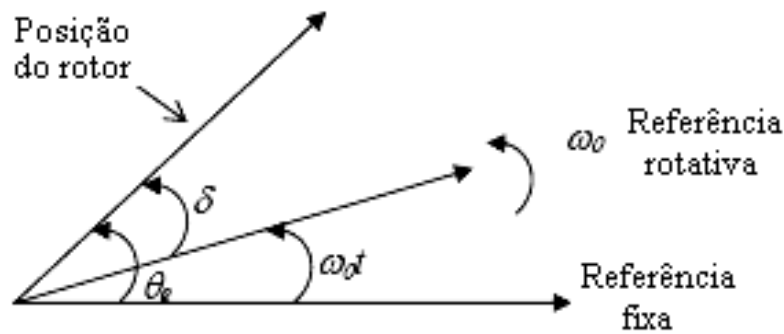
$$T_l = J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} \quad (5.14)$$

Estando a máquina funcionando como um gerador, quando o torque mecânico da turbina é maior que o torque elétrico de frenagem, o torque de aceleração é positivo. Logo, a seguinte expressão é válida para o torque líquido:

$$T_l = T_m - T_{el} \quad (5.15)$$

Se o torque mecânico for menor que o torque elétrico, a aceleração é negativa e o gerador desacelera. Em regime permanente, os torques são iguais, portanto, a velocidade é constante e a aceleração é nula. Considerando a variação do ângulo mecânico em relação a uma referência girando à velocidade síncrona, define-se um sistema de referência:

Figura 9 – Sistema de referência para medição da posição do rotor



Fonte: Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência. MOTA – (2006)

De acordo com o sistema de referência adotado, com δ sendo o ângulo de torque, a velocidade angular é estabelecida por:

$$\delta = \theta_e - \omega_0 t \quad (5.16)$$

Derivando a equação (5.16) em função do tempo:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta_e}{dt} - \omega_0 \quad (5.17)$$

Logo, a aceleração angular é expressa por:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2\theta_e}{dt^2} \quad (5.18)$$

O ângulo elétrico, θ_e , medido com relação a uma referência fixa, é relacionado com o ângulo mecânico do rotor, θ_m , através da equação (5.19):

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad (5.19)$$

em que P é o número de polos da máquina. A frequência em hertz é definida como:

$$f = \frac{P}{2} \left(\frac{rpm}{60} \right) \quad (5.20)$$

Reorganizando as equações, é possível obter θ_e em função da frequência e da velocidade.

$$\theta_e = \frac{60f}{rpm} \theta_m \quad (5.21)$$

Reescrevendo a equação (5.15) tem-se.

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_l \quad (5.22)$$

A equação de oscilação em termos do ângulo elétrico torna-se, portanto:

$$J \frac{rpm}{60f} \frac{d^2 \theta_e}{dt^2} = T_l \quad (5.23)$$

Na referência rotativa o torque líquido é expresso como:

$$T_l = J \frac{rpm}{60f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (5.24)$$

O torque em *p.u.* será o torque líquido dividido pelo torque base.

$$T_l(p.u.) = \frac{T_l}{T_{BASE}} = \frac{T_l}{P_{BASE} / \omega} \quad (5.25)$$

O que resulta no torque igual a:

$$T_l(p.u.) = \frac{2\pi J (rpm)^2}{f P_{BASE} (60)^2} \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (5.26)$$

A constante de inércia expressa como H , é definida como a energia cinética em MW ou MJ à velocidade nominal, armazenada nas partes girantes por MVA. Ela corresponde ao tempo necessário para que a máquina saia do repouso e atinja sua velocidade síncrona, quando é aplicada aos seus terminais sua potência aparente nominal.

$$H = \frac{E}{P_{BASE}} = \frac{\frac{1}{2} J (\omega)^2}{P_{BASE}} = \frac{\frac{1}{2} J \left(\frac{2\pi \text{rpm}}{60} \right)^2}{P_{BASE}} \quad (5.27)$$

Substituindo a constante H na expressão do torque:

$$T_l = \frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (5.28)$$

Como o torque líquido atuante no rotor é dado pela diferença entre o torque mecânico proveniente da turbina e o torque elétrico fornecido pelo gerador, a equação de oscilação pode ser expressa por (5.29).

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) \quad (5.29)$$

5.5 Análise pelo critério de igualdade de área

Uma avaliação aproximada e rápida da estabilidade transitória de um sistema com uma máquina oscilando com relação a uma barra infinita, a qual evita a solução de equações diferenciais para determinar se o ângulo de torque crescerá indefinidamente ou se oscilará em torno de um ponto de operação, isto é: se o sistema é estável ou não, através do denominado “critério de igualdade de áreas” (MOTA, 2006).

Na análise pelo método anterior, se um sistema for instável o ângulo de carga crescerá indefinidamente com o tempo e a máquina perderá o sincronismo. Por outro lado, se o sistema for estável no tempo, o ângulo de carga oscilará com oscilações amortecidas, devido à existência de amortecimento, atingindo um valor máximo na primeira oscilação diminuindo de amplitude em seguida.

O critério de igualdade de área, embora simples, apenas é aplicado para um sistema com uma máquina, permitindo verificar a análise de estabilidade do SEP. Em alguns casos, é possível simplificar um sistema com mais do que uma máquina a um sistema equivalente (máquina síncrona ligada a um barramento de potência infinita), tornando-se assim, possível a aplicação do estudo desse método.

Para a equação de oscilação de uma máquina síncrona ligada a uma barra infinita,

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H}(P_m - P_e) \quad (5.30)$$

em que $(P_m - P_e)$ é a potência de aceleração.

Multiplicando-se ambos os lados por $2 d\delta/dt$, tem-se,

$$2 \frac{d\delta}{dt} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H}(P_m - P_e) 2 \frac{d\delta}{dt}$$

Integrando ambos os lados, tem-se:

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\frac{\omega_0}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta} \quad (5.31)$$

Em que δ_0 é o ângulo rotórico, quando a máquina funciona em sincronismo, antes da perturbação ocorrer, momento em $d\delta/dt = 0$. O ângulo δ deixará de variar e o gerador funciona novamente em regime de sincronismo depois da perturbação, quando $d\delta/dt = 0$ (MOTA, 2006).

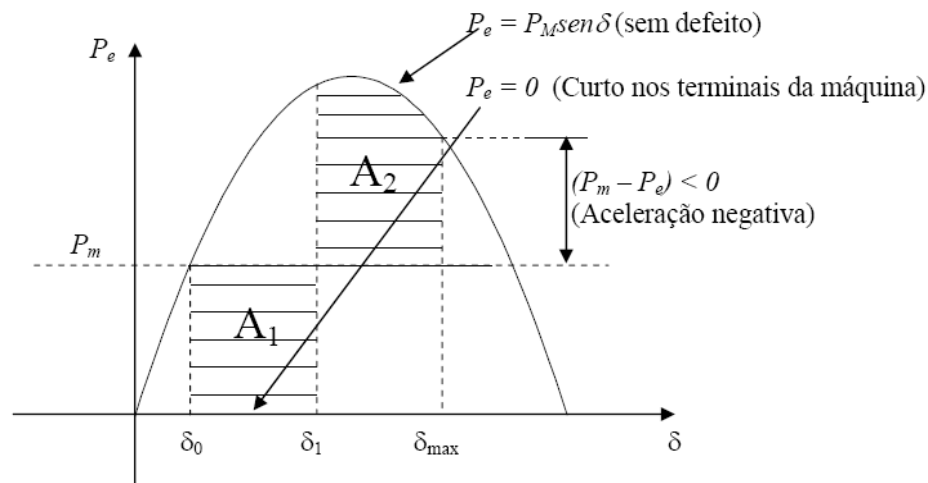
Para que haja estabilidade, esta velocidade rotativa deve ser nula quando a aceleração for nula ou estiver se opondo ao movimento do rotor. Então, para um rotor que está se acelerando, a condição de estabilidade é que exista um valor de δ_{max} tal que:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{max}} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (5.32)$$

$(P_m - P_e)_{\delta_{max}} \leq 0$ ou seja, potência elétrica maior ou igual à potência mecânica.

A equação (5.32) pode ser interpretada como a área sob a curva entre δ_0 e δ_{max} , como ilustrado na figura 10, quando um curto circuito trifásico é aplicado nos terminais da máquina e auto-eliminado posteriormente. Portanto, para que a equação seja atendida, a área A1 deve ser igual a A2 e de sinal contrário (MOTA, 2006).

Figura 10 – Potência elétrica traçada como função de δ , com $P_e > P_m$ em δ_{max} , sistema estável

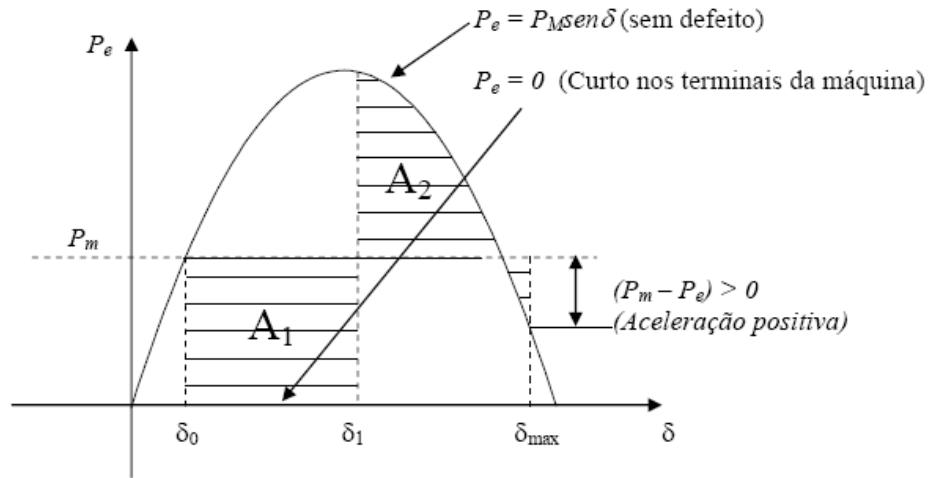


Fonte: Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência. MOTA – (2006)

5.5.1 Condição de estabilidade através das áreas

- 1) Em δ_{max} , a potência de aceleração ($P_m - P_e$) deve ser nula ou negativa. Isto é, $P_e > P_m$, verifica-se, assim, se o sistema é estável.
- 2) Caso a potência de aceleração mude de sinal antes de A2 ser igual a A1, isto é, $P_m > P_e$ em δ_{max} , assim o sistema é instável.
- 3) A situação limite entre estabilidade e instabilidade é quando $P_m = P_e$.

Figura 11 – Potência elétrica traçada como função de δ , com $P_e < P_m$ em δ_{max} , sistema instável.



Fonte: Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência. MOTA – (2006)

5.5.2 Cálculo do ângulo crítico de extinção de faltas através do critério de áreas

O ângulo crítico identifica para o sistema o limite da estabilidade. Considere um caso geral em que exista uma sequência de três situações: Sistema sem defeito, sistema com defeito e sistema pós defeito.

O ângulo crítico δ_c para extinção do defeito é obtido quando $A1 = A2$ que corresponde a $P_m = P_e$ em δ_{lim} (ângulo de torque limite para que seja mantido a estabilidade).

Cálculo de $A1$:

$$A1 = P_m (\delta_c - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_c} r_1 P_M \sin \delta d\delta = P_m (\delta_c - \delta_0) + r_1 P_M (\cos \delta_c - \cos \delta_0) \quad (5.33)$$

Cálculo de $A2$:

$$A2 = \int_{\delta_c}^{\delta_{lim}} r_2 P_M \sin \delta d\delta - P_m (\delta_{lim} - \delta_0) = r_2 P_M (\cos \delta_c - \cos \delta_{lim}) + P_m (\delta_{lim} - \cos \delta_c) \quad (5.34)$$

Igualando-se $A1$ a $A2$, vem que:

$$\delta_c = \arccos \left\{ \frac{[(P_m / P_M)(\delta_{lim} - \delta_0) + r_2 \cos \delta_{lim} - r_1 \cos \delta_0]}{r_2 - r_1} \right\} \quad (5.35)$$

Em que,

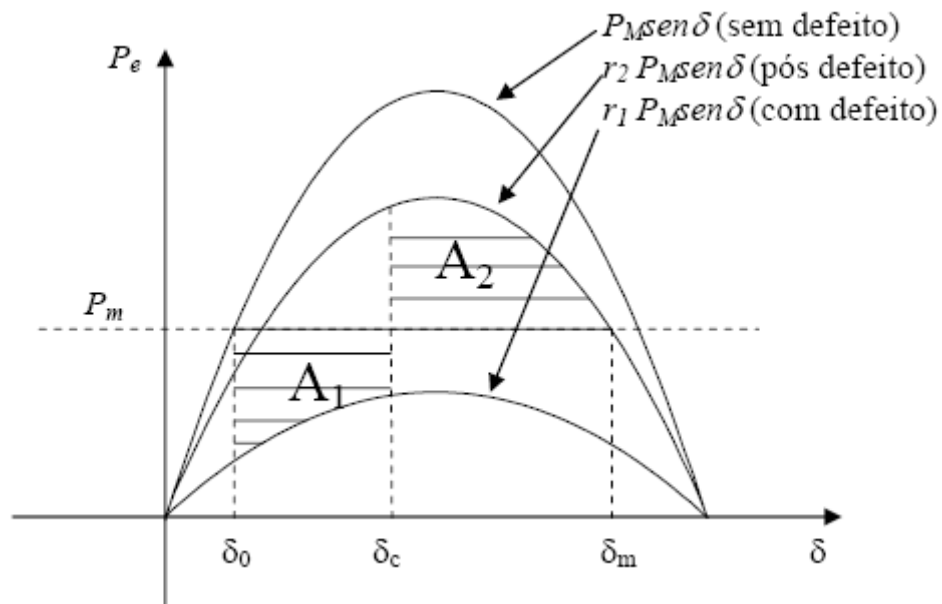
$$\delta_0 = \arcsen(P_m / P_M) < \pi / 2 \quad (5.36)$$

$$\delta_{lim} = \arcsen(P_m / r_2 P_M) > \pi / 2 \quad (5.37)$$

r_1 =relação entre o pico da potência elétrica do sistema com defeito e P_M .

r_2 =relação entre o pico da potência elétrica do sistema pós-defeito e P_M .

Figura 12 – Curva P_e x δ (ângulo crítico para extinção de defeito)



Fonte: Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência. MOTA – (2006)

5.5.3 Cálculo de tempo crítico de extinção de faltas através do critério de áreas

A partir da equação de oscilação da máquina síncrona, integram-se ambos os lados e obtém-se a velocidade na referência rotativa, que apenas é válida quando a potência de aceleração ($P_m - P_e$) é constante.

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\omega_0}{H} \int_0^t (P_m - P_e) dt \quad (5.38)$$

A integração acima só tem solução, caso a perturbação seja um curto-circuito fraco (STEVENSON, 1986).

Assim tem-se,

$$d\delta = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) t dt \quad (5.39)$$

Integrando-se novamente, verifica-se o deslocamento angular:

$$\int_{\delta_0}^{\delta} d\delta = \int_0^t \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) t dt$$

$$\delta - \delta_0 = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) \frac{t^2}{2} \quad (5.40)$$

Como $\delta = \delta_c$ corresponde a $t = t_c$, tem-se:

$$t_c = \sqrt{\frac{4H(\delta_c - \delta_0)}{\omega_0(P_m - P_e)}} \quad (5.41)$$

Quando o curto-circuito é através de uma reatância, o cálculo do ângulo crítico é obtido por:

$$t_c = \sqrt{\frac{4H(\delta_c - \delta_0)}{\omega_0 P'_m}} \quad (5.42)$$

Sendo P'_m , dado por $P'_m = P_m + \frac{r_1 P_M (\cos \delta_c - \cos \delta_0)}{(\delta_c - \delta_0)}$.

5.6 Análise do projeto no Power System Stabilizers (PSS)

As oscilações eletromecânicas são fenômenos extremamente indesejáveis, pois reduzem a quantidade de potência transmitida, diminuem consideravelmente a vida útil das máquinas e pioram a estabilidade do sistema de potência.

Dessa forma, a presença destas oscilações aumenta os riscos de paradas não programadas, diminuindo assim a disponibilidade de geração do sistema. Entretanto, como estes efeitos estão relacionados tanto à natureza física dos sistemas de potência como às influências externas, eles não podem ser evitados, restando, portanto, a tentativa de controle do amortecimento das oscilações eletromecânicas, para minimização dos seus efeitos danosos.

Para diminuir os efeitos das oscilações eletromecânicas é necessário inserir um PSS, que se baseia na determinação das constantes de tempo T_1 e T_2 de forma que o compensador proporcione um avanço ou atraso de fase ao sinal de velocidade, que reduz o atraso de fase provocado pelo conjunto Gerador, Excitatriz e Sistema Elétrico (GEP), através das equações (5.43) e (5.44), tendo ainda o filtro para baixas frequências (*washout*), que tem por finalidade impedir que as variações de velocidade em regime permanente modifiquem a tensão terminal da máquina e o ganho K do estabilizador (OGATA, 2002).

$$T_1 = aT_2 \rightarrow T_2 = \frac{1}{W_{osc}\sqrt{a}} \quad (5.43)$$

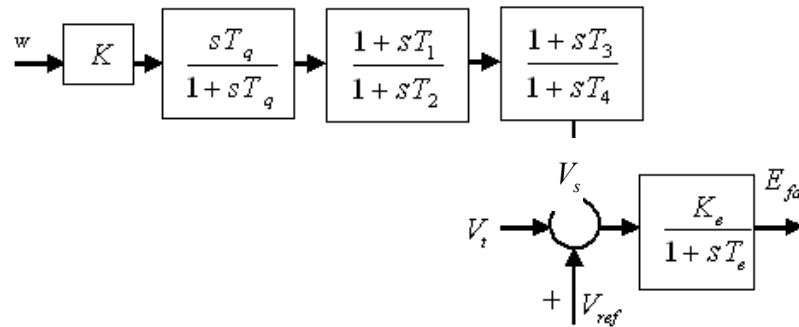
$$a = \frac{1 + \sin\theta}{1 - \sin\theta} \quad (5.44)$$

A constante de tempo do circuito *washout* é determinada de forma a garantir que o regulador de tensão não seja afetado para erros prolongados de baixa frequência na velocidade. Para o PSS que será demonstrado nesse trabalho, deseja-se eliminar ruídos de frequência 12 vezes menor do que a frequência de oscilação. A equação (5.45) ilustra o cálculo da constante de tempo do filtro *washout* (MOTA, 2010).

$$T_q = \frac{1}{\frac{2\pi f_{osc}}{12}} \approx 1.5s \quad (5.45)$$

O PSS está representado por diagramas de blocos na figura 13. Os blocos representam o ganho K do estabilizador, um bloco de filtragem e dois blocos de compensação avanço/atraso (constantes de tempo T_p , T_2 , T_3 e T_4).

Figura 13 – Modelo do PSS em série com o sinal de velocidade (MOTA, 2006)



Fonte: Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência. MOTA – (2006)

5.7 Implementação do estabilizador de sistema de potência no anatem

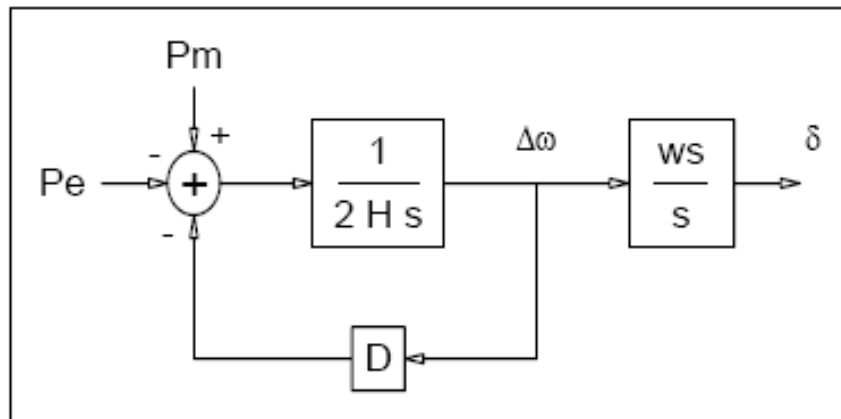
No projeto do PSS utilizou-se modelos das máquinas síncronas de 3ª e 6ª ordem para cálculo implementado no software de Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM), do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica ligado ao sistema Eletrobrás e vinculado ao Ministério de Minas e Energia. Este programa é uma aplicação computacional para a realização de estudos de estabilidade para a operação e planejamento de SEP. O software utiliza o modelo não linearizado da máquina o que possibilitará testar a eficiência dos controladores projetados no segundo caso do capítulo seguinte. A execução das simulações através do ANATEM faz uso de quatro arquivos com extensões: *.sav, *.blt, *.cdu e *.stb.

Suas informações são obtidas através de caso analisado de fluxo de potência gravado com o programa de Análise de Redes (ANAREDE) também do CEPEL. O arquivo gerado pelo ANAREDE tem extensão *.sav. Este arquivo representa as condições iniciais do sistema, ou seja, em regime permanente.

Os modelos e controladores relativos às máquinas encontram-se dentro do arquivo cuja extensão é *.blt. No entanto, como o PSS não se enquadrava nos modelos pré-definidos e o objetivo do projeto era obter parâmetros que representassem com mais exatidão o PSS que está aplicado na usina, foi construído, através de CDU, um novo modelo de PSS.

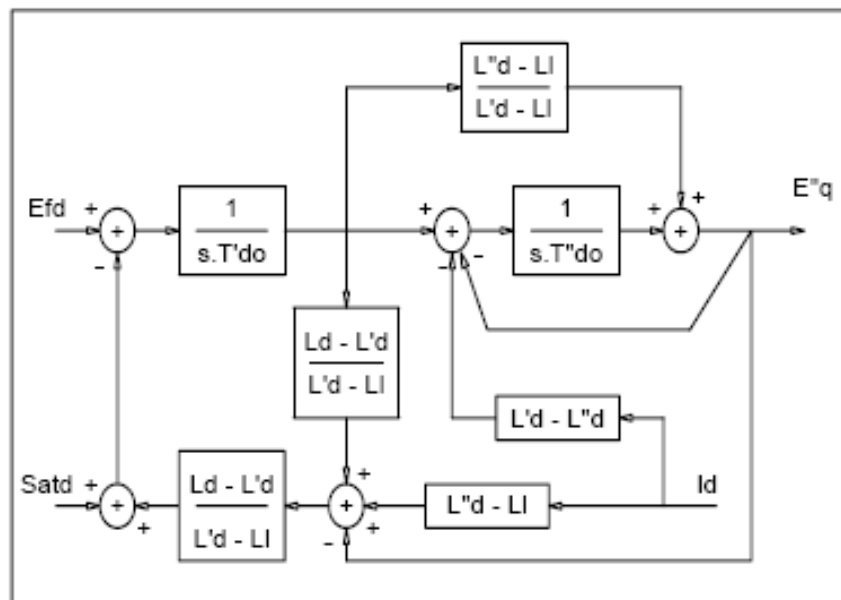
O CDU é um controlador definido pelo usuário, construído a partir de blocos, onde se encontram os reguladores e estabilizadores. No arquivo STB é definido o elemento e o tipo de perturbação que será aplicada. Além de carregar os demais arquivos para execução.

Figura 14 –Diagrama de blocos da equação de oscilação eletromecânica



Fonte: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Eletrobras Cepel (2010)

Figura 15 –Diagrama de blocos de gerador síncrono eixo direto (CEPEL, 2010)



Fonte: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Eletrobras Cepel (2010)

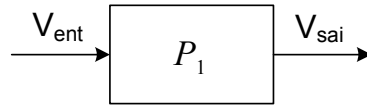
5.7.1 CDU – Controlador Definido pelo Usuário

As descrições dos blocos usados para construção do PSS na forma de CDU são:

- a) Bloco GANH0

É responsável por multiplicar a variável V_{ent} pelo ganho. A sua saída é definida por V_{sai} .

Figura 16 – Bloco do ganho.



Fonte: Linguagem própria CDU do Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM).

Equação relativa ao bloco do ganho:

$$V_{sai}(t) = P_1 * V_{ent}(t)$$

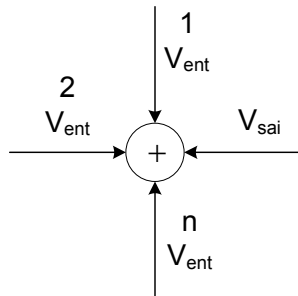
- Implementação Computacional:

```
(-----  
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin)(vmax)  
(-----  
0007 GANHO      X6  X7  #Tw4
```

b) Bloco SOMA

As variáveis de entrada V_{ent} são somadas e tem como resultado uma única variável de saída V_{sai} .

Figura 17 – Bloco da soma.



Fonte: Linguagem própria CDU do Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM).

- Equação relativa ao bloco da soma:

$$V_{sai} = \pm V_{ent}^1 \pm V_{ent}^2 \pm K \pm V_{ent}^n$$

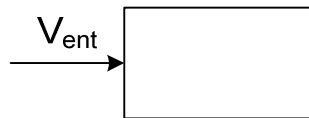
- Implementação Computacional:

```
(-----
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin)(vmax)
(-----
0005 SOMA      X4  X5
           X8  X5
```

c) Bloco EXPORT

O valor da variável V_{ent} é exportado para o componente ao qual o CDU está conectado.

Figura 18 – Bloco export.



Fonte: Linguagem própria CDU do Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM).

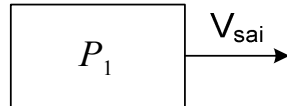
- Implementação Computacional:

```
(-----
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin)(vmax)
(-----
0019 EXPORT VSAD  Vsad
```

d) Bloco IMPORT

O valor da variável V_{sai} é importado do local remoto definido por P_1 ou do componente ao qual o CDU está conectado, caso P_1 seja deixado em branco.

Figura 19 – Bloco import.



Fonte: Linguagem própria CDU do Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM).

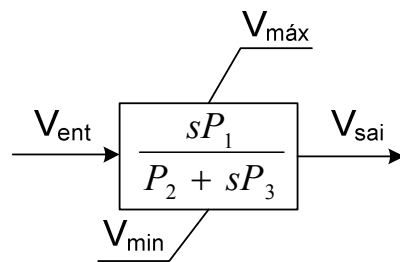
- Implementação Computacional:

```
(-----
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin)(vmax)
(-----
0001 IMPORT DWMAQ      Dw
0002 IMPORT PELE      Pe
```

e) Bloco WSHOUT

De acordo com o filtro projetado, na função abaixo, P_1 é igual a P_3 e P_2 é igual a um.

Figura 20 – Bloco washout.



Fonte: Linguagem própria CDU do Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM).

- Equações relativas ao bloco washout:

$$Y(s) = \frac{-\frac{P_1 P_2}{P_3}}{P_2 + sP_3} V_{ent}(s)$$

$$Y(t) < V_{\min} \rightarrow Y(t) = V_{\min}$$

$$Y(t) > V_{\max} \rightarrow Y(t) = V_{\max}$$

$$V_{sai}(t) = \frac{P_1}{P_3} V_{ent}(t) + Y(t)$$

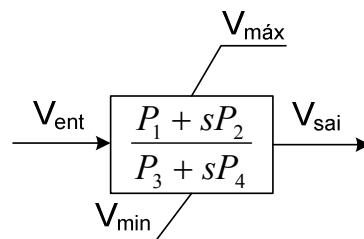
- Implementação Computacional

```
(-----
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin)(vmax)
(-----
0003 WSHOUT   Dw   X3   #Tw1   1.0#Tw1
0004 WSHOUT   X3   X4   #Tw2   1.0#Tw2
```

f) Bloco LEDLAG

A função avanço-atraso é representada pelo bloco ladlag, que possui seus parâmetros $P1$ a $P4$. A variável de entrada é V_{ent} e sua saída V_{sai} .

Figura 21 – Bloco ledlag.



Fonte: Linguagem própria CDU do Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM).

- Equações relativas ao bloco Ledlag:

$$Y(s) = \frac{P_1 - \frac{P_2 P_3}{P_4}}{P_3 + sP_4} V_{ent}(s)$$

$$Y(t) < V_{\min} \rightarrow Y(t) = V_{\min}$$

$$Y(t) > V_{\max} \rightarrow Y(t) = V_{\max}$$

$$V_{sai}(t) = \frac{P_2}{P_4} V_{ent}(t) + Y(t)$$

- Implementação Computacional:

```

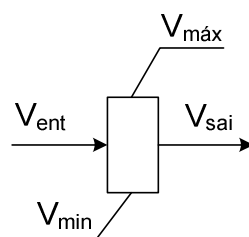
(-----
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin)(vmax)
(-----
0008 LEDLAG    X7  X8  #ks2  0.0  1.0#T7
0009 LEDLAG    X5  X9   1.0#T8  1.0#T9
0010 LEDLAG    X9  X10  1.0  0.0  1.0#T9
0011 LEDLAG    X10 X11  1.0  0.0  1.0#T9
0012 LEDLAG    X11 X12  1.0  0.0  1.0#T9
0013 LEDLAG    X12 X13  1.0  0.0  1.0#T9

```

g) Bloco LIMITA

As rotinas do ANATEM para representação de modelos definidos pelo usuário permitem a modelagem de limitadores do tipo dinâmico. A resposta do bloco com limitador tende a ser mais rápida que em comparação a blocos com limitadores estáticos.

Figura 22 – Bloco limita



Fonte: Linguagem própria CDU do Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM).

5.8 Implementação de controlador pid e algoritmo genético na planta da UTCC

Os Controladores Proporcional, Integral e Derivativo (PID) são bastante utilizados nas indústrias para controle de sistemas em geral, tais como pressão, nível, velocidade, entre outras variáveis de sistemas. De fato, na indústria, a maioria das malhas de controle utilizam controladores PID, e em sua maioria são controladores PI (ASTRÖM, 1995). O projeto desses controladores é classicamente realizado com a resposta de um modelo de referência de segunda ordem e, a partir do conhecimento da planta que deverá ser controlada, encontram-se os parâmetros de ganho proporcional, integral e derivativo do controlador PID. Este controlador, utilizado em cascata com esta planta, em malha fechada, possibilita que a mesma acompanhe a resposta do modelo da melhor forma possível (ASTRÖM, 1995).

Com o objetivo de comparar as diversas técnicas de projeto de controlador, este tópico de simulação tem a aplicação de Algoritmos Genéticos (AG) no ajuste automático dos parâmetros de um controlador PID em um modelo de 3ª ordem, aplicado na planta do processo e dados da Central Geradora Termelétrica Fortaleza (CGTF), sistema máquina síncrona conectada a uma barra infinita com regulador de tensão.

Diversas abordagens para o projeto de controladores PID baseadas em algoritmos evolutivos têm sido propostas em literaturas atuais, para aplicações nas áreas de controle e robótica (NASCIMENTO, 2007).

O AG opera em um espaço de soluções possíveis para o controlador PID, e procura melhores soluções, baseando-se em ideias originadas do campo da evolução genética, utilizando operadores genéticos, tais como: seleção, cruzamento e mutação.

Os AGs constituem uma técnica de busca e otimização, altamente paralela, inspirada no princípio Darwiniano de seleção natural e reprodução genética (NASCIMENTO, 2007).

Os princípios da natureza nos quais os AGs se inspiram são simples. De acordo com a teoria de C. Darwin, o princípio de seleção privilegia os indivíduos mais aptos com maior longevidade e, portanto, com maior probabilidade de reprodução. Indivíduos com mais descendentes têm mais chance de perpetuarem seus códigos genéticos nas próximas gerações. Tais códigos genéticos constituem a identidade de cada indivíduo e estão representados nos cromossomos (MICHALEWICZ, 1994).

Estes princípios são imitados na construção de algoritmos computacionais que buscam uma melhor solução para um determinado problema, através da evolução de populações de soluções codificadas através de cromossomos artificiais. Em AGs, um

cromossomo é uma estrutura de dados que representa uma das possíveis soluções do espaço de busca do problema (MICHALEWICZ, 1994).

Cromossomos são submetidos a um processo evolucionário que envolve avaliação, seleção, recombinação (cruzamento) e mutação. Após vários ciclos de evolução a população deverá conter indivíduos mais aptos.

A analogia entre AG e o sistema natural é representada através da tabela abaixo:

Tabela 3 – Algoritmos Genéticos e o Sistema Natural.

Natureza	Algoritmos Genéticos
Cromossomo	Vetor com representação binária ou real
Gene	Característica do problema
Alelo	Valor da característica
Loco	Posição na Palavra, vetor
Genótipo	Estrutura
Fenótipo	Estrutura submetida ao problema
Indivíduo	Solução do problema
Geração	Ciclo

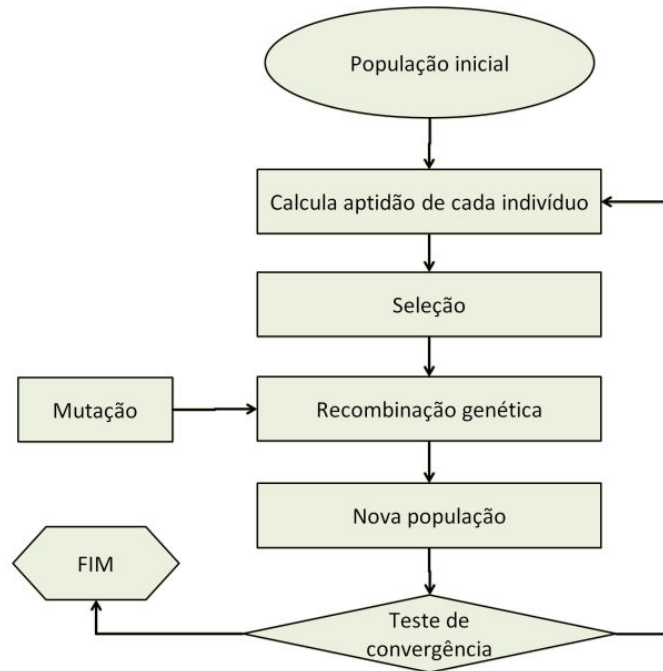
Fonte: (SANTOS, 2010).

5.8.1 Descrição de algoritmos genéticos

As características mais notáveis dos AG, que os diferenciam dos algoritmos clássicos, são os seguintes: (PACHECO, 1994)

- Não operam sobre o valor numérico do problema, mas sobre o código em que o mesmo está codificado.
- Não necessitam do cálculo do gradiente; operam unicamente com o valor da função a ser otimizada.
- Realizam a busca por todo o espaço de uma só vez, em vez de proceder ponto a ponto, sequencialmente.
- Não impõem condição alguma sobre a continuidade das variáveis que definem o problema.

Figura 24 – Funcionamento Básico Algoritmo Genético



Fonte: (SANTOS, 2010)

Para um determinado problema, um AG precisa ter os seguintes componentes (MICHALEWICZ, 1994):

- Representação genética para a solução potencial do problema;
- Criação de uma população inicial da solução potencial;
- Função de avaliação que sopesa a solução em termos de seu *fitness*;
- Operadores genéticos que alteram a composição dos cromossomos gerados após o cruzamento;
 - Valores para os vários parâmetros que os AGs usam, tais como: tamanho da população, probabilidade de aplicação dos operadores genéticos etc.

5.8.2 Representação

Cada possível solução no espaço de busca é representada por uma sequência de símbolos \underline{s} gerados a partir de um alfabeto (binário ou real). Cada sequência corresponde a um cromossomo, e cada elemento de \underline{s} é equivalente a um gene. Por exemplo, uma função $f(x,y)$ pode ter suas variáveis representadas da seguinte maneira:

- Vetores de reais, (2.345, 4.3454, 5.1, 3.4)
- Cadeias de bits, (111011011)

- Vetores de inteiros, (1,4,2,5,2,8)

A representação binária nem sempre pode ser empregada; muitas vezes o problema exige um alfabeto de representação com mais símbolos como, por exemplo, a representação real. Qualquer representação escolhida deve representar todo o espaço de busca que se deseja investigar.

5.8.3 Inicialização da população

Para um processo de inicialização, uma população de cromossomos é gerada randomicamente. O tamanho da população afeta a eficiência e a performance do AG (TREMPS, 2001). Uma população de pequena dimensão pode levar o AG a convergir rapidamente para um máximo local, enquanto uma população muito grande prejudica o desempenho computacional do algoritmo.

5.8.4 Função de avaliação

A cada estrutura (solução) é associado um valor numérico (aptidão), que representa a qualidade dessa estrutura e indica quão bem ajustada ela está. O valor da aptidão é obtido por meio da função objetivo.

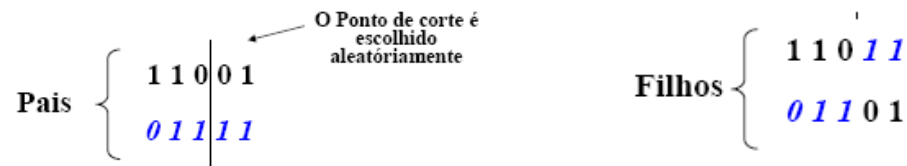
5.8.5 Seleção

O processo de seleção em AG seleciona indivíduos para a reprodução. A seleção é baseada na aptidão dos indivíduos: indivíduos mais aptos têm maior probabilidade de ser escolhidos para a reprodução.

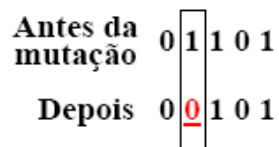
5.8.6 Operadores genéticos

Os indivíduos selecionados para a população seguinte são recombinados por meio do operador cruzamento. Este operador é considerado a principal característica dos AG. Os pares de indivíduos são escolhidos aleatoriamente, e novos indivíduos são criados a partir do intercâmbio do material genético. Os descendentes serão diferentes, porém com características genéticas de ambos. Este método (cruzamento em um único ponto) é o mais aplicado. Por exemplo:

Seleciona-se um ponto de corte aleatório e permutam-se as porções selecionadas:



Os cromossomos criados a partir do operador cruzamento são, posteriormente, submetidos à operação de mutação. Com base na probabilidade de mutação, o conteúdo de uma posição do cromossomo é alterado. Exemplo:



5.8.7 Parâmetros do algoritmo genético

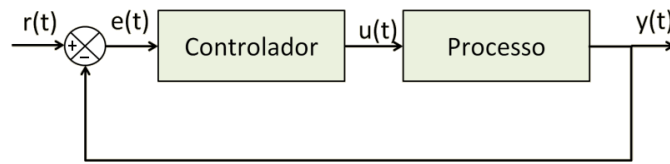
Em um AG, vários parâmetros controlam o processo de evolução. São eles:

- Tamanho da população: número de pontos no espaço de busca considerado.
- Taxa de Cruzamento: probabilidade de um indivíduo ser recombinação com outro.
- Taxa de mutação: probabilidade de que o conteúdo de cada posição (gene) do cromossomo seja alterado.
- Número de gerações: número total de ciclos de evolução de um AG.

5.8.8 Modelagem da máquina síncrona e de seus controladores

Para o processo em estudo pretende-se controlar, com um controlador PID, a resposta e o desempenho do sistema a uma entrada de referência $r(t)$, dependendo dos parâmetros P, I e D que forem ajustados no controlador, conforme ilustra a figura 25.

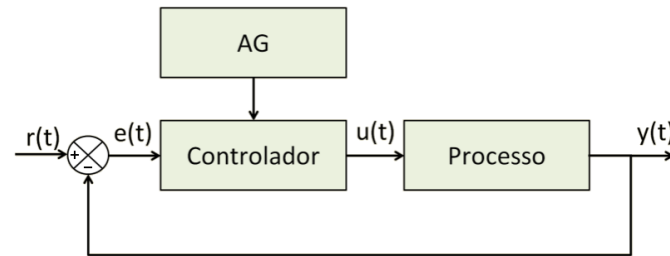
Figura 25 – Funcionamento Básico Algoritmo Genético.



Fonte: (SANTOS, 2010).

Para realizar a sintonia ótima do controlador PID, o sistema de simulação foi implementado de acordo com o esquema da figura 26:

Figura 26 – Ajuste do Controlador PID através do AG.



Fonte: (SANTOS, 2010).

A partir do resultado do fluxo de carga, as entradas de parâmetros do gerador e sistema são representadas através da tabela 4.

Tabela 4 – Dados do sistema e Gerador.

Módulo da tensão de saída do Gerador (em pu)	0.95
Ângulo da tensão de saída do gerador (em graus)	11
Módulo da tensão de barra infinita (em pu)	1.1
Ângulo da tensão de barra infinita (em graus)	0
Módulo da Impedância do Transformador (em pu)	0.142
Ângulo da Impedância do Transformador (em graus)	90
Módulo da Impedância da linha de transmissão (em pu)	0.093
Resistência de Armadura R_a (em pu)	0
Reatância de eixo direto X_d (em pu)	1.81
Reatância de eixo em quadratura X_q (em pu)	1.68
Reatância transitória de eixo direto X_d' (em pu)	0.18
Constante de inércia H (em seg)	8.17
Const. de tempo em circ. aberto de eixo direto $T'd0$ (em seg)	7.89

Fonte: Dados fornecidos por CGTF (ENDESA).

Com a planta representada na função de transferência da equação 5.46, que representa o modelo simplificado da máquina síncrona, baseado numa máquina ligada a uma barra infinita através de uma impedância equivalente, com a inclusão de regulador de tensão.

$$\frac{\Delta T_e}{\Delta \delta} = \frac{-K_2 K_E K_5}{1/K_3 + K_E K_6 + s^2 T'_{d0} T_E + s(T_E/K_3 + T'_{d0})} \quad (5.46)$$

A tabela abaixo apresenta os valores de constantes e ganhos inseridos na função de transferência a partir dos dados fornecidos pela termelétrica Fortaleza.

Tabela 5 – Constantes e ganhos da função de transferência

Ganhos								Constantes		
KI	K1	K2	K3	K4	K5	K6	Ke	T'd0	h	Te
1,2583	2,0608	2,0691	0,2029	4,2528	-0,177	0,0084	300	7,89	8.17	0,003

Fonte: Figura desenvolvida no software ANATEM – CEPEL (Análise de Transitórios Eletromecânicos)

5.9 Desenvolvimento e aplicação do simulador

Podendo agrupar diferentes situações, o programa permite a modificação de todos os valores das variáveis do sistema e dados de equipamentos. Porém, há necessidade de se assegurar que todas as variáveis inseridas são viáveis para a análise.

O programa permite a mudança dos valores de todas as variáveis do sistema através de menus interativos . Do mesmo modo, a utilização do programa admite ainda escolher qual ou quais as análises que se deseja executar. Entretanto, o usuário deve assegurar-se que todas as variáveis introduzidas são viáveis.

Figura 27 – Janela inicial do programa desenvolvido



Fonte: Simulador Interativo de UTCC em MATLAB– (2012)

O simulador pode verificar até três análises, pela equação de oscilação, pelo critério de igualdade de área (caso 1) e pelo ajuste das oscilações eletromecânicas do gerador.

As variáveis necessárias para a caracterização do **gerador** são as seguintes:

- X_d - Reatância de eixo direto em p.u.
- E - força eletromotriz em p.u.
- P_e - potência elétrica fornecida em p.u.
- H - constante de inércia em MJ/MVA.
- f_n - frequência em Hz.

A variável necessária da característica do **transformador** é:

- X_t - reatância em p.u.

As variáveis necessárias das características das **linhas** são:

- X_{l1} - reatância da linha 1 em p.u.
- X_{l2} - reatância da linha 2 em p.u.

A variável necessária para a caracterização do **barramento de potência infinita** é:

- V_{inf} - módulo da tensão do barramento de potência infinita em p.u.

As variáveis necessárias para a caracterização do **defeito** são:

- X_{def} - reatância de defeito em p.u.
- **Localização do defeito** - escolha da localização do defeito

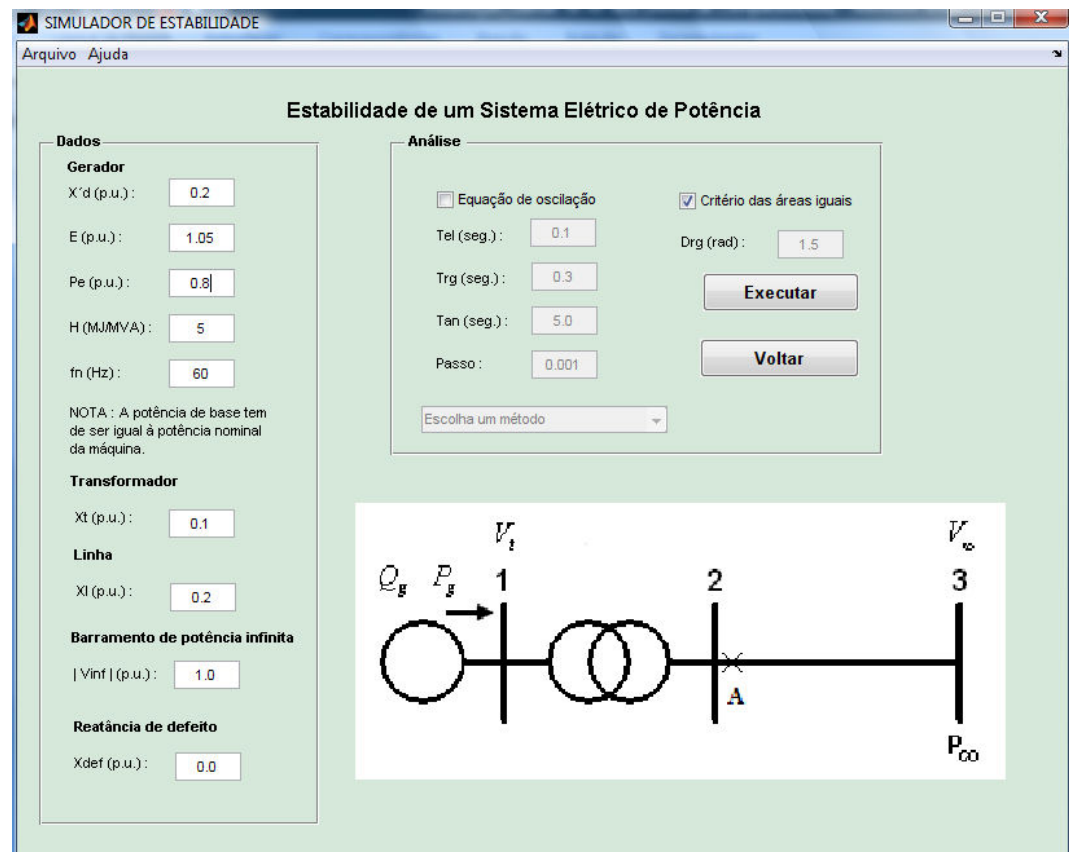
- **Religamento** - escolha da existência de religamento do sistema

Depois de escolhidos os valores para todos estes parâmetros serão conferidos às análises em sua opção escolhida. Em seguida, será apresentada cada uma das análises assim como os resultados possíveis de simulação.

Qualquer análise que se possa realizar será sempre separada segundo os diferentes períodos de tempo em que se podem encontrar, durante o decorrer da mesma:

- (1) – período antes do defeito
- (2) – período após o defeito
- (3) – período após eliminação do defeito
- (4) – período após religamento (no caso de existência do mesmo).

Figura 28 – Janela correspondente ao Exemplo 1 do programa desenvolvido



Fonte: Simulador Interativo de UTCC em MATLAB– (2012)

No que pertine à análise da equação de oscilação, tem-se então como parâmetro de entrada:

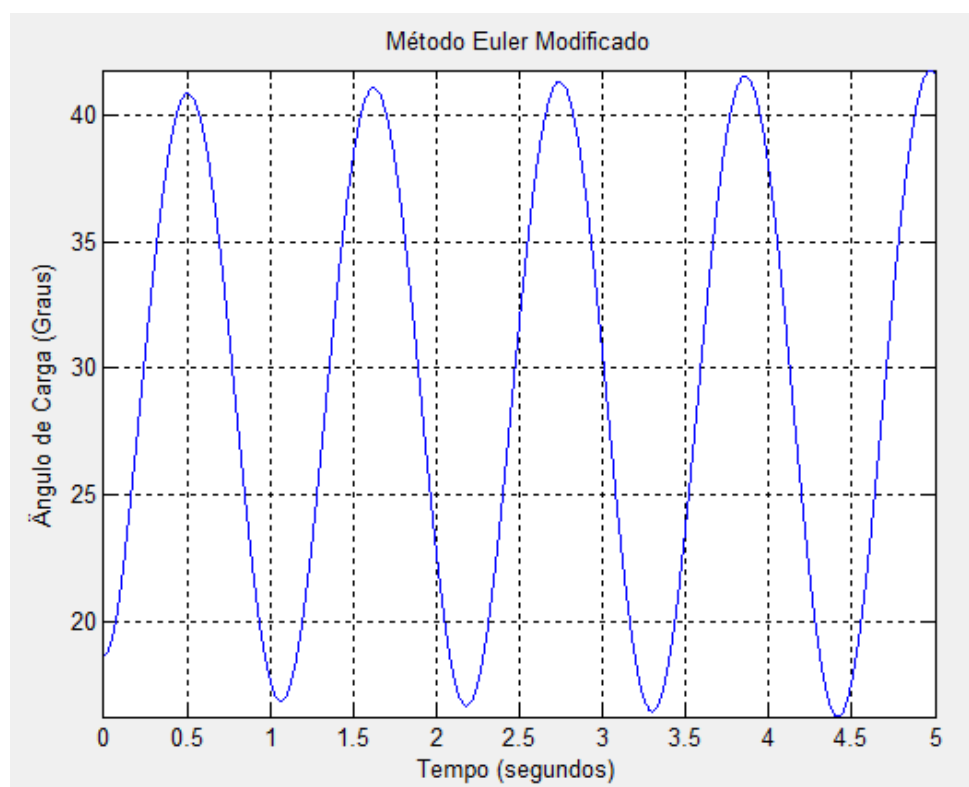
- **Tel** - tempo de eliminação do defeito em segundos
- **Trg** - tempo de religamento do sistema em segundos

- **Tan** - duração da análise da equação em segundos
- **Passo** - passo de integração
- **Escolha de método** - método a utilizar para fazer a integração da equação de oscilação.

Para defeito localizado na linha, pode ser feita apenas esta análise pela equação de oscilação, isto quando a impedância de defeito é nula, caso contrário a localização pode ser uma qualquer.

Escolhendo a opção de religamento da linha, deve ser inserido um tempo de religamento do sistema. Perante esta situação e esta análise for seleccionada para ser efetuada, tem-se então como solução o gráfico apresentado na figura 29.

Figura 29 – Gráfico correspondente a um exemplo de análise da equação de oscilação



Fonte: Simulador Interativo de UTCC em MATLAB– (2012)

Se a solução oscilar em torno de certo valor, então o sistema não perde a estabilidade. Por outro lado, verifica-se que a solução cresce indefinidamente, então o sistema é instável.

No estudo da rede apresentada na figura 28, podem-se encontrar duas situações:

- Impedância de defeito (X_{def}) nula
- Impedância de defeito (X_{def}) não nula

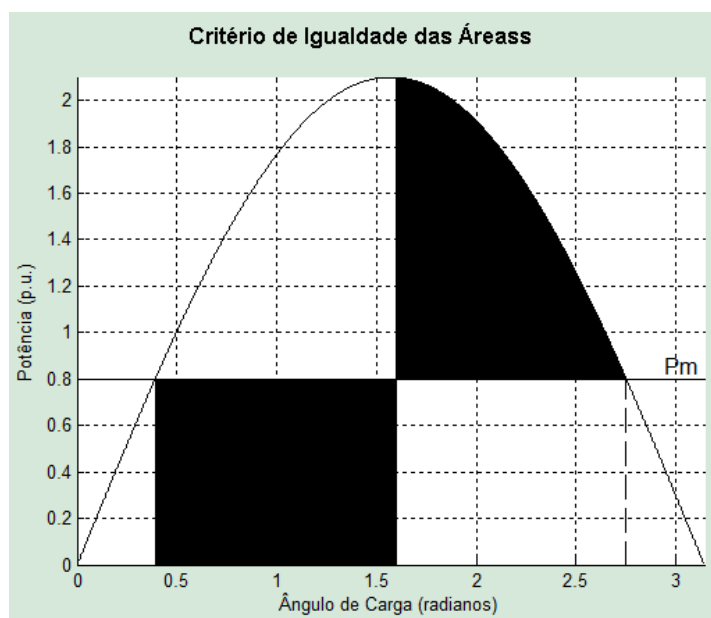
Na análise, segundo o critério de igualdade de áreas, tem-se como parâmetro de entrada, o ângulo de religamento **Drelig = 86 graus**.

A análise é verificada em diferentes períodos de tempo, sendo:

- (1) – período antes do defeito
- (2) – período após o defeito
- (3) – período após eliminação do defeito
- (4) - período após religamento

Já no sistema com religamento de linha, pode-se então verificar duas soluções possíveis. Se a impedância de defeito for igual a zero e a localização do defeito não estiver às linhas (independentemente da existência, ou não de religamento), pode-se calcular além do valor do ângulo crítico de eliminação do defeito, o valor para o tempo crítico de eliminação do defeito, ou seja, o tempo crítico para ajustes das proteções. A figura 30 visualizou a solução apresentada nestas condições.

Figura 30 – Curva $P_{ex} \delta$ (ângulo crítico para extinção de um defeito)



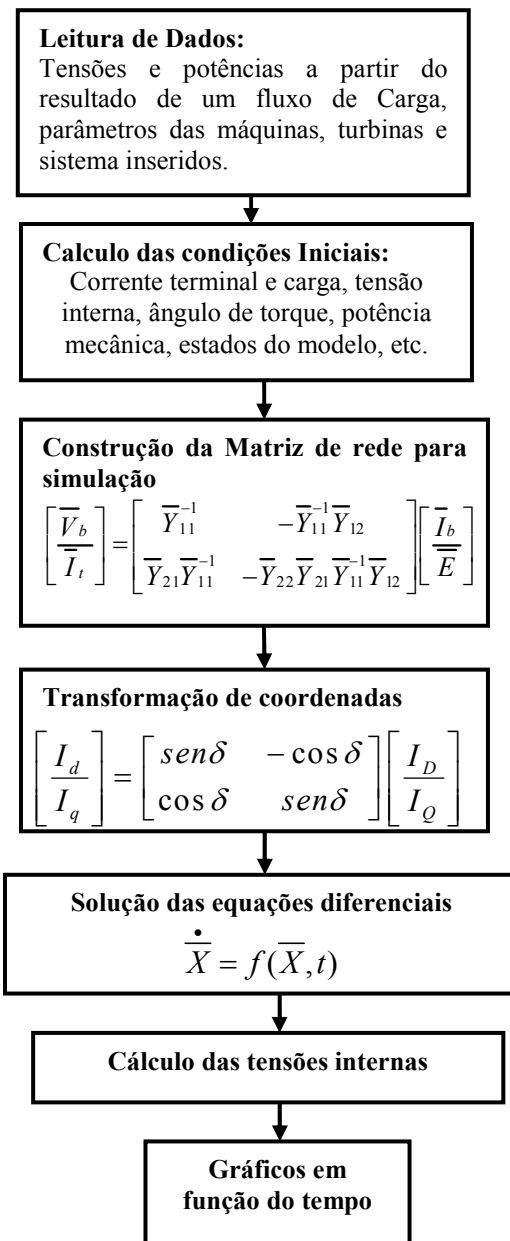
Fonte: Simulador Interativo de UTCC em MATLAB– (2012)

Para outras situações de defeitos, apenas será possível estimar o valor para o ângulo crítico de eliminação do defeito, sendo que nesta situação para verificação do tempo crítico, a análise é feita a partir da integração da equação de oscilação.

O objetivo da análise do critério das áreas iguais se resume ao cálculo do tempo e ângulo crítico, para avaliar se a estabilidade do sistema é ou não mantida após a ocorrência de uma determinada perturbação.

O simulador funciona para simulação dinâmica de sistemas de potência conforme fluxograma abaixo, que descreve o programa desenvolvido e cada etapa da simulação digital.

Figura 31 –Diagrama de blocos da simulação computacional do simulador



6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são analisados os resultados de modelos projetados com destaque para as simulações da Central Geradora Térmica Fortaleza, com análise de estabilidade do sistema elétrico de potência. As simulações foram realizadas nos softwares ANATEM, a partir de simulações do ANAREDE, e MATLAB, os quais podem utilizar os modelos matemáticos da máquina síncrona de 3ª e 6ª ordem. Verificam-se também o projeto de controladores, bem como a avaliação e a comparação da eficiência no simulador.

6.1 Análise de resultados

Para a aplicação da metodologia proposta e a comprovação do funcionamento do algoritmo desenvolvido no simulador, serão apresentados casos com diferentes situações e modelos.

- Caso 1: Configuração do sistema máquina-barra infinita através de uma linha simples.
- Caso 2: Configuração da Usina Térmica em estudo (Central Geradora Térmica Fortaleza).
- Caso 3: O sistema composto de três máquinas, sendo parte de um grande sistema modelado por uma barra infinita.

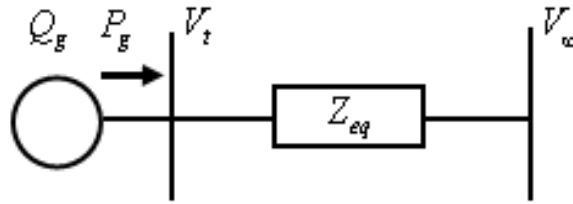
A seguir, são comentados os estudos de casos aplicados no programa desenvolvido.

6.1.1 Caso 1

Primeiramente, um caso usual, que permite fazer o estudo da estabilidade de um SEP que liga um gerador a um barramento de potência infinita através de uma linha simples. Com este sistema pode-se simular a ocorrência de um defeito perto da barra infinita V_{∞} (de acordo com a localização, assinalada na figura 32), que leva à abertura do disjuntor sendo este colocado novamente em serviço após a eliminação do defeito.

Neste exemplo, o religamento de linha é essencial, visto que se este não ocorrer, o sistema não poderá voltar a funcionar. Conforme se vê no sistema representado na Fig. (6.1).

Figura 32 – Representação do sistema que interliga máquina a barra infinita



Fonte: Simulador Interativo de UTCC em MATLAB– (2012)

Sabe-se que a tensão interna do gerador é igual a 1,05 pu, a tensão da barra infinita é de 1,0 pu e que a potência entregue pela máquina à barra infinita é de 0,8 pu. Além disso, são dadas as reatâncias transitórias da máquina 0,2 pu, do transformador 0,1 pu e da linha de transmissão 0,2 pu, e a constante de inércia do gerador $H=5,0$ seg. Verifica-se o ângulo crítico e o tempo crítico de abertura de uma falta trifásica na linha de transmissão.

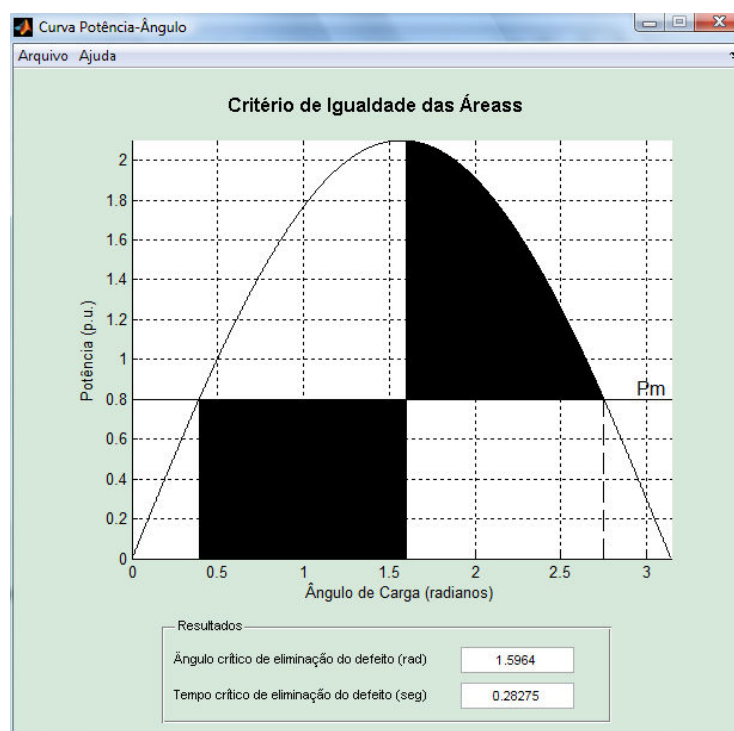
A partir dos dados acima introduzidos, tem-se a potência elétrica máxima que é dada por:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{E' \times E_{\infty}}{x_{eq}} = \frac{1,05 \times 1,0}{0,5} = 2,1 pu$$

O ângulo inicial δ_0 pode ser obtido portanto a partir de

$$2,1 \times \text{sen}(\delta_0) = 0,8 \Rightarrow \delta_0 = 0,496 \text{rad} (28,44^\circ)$$

Figura 33 – Gráfico da análise do Critérios das áreas iguais no Caso 1 utilizando método de Euler Modificado

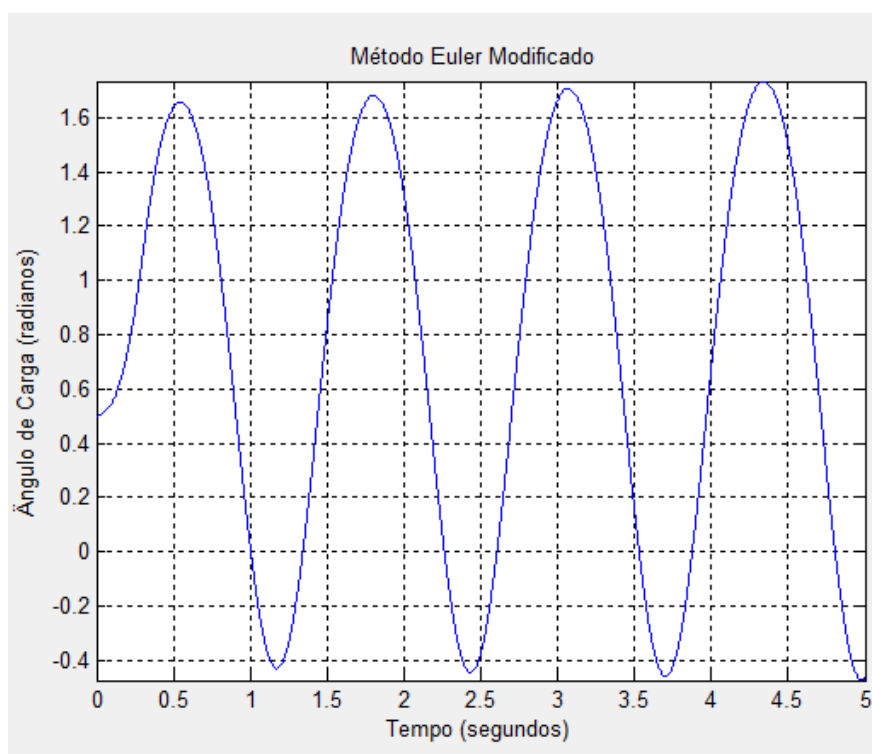


Fonte: Simulador Interativo de UTCC em MATLAB– (2012)

Com efeito, para impedância de defeito nula, o ângulo de eliminação do defeito é de $91,47^\circ$ (graus) e o tempo de abertura da linha de transmissão é de 0,28275 segundos ou 16,97 ciclos.

Para análise pela equação de oscilação, a impedância de defeito deve ser não nula, sendo considerado $X_{def}=0,1$ pu, o tempo de eliminação do defeito, (0,1 segundos), tempo de religamento do sistema (0,3 segundos), o método utilizado para fazer a integração da equação de oscilação é o Euler Modificado.

Figura 34 – Gráfico da análise da equação de oscilação para o Caso 1 utilizando o método de Euler Modificado



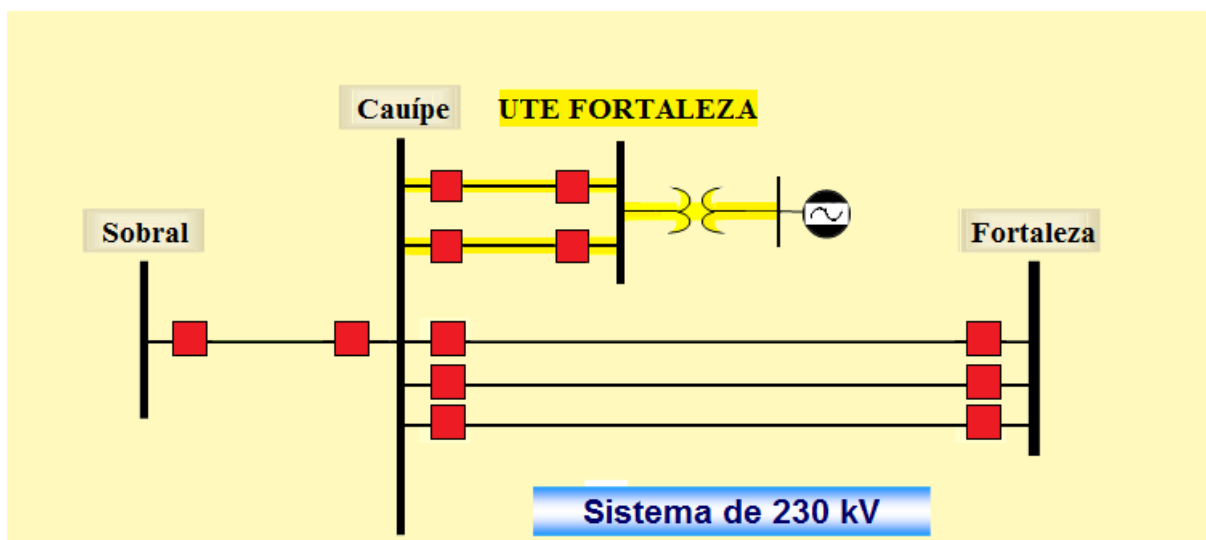
Fonte: Simulador Interativo de UTCC em MATLAB– (2012)

Com o gráfico pode-se tirar conclusões em torno da perda, ou não, da estabilidade, verificando a solução que oscila em torno de certo valor. Com esta análise podem-se fazer a comparação com diferentes métodos para a realização da integração de uma equação diferencial.

6.1.2 Caso 2

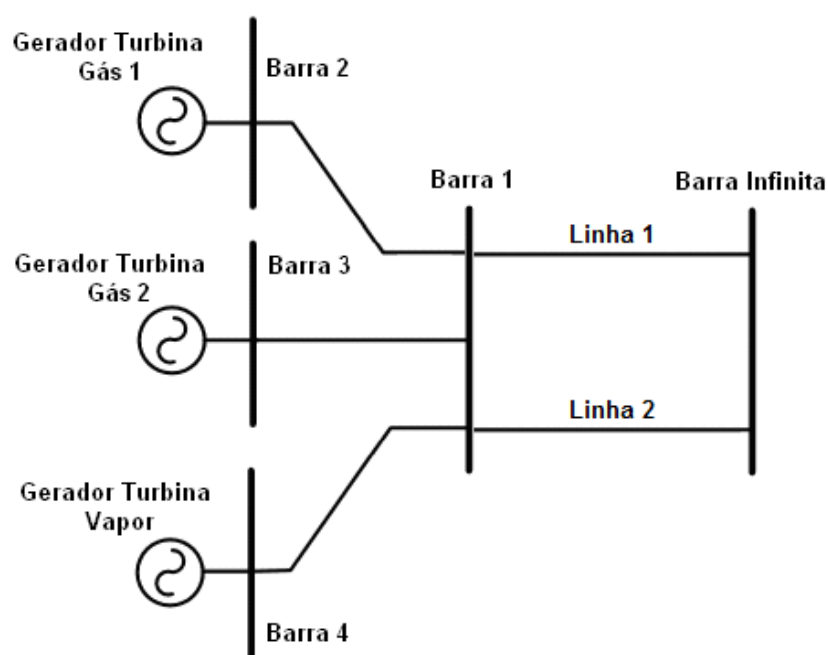
Primeiramente, são verificadas as análises de contingências no sistema da térmica em estudo, com dados reais fornecidos pelo mesmo. O sistema tem conexão com Subestação própria interligada com duas linhas de 230kV à subestação Cauípe da CHESF, vista na figura 34. Na simulação, a subestação Cauípe é representada no sistema modelado como barra Infinita, como visualizada na figura 35.

Figura 35 – Representação do sistema que interliga CGTF



Fonte: Simulador Interativo de UTCC em MATLAB – (2012)

Figura 36 – Representação do sistema modelado



Fonte: Simulador Interativo de UTCC em MATLAB– (2012)

No que concerne a simulação do caso 2, são apresentados os dados do sistema e das máquinas, fornecidos pela (CGTF) a partir dos fabricantes e representadas nas tabelas 6 e 7, onde encontram-se as reatâncias dadas em pu, constantes de tempo das máquinas, além das constantes de inércia e de suas potências (SANTOS, 2010).

Dados da Máquina foram ajustados para os parâmetros da CGTF na Base de 13,8kV e 131,6MVA e o valor da constante de inércia H equivale ao utilizado pelo ONS, considerando a inércia do conjunto Turbina a Gás e Gerador Síncrono.

Tabela 6 – Dados de gerador na base da máquina

Dados das Máquinas	1 – Gás 1	2 – Gás 2	3 – Vapor
x_d (p.u.)	1.81	1.81	2.02
x_q (p.u.)	1.68	1.68	1.92
x'_d (p.u.)	0.18	0.18	0.27
x'_q (p.u.)	0.30	0.30	0.46
x''_d (p.u.)	0.14	0.14	0.20
x_l (p.u.)	0.12	0.12	0.14
T'_d (seg)	7.89	7.89	7.8
T'_q (seg)	0.76	0.76	2.5
T''_d (seg)	0.018	0.018	0.04
T''_q (seg)	0.027	0.027	0.15
H (seg)	8.15	8.15	4.98
S_n (MVA)	131.6	131.6	144.6

Fonte: (ENDESA, 2008)

A partir da simulação para obtenção do fluxo de carga feita no software ANAREDE (Análise de Redes) considerando a operação dos geradores sob condições de operação, é mostrado o resultado das potências geradas e a tensão nas barras, através da tabela 7.

Tabela 7 – Resultado do fluxo de carga

Barra	Tensão		Geração	
	Módulo (p.u.)	Fase (graus)	Pg (MW)	Qg (MVAr)
1	1.012	-12.0	-299.4	106.0
2	0.993	-5.4	100.1	-19.7
3	0.992	-5.4	99.5	-20.5
4	0.982	-5.0	103.1	-28.4

Fonte: Dados desenvolvidos no programa computacional Análise de Rede – ANAREDE (CEPEL)

Tendo as informações necessárias para simulação, o sistema com três geradores de 100 MVA ligados a um barramento de potência infinita através de duas linhas em paralelo, como vista na figura 35, aplica-se um curto-circuito trifásico na linha 1. Tal defeito é mantido durante alguns ciclos, porém logo eliminado através da abertura da linha sob falta.

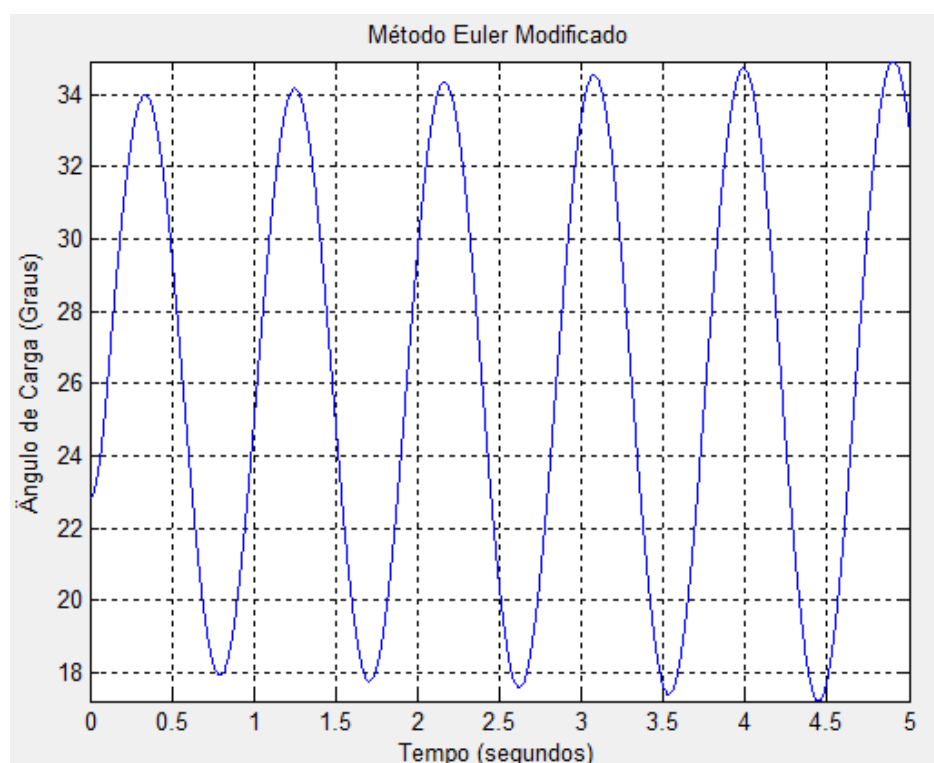
A equação da rede altera de acordo com a circunstância considerada, sendo três casos, a equação antes, durante e depois do defeito. As resoluções numéricas das equações diferenciais foram feitas pelo método Euler Modificado e os geradores são modelados em 6ª ordem.

Nesse exemplo verificam-se três situações diferentes de análise e por fim a validação dos resultados de simulação do transitório eletromecânico.

6.1.2.1 Análise pela equação de oscilação

Com a reatância de defeito de $0,1 pu$, verifica-se, a partir da equação de oscilação, a solução encontrada o ângulo de torque δ até 5,0s, considerando-se que após 0,15s o curto é eliminado, passando o sistema a operar com apenas uma linha entre as barras 1 e Infinita. Verifica-se a solução efetuada através do “Matlab” no gráfico da Figura 37.

Figura 37 – Curto circuito nos terminais do gerador, solução até 5.0s



Fonte: Simulador Interativo de UTCC em MATLAB – (2012)

Verifica-se que o sistema não perde a estabilidade, oscilando em torno de certo valor. Com esta análise, pode-se ainda comparar os diferentes métodos numéricos para a realização da integração de uma equação diferencial e verificar sua eficiência.

6.1.2.2 Projeto do sinal estabilizador (PSS)

Esta análise é verificada com os parâmetros do controlador PSS determinando $T_1=0,12$, $T_2=0,04$, $T_3=0,20$ e $T_4=0,04$, de forma que o compensador proporcione um avanço de fase ao sinal de velocidade que reduza o atraso provocado pelo conjunto gerador, excitatriz e sistema (OGATA, 2002).

Com as impedâncias equivalentes entre cada máquina e a barra infinita, frequência dominante, verifica-se o ângulo de atraso entre máquina e regulador de tensão com a compensação do ângulo nos parâmetros de ajuste do PSS.


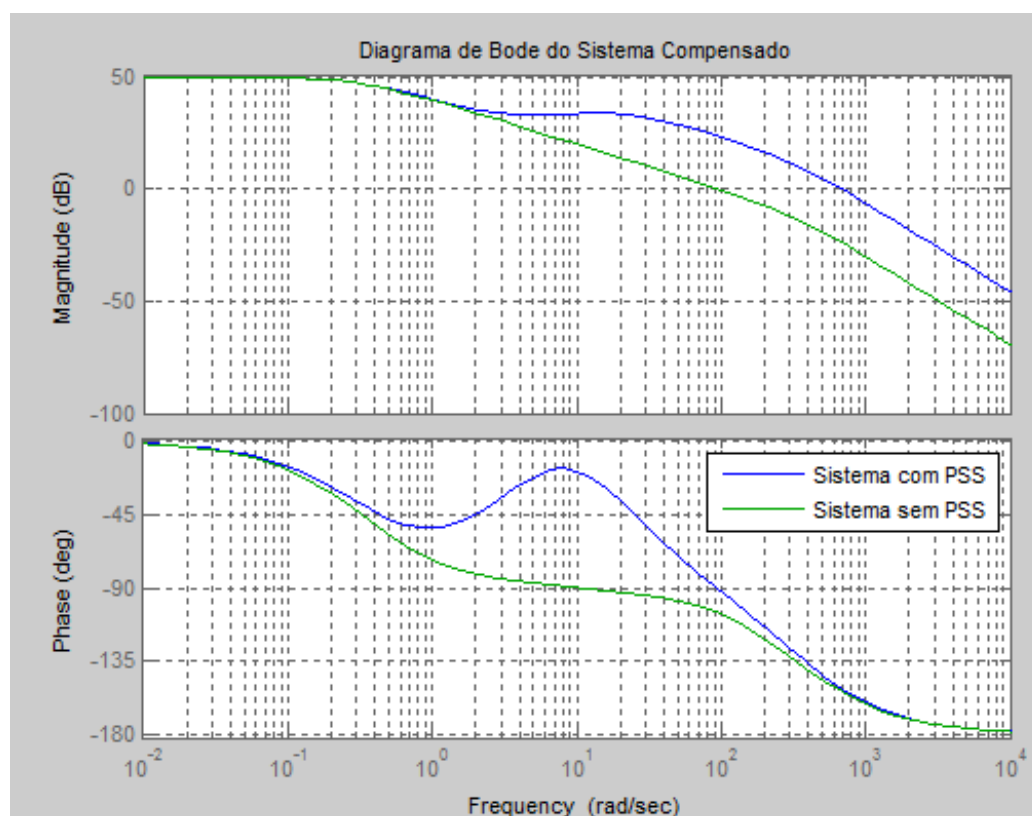
Para planta, através da opção menu  no simulador, visualizou-se o diagrama de Bode na figura abaixo.

Figura 38 – Diagrama de Bode do sistema compensado



Fonte: Simulador Interativo de UTCC em MATLAB – (2012)

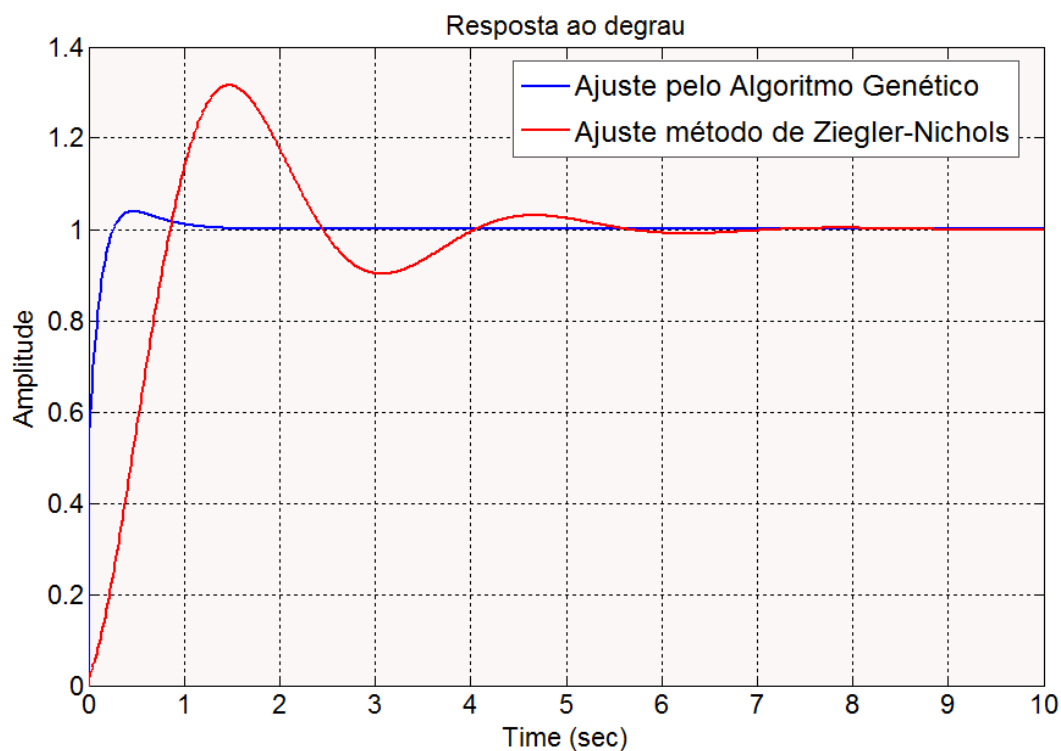
Constatou-se que o PSS ajustado possibilitou a redução da amplitude da primeira oscilação, além de melhorar o amortecimento das oscilações.

6.1.2.3 Simulação controlador PID e Algoritmo Genético

Para o AG tendo uma população de 20 indivíduos, fator de espalhamento 4, porcentagem de cruzamento de 60% e porcentagem de mutação de 2%, sendo encontrados os parâmetros para o PID de $K_p = 0.8902$, $K_i=12,704$ e $K_d=0.031$. Já para os parâmetros do controlador PID pelo método de Ziegler-Nichols foram encontrados $K_p = 0.0318$, $K_i=0.2544$ e $K_d=0.001$.

Na simulação foi aplicado um degrau unitário com um tempo de amostragem de 10 segundos, sendo comparados os resultados através das curvas para os dois ajustes visualizados na figura 39.

Figura 39 – Resposta degrau ao sinal de controle para o sistema compensado com o controlador PID ajuste Ziegler-Nichols (linha vermelha) e sistema a resposta degrau com controlador PID ajuste pelo algoritmo genético (linha azul)

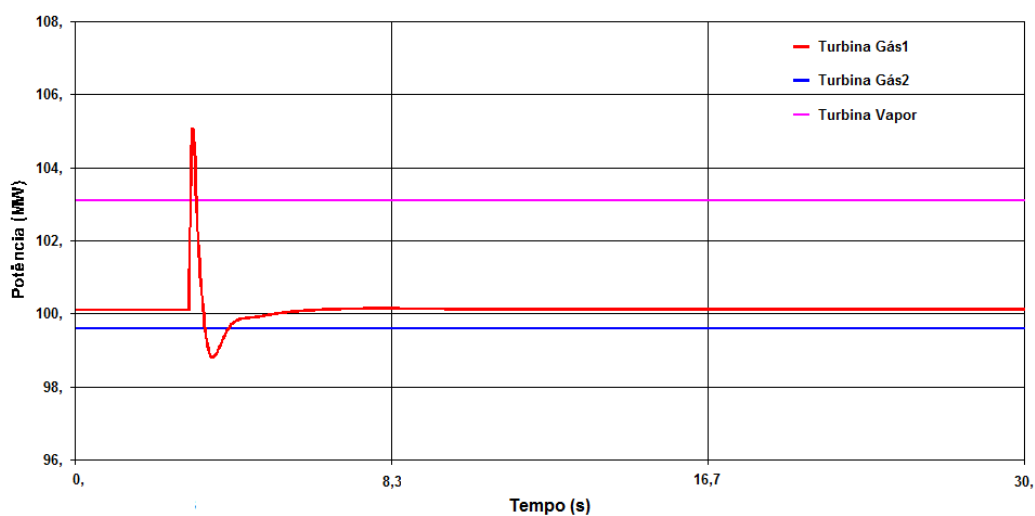


Fonte: Uso de Algoritmos Genéticos no Projeto de Controlador PID para Planta de uma Termelétrica a Ciclo Combinado, (Santos, 2010)

6.1.2.4 Simulação ANATEM

A figura 40 elucida a potência elétrica na barra infinita em resposta a um degrau de tensão de 2% em oito segundos na entrada do CDU do regulador de tensão do gerador da turbina a gás 1. A potência oscilou durante o transitório em seguida voltou para seu valor nominal.

Figura 40 – Potência elétrica na barra infinita



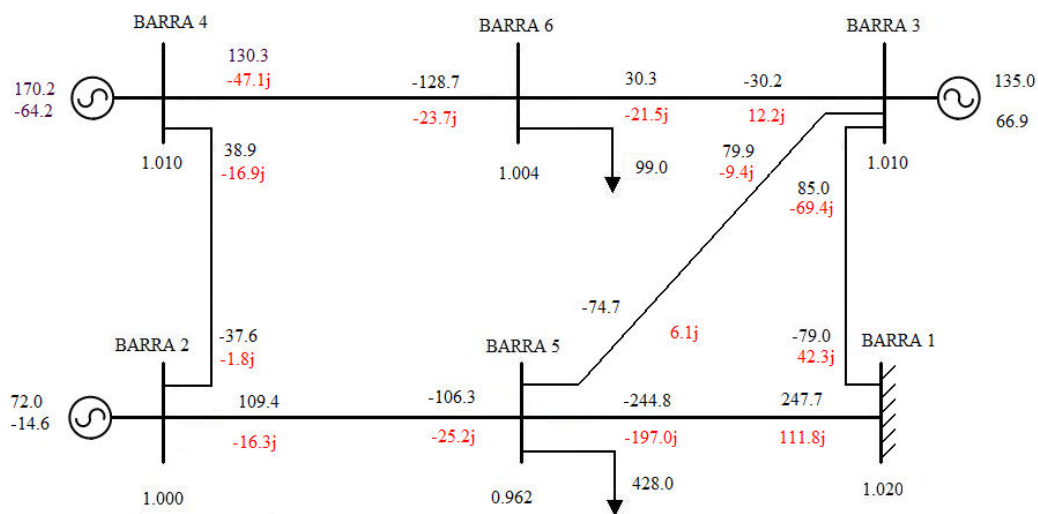
Fonte: Figura desenvolvida no software ANATEM – CEPEL (Análise de Transitórios Eletromecânicos)

6.1.3 Caso 3

O sistema é composto de três máquinas, sendo parte de um grande sistema modelado por uma barra infinita, onde será verificado o projeto de um sinal de um PSS, com o cálculo do PSS para 3 geradores em um sistema de 6 barras;

- Análise do comportamento dos geradores quando da aplicação de um curto-circuito trifásico franco na barra 6 por 120 ms;
- Utilização dos softwares ANATEM e Simulador para as análises.

Figura 41 – Fluxo de Carga do sistema de 6 Barra



Fonte: Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência. MOTA – (2006)

Para a simulação do caso 3 são apresentados os dados do sistema e das máquinas, representadas nas tabelas 8 e 9, onde encontram-se as reatâncias dadas em pu, constantes de tempo das máquinas, além das constantes de inércia e de suas potências (MOTA, 2006)

Tabela 8 – Dados de gerador na base da máquina

Gerador	x'_d	x_l	x_q	x_d	H	T'_{d0}	x''_d	T''_{d0}	T''_{q0}	T'_{q0}	x'_d
2	0,179	0,20	1,680	1,750	4,3	5,2	0,158	0,030	0,056	0,52	0,300
3	0,114	0,10	0,800	0,825	6,3	4,8	0,104	0,059	0,085	0,48	0,150
4	0,070	0,12	0,900	0,950	8,2	6,2	0,070	0,030	0,059	0,62	0,100

Fonte: Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência. MOTA – (2006)

Tabela 9 – Dados do sistema de excitação

Gerador	K_A	T_A	$V_{máx}$	$V_{mín}$	Saturação	A	B	C	C
2	50	0,04	5,00	-5,00	$Ae^{B.(X-C)}$	0,0210	8,281	0,8	0
3	100	0,02	5,00	-5,00	$Ae^{B.(X-C)}$	0,0212	8,230	0,8	0
4	200	0,05	5,00	-5,00	$Ae^{B.(X-C)}$	0,0267	7,250	0,8	0

Fonte: Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência. MOTA – (2006)

A partir da simulação para obtenção do fluxo de carga feita no software ANAREDE considerando a funcionamento dos geradores sob condições normais de operação, é mostrado o resultado das potências geradas e a tensão nas barras, através da tabela 10.

Tabela 10 – Resultado do fluxo de carga

Barra	Tensão		Geração		P_L	Q_L
	Módulo	Fase	Pg	Qg		
1	1.02	0.000	1.705	1.527	-	-
2	1.00	6.826	0.720	-0.146	-	-
3	1.01	6.989	1.350	-0.669	-	-
4	1.01	12-418	1.700	-0.642	-	-
5	0.962	-4.234	-	-	4,28	2,14
6	1.004	7.827	-	-	0,99	0,45

Fonte: Figura desenvolvida no software ANATEM – CEPTEL (Análise de Transitórios Eletromecânicos)

Os dados de geração, carga e tensão em *p.u.* na base 100 MVA e os valores em negrito foram obtidos a partir do fluxo de carga.

Dados para simulação do software ANATEM:

- Gerador: MD02 (polos salientes) e curva de saturação tipo 2;
- RT: MD20. Adotado T4 muito menor que T2 a fim de eliminar o segundo controlador avanço/atraso de fase. Os blocos de medição foram *by-passados*;
- PSS: MD01. Ângulo de atraso dividido por 2 no cálculo de T1 e T2, a fim de utilizar o segundo *lead-lag* (T3 e T4).
- Gerador: modelo de 6ª ordem com T'_{q0} e x'_q . A curva de saturação não possui o parâmetro C (vide tabelas 9).

Parâmetros PSS:

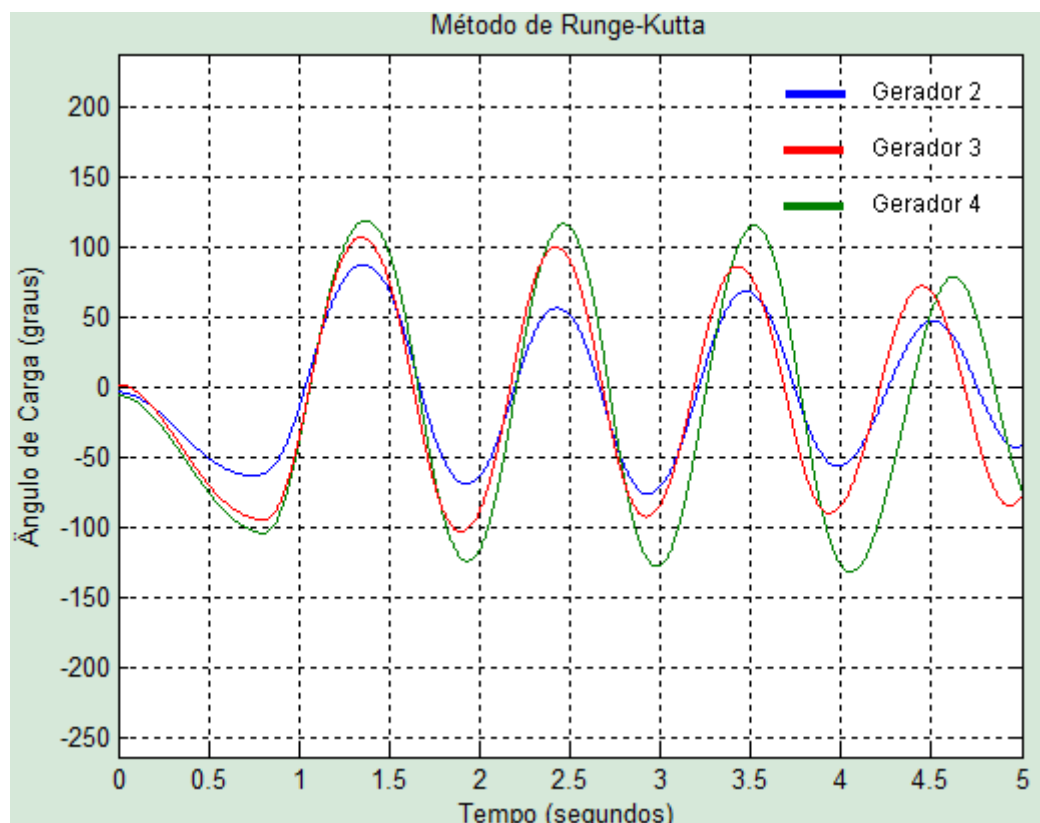
Tabela 11 – Parametros do PSS:

Gerador	K	T	T1	T2	T3	T4
2	25	1,515	0,2596	0,0367	0,2596	0,0367
3	15	1,515	0,1668	0,0433	0,1668	0,0433
4	10	1,515	0,1665	0,0550	0,1665	0,0550

Fonte: Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência. MOTA – (2006)

A figura abaixo ilustra o gráfico da variação angular do rotor dos geradores na barra 2, 3 e 4 na figura 41 em função do tempo. Ao ocorrer o curto-circuito, o rotor acelerou. Entretanto devido à adição do sinal estabilizante na entrada do regulador de tensão, as oscilações foram amortecidas e rapidamente o sistema se estabilizou em um novo ponto de operação.

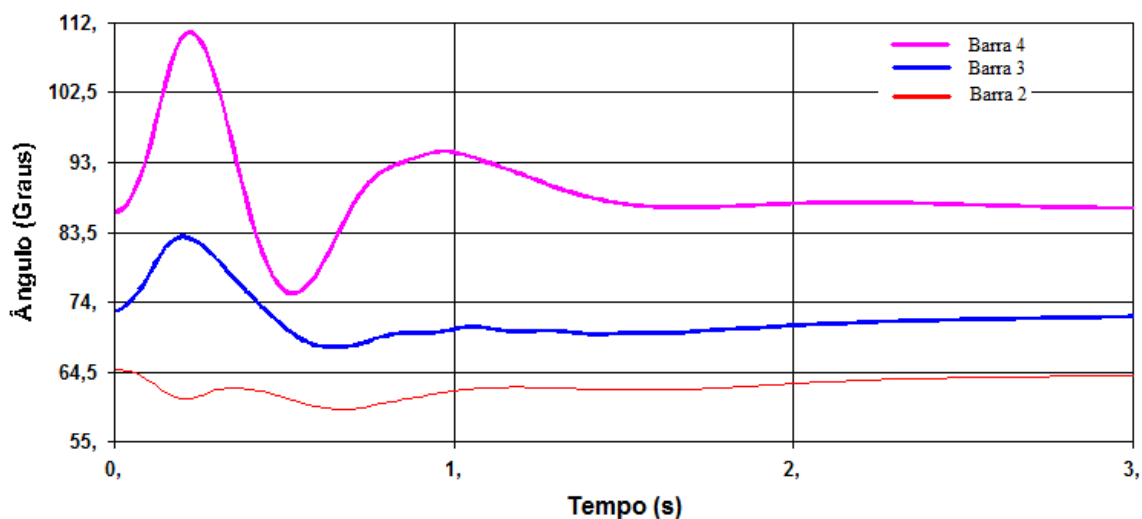
Figura 42 – Gráfico simulação Matlab



Fonte: Simulador Interativo de UTCC em MATLAB– (2012)

Na figura 42 são mostradas as oscilações dos ângulos de torque das máquinas quando um curto trifásico franco auto extinto é aplicado na barra 6 durante 0,15s.

Figura 43 – Gráfico simulação ANATEM



Fonte: Figura desenvolvida no software ANATEM – CEPEL (Análise de Transitórios Eletromecânicos)

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusões

O principal objetivo deste trabalho foi o estudo e implementação das condições de estabilidade do SEP em uma termelétrica através de um simulador, que emprega os tipos de análises e critérios nas literaturas atuais, utilizados por universidades e concessionárias de energia, abordando os conhecimentos básicos necessários ao estudo e diagnóstico de estabilidade do SEP. Verificam-se também os conceitos e embasamentos das máquinas síncronas interligadas em sistemas de energia, seus elementos ligados às redes elétricas e os equacionamentos matemáticos para o seu comportamento dinâmico.

Para planta em estudo é conceituado e apresentado o processo de produção de energia elétrica feita pela UTCC interligado no SEP e, é evidenciado o crescimento dos sistemas elétricos na estabilidade dinâmica para buscar alternativas de melhorias.

De acordo com os resultados das simulações, foi verificada a eficiência na análise da estabilidade e de ajuste dos controladores.

O presente trabalho também permitiu a análise, de forma sistemática, da operação dos estabilizadores de sistemas de potência da UTCC interligadas ao sistema com geração predominantemente hidráulica, observando que os parâmetros obtidos para o PSS através do projeto desenvolvido são eficazes no amortecimento das oscilações.

A ferramenta computacional utilizada para o simulador padrão é o MATLAB, que oferece boas características para análises customizadas, com pequenas restrições nas resoluções de equacionamentos matemáticos, tendo limitações na reprodução de um SEP.

Para comparação e validação das simulações em transitórios eletromecânicos, utilizam-se os softwares ANAREDE/ANATEM, usados pelas concessionárias de energia, que são pré-programados com modelagens definidas e instrumentos matemáticos modificados para atender nuances físicas dos problemas elétricos, que por sua vez não seguem precisamente as minuciosas técnicas matemáticas de outras ferramentas, a um custo de aquisição elevado.

Portanto, através da modelagem computacional, conseguiu-se simular sistemas reais e obter parâmetros capazes de ser inseridos em UTCC, que além de melhor habilitar os profissionais das UTE, serve para capacitar técnicos neste tipo de mão de obra dificilmente encontrada.

7.2 Sugestão para trabalhos futuros

Na atualidade, a simulação de estabilidade transitória e dinâmica proposta pelos softwares do CEPEL, ainda é a mais utilizada pelas empresas de energia elétrica para providenciar o adequado amortecimento das oscilações eletromecânicas.

No entanto, é fato conhecido que as não-linearidades e condições operacionais variáveis, tipicamente presente em um SEP, motivaram pesquisas na busca de novas estratégias de análise de estabilidade.

Com o intuito de dar continuidade a presente pesquisa e com o objetivo de aperfeiçoar a metodologia proposta são sugeridos para trabalhos futuros:

Modelar os parâmetros do estabilizador por meio de redes neurais, empregando uma rede neural para ajuste dos parâmetros, tornando possível adequar diferentes pontos de operação e a implementação prática do método. O benefício da rede neural está nos diversos pontos de operações utilizados já que opera com dados imprecisos e circunstâncias não totalmente definidas;

Implementação e incorporação do simulador de Estabilidade de um SEP com o simulador de todo o processo industrial da térmica com ferramentas gráficas e de fácil didática.

REFERÊNCIAS

- AMBIENTE BRASIL. **O Site de Meio Ambiente**. Disponível em: <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/termeletrica/usina_termeletrica_-_ciclo_combinado.html>. Acesso em: 18 dez. 2010.
- AMBIENTE ENERGIA. **O Site de Energia**. Disponível em: <<http://www.ambienteenergia.com.br>>. Acesso em: 12 nov. 2010.
- ANDERSON, P. M; FOUAD, A. A. **Power System Control e Stability**. Ames, Iowa: Iowa University Press, 1994.
- ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>>. Acesso em: 17 set. 2011.
- ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1617>. Acesso em: 06 jun. 2012.
- ANP. **Boletim Mensal do Gás Natural**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/doc/gas/2006/boletimgas200603.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2007.
- ASTRÖM, J. F; T. Häggglund. **PID Controllers: Theory, Design, and Tuning**, Instrument Society of America, 1995.
- AWED-BADEEB, O. M. Damping of Electromechanical Modes Using Power System Stabilizers (PSS) Case: Electrical Yemeni Network. **Journal of Electrical Engineering**, v.57, n.5, p.291–295, 2006.
- BOYCE, M. P. **Handbook for Cogeneration and Combined Cycle Power Plants**. New York: ASME Press, 2002. ISBN: 0791801691.
- BRASIL ECONOMIA. **O Site de Economia**. Disponível em : <http://www.brasileconomico.com.br/noticias/o-desafio-ambiental-das-usinas-termeletricas_74855.html>. Acesso em: 10 nov. 2010.
- BRUNNET, L.G. **Métodos Numéricos de Equações Diferenciais**. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/~leon/metcomp/ode/node12.html>>. Acesso em: 20 jul. 2011.
- CALDEIRA, N, S. **Aplicação de Estabilizadores de Sistemas de Potência em Reguladores de Velocidade e Turbinas**. Dissertação de Mestrado, Unifei, Itajubá - MG, 2009.
- CEPEL. **Manual do Usuário do Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos – Anatem**. Rio de Janeiro. Brasil, 2005.
- CHATURVEDI, D. K; MALIK, O. P; KALRA, P. K. **Performance of a Generalized Neuron-Based PSS in a Multimachine Power System**. IEEE Transactions on Energy Conversion. v.19, n.3, Sept. 2004.

DEMELLO, F. P; CONCORDIA, C. **Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. v. PAS-88. p. 316-329. 1969.

DEMELLO, F. P; LASKOWSKI, T. F. **Concepts of Power System Dynamic Stability**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. v.94, p. 827-833, may/june 1975.

FRANCIS, M. F. de S. **Projeto de Estabilizadores de Sistemas de Potência de Usinas Termelétricas a Ciclo Combinado**. Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade Federal do Ceará, UFC, 2007.

GASNET. **Termelétrica a Ciclo Combinado**. GasNet O site do gás natural. Disponível em: <http://www.gasnet.com.br/novo_termeletricas/ciclo.asp>. Acesso em: 17 dez. 2010.

GUAZZELLI, M. B. de P. **Estudo da Estabilidade de uma Máquina Síncrona**. Tese de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Elétrica e da Computação, Unicamp, 1977.

JUCEMA. **O site da Junta Comercial do Estado do Maranhão**. Disponível em: <<http://www.jucema.ma.gov.br/noticias.php?codigo1=70>>. Acesso em: 17 dez. 2010.

HAMMONS T.J. Comparisons of Synchronous Machine Models in the study of the Transient Behaviour of Electric Power System. **IEE Proc.** v.118 N.10, pp.1442 - 1458, Oct. 1971.

HEFFRON, W.G; PHILLIPS, R.A. Effect of Modern Amplidyne Voltage regulator on Underexcited Operation of Large Turbine Generators. **AIEE Transactions**. v.71, p.692-697, 1952.

KIMBARK, E.W. **Power System Stability - Synchronous Machines**. v.III, John Wiley & Sons, 1956.

KAKIMOTO, N; BABA, K. **Performance of Gas Turbine-based plants during frequency drops**. IEEE Transactions on Power Systems. v.18, p.1110-1115, august 2003. ISSN: 0885-8950. DOI: 10.1109/TPWRS.2003.814884.

KEHLHOFER, R; BACHMANN, R; NIELSEN, H; WARNER, J. **Combined - Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants**. 2.ed. Tulsa, USA: Pennwell Books, Aug. 1999.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. 2.ed., v.3, Ed. New York: McGrawHill, 1994.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. The EPRI Power System Engineering Series. New York: McGraw-Hill, 1993. ISBN: 0-07-035958-X.

KUNITOMI, K; KURITA, A; TADA, Y; IHARA, S; PRICE, W. W; RICHARDSON, L. M; SMITH, G. **Modeling Combined - Cycle Power Plant for Simulation of Frequency Excursions**. IEEE Transactions on Power Systems. v.18, n.2, p.724-729, may. 2003.

LALOR, G; RITCHIE, J; FLYNN, D; O'MALLEY, M.J. **The Impact of Combined-Cycle Gas Turbine Short -Term Dynamics on Frequency Control**. IEEE Transactions on Power Systems. v.20, n.3, august. 2005. Digital Object Identifier: 10.1109/TPWRS.2005.852058.

LARSEN, E. V; SWANN, D. A. Applying Power System Stabilizers. Parts I, II and III. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. v. PAS-100, n.6, p.3017-3034, June 1981.

LETTAS, N; DAGOUMAS, A; MANOUSARIDIS, I; DOKOPOULOS, P. **Short circuit and transient analysis of a network containing one single shaft combined cycle power station, with rated power 468 MVA**. Proceedings of the 13th International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems, 6-10 Nov. 2005. Digital Object Identifier: 10.1109/ISAP.2005.1599281.

LORA, E. E. S; NASCIMENTO, M. A. R. **Geração Termelétrica - Planejamento, Projeto e Operação**. São Paulo: Interciência, 2004. 2 v. ISBN: 8571931054.

MENDES, P. P. C. **Estabilidade e Dinâmica de Sistemas Elétricos**. Apostila de Curso, FUPAI, Itajubá - MG, 2005.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic Algorithms, Data Structures Evolution Programs**. Springer -Verlag, 3.ed. 1994.

MOTA, W. S. **Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência**. Campina Grande - PB: EPGRAF, 2006.

NASCIMENTO, J. A; CAMPOS, J. C. T; DANIEL, E. L. F; SOUZA, F. M. F; SILVA JÚNIOR, J. N. R; FALCUCCI, M; MAISONNAVE. P. R. **Modelagem dos Parâmetros dos Estabilizadores de Sistema de Potência de uma Termelétrica a Ciclo Combinado**. IV Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Araxá, 2007.

NASCIMENTO, J. A; BARRETO, L. H. S, C; NETO, T. N. C; FERNANDES, E. J; NASCIMENTO, M, B; MAISONNAVE. P. R. **Simulador Interativo de Usinas Termelétricas de Ciclo Combinado para Treinamento de Operadores e Mantenedores**. X EDAAO – Encontro para Debates de Assuntos de Operação, São Paulo, 2008.

NEOENERGIA. **Site de informações de energia**. Disponível em: <<http://www.neoenergia.com/section/historico-setor-eletrico.asp>>. Acesso em 13 de jun. de 2011.

ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). **Base de Dados para Estudo de Estabilidade Eletromecânica**. Disponível em: <www.ons.com.br>. Acesso em outubro de 2010.

ONS. **Site do Operador Nacional do Sistema Elétrico**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/entenda_setor/evolucao_setor.aspx>. Acesso em 20 de mar. de 2011.

ONS. Manual de Procedimentos da Operação, módulo 10 – revisão 2. In: **Procedimentos de Rede**. Disponível em: <www.ons.org.br>. Acesso em 10 de outubro de 2011.

OGATA, Katsuiko. **Modern Control Engineering**. Prentice Hall, 4.ed, 2002.

ONG, C. M. **Dynamic Simulation of Electric Machinery**. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1998. ISBN: 0-13-723785-5.

PACHECO, M. A. C. **Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações**. Disponível em: <www.ica.ele.puc-rio.br>. Acesso em: 07 dez. 2009.

PARK, R. H. **Two-Reaction Theory of Synchronous Machines** – Part I, Generalized Method of Analysis. AIEE Trans., vol. 48, pp. 716-30, July 1929.

SANTOS, G. J; Aguiar, J. S; BRAGA, A. P. S; NASCIMENTO, J. A. **Uso de Algoritmos Genéticos no Projeto de Controlador PID para Planta de uma Termelétrica a Ciclo Combinado**. III Si Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Belém, 2010.

SAUER, P. W; PAI, M. A. **Power System Dynamics and Stability**. New Jersey: Prentice Hall, 1998.

STAGG, Glenn W; EL-ABIAD, Ahmed H. **Computer Methods in Power System Analysis**. McGraw-Hill, 1968.

STEINMETZ, C. P. **Power Control and Stability of Electric Generating Stations**. AIEE Transactions, New York, v. 39, part II, p.1215, 1920.

STEVENSON, Jr. W.D. **Elements of Power System Analysis**, Mc Graw Hill 1982, ISBN 0-07-066584-2.

TREMPS, E. F; Sánchez, R. T. Optimización de Laminados de Materiales Compuestos mediante Algoritmos Genéticos. In: **Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica**. Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. v.1, p.187-193, 2001.

UNDRILL, J. e GARMENDIA, A. **Modeling of combined cycle plants in grid simulation studies**. Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, v. 2, 2001. Digital Object Identifier 10.1109/PESW.2001.916932.

YOUNG C. C. **Equipment and System Modeling for large-Scale Stability Studies**. IEEE Trans. PAS. Jan/Feb. 72.

APÊNDICE A - Para executar o complemento e comparação da análise de estabilidade o software ANATEM, a partir do resultado do fluxo de potência no ANAREDE, é executado com as informações dos modelos e controladores relativos às máquinas encontram-se dentro do arquivo cuja extensão é *.blt. Para execução das simulações os arquivos com extensões: *.stb.

Arquivo Caso 3 ANATEM

6barras.blt

(=====

(MODELOS DE GERADORES

(=====

DMDG MD01

(..... GER 01 - barra infinita

(No) (L'd)(Ra)(H)(D)(MVA)Fr C

0011

9999

(

DMDG MD02

(..... GER 02 - Gerador polos salientes - Barra 2

(No) (CS) (Ld)(Lq)(L'd) (L"d)(Le)(T'd) (T"d)(T"q)

0012 52 175 168 17.9 15.75 20 5.2 0.030.056

(No) (Ra)(H)(D)(MVA)Fr C

0012 4.3 100

(

(..... GER 03 - Gerador polos salientes - Barra 3

(No) (CS) (Ld)(Lq)(L'd) (L"d)(Le)(T'd) (T"d)(T"q)

0013 53 82.5 80 11.4 10.41 10 4.8 0.0590.085

(No) (Ra)(H)(D)(MVA)Fr C

0013 6.3 100

(

(..... GER 04 - Gerador polos salientes - Barra 4

(No) (CS) (Ld)(Lq)(L'd) (L"d)(Le)(T'd) (T"d)(T"q)

0014 54 95 90 9.3 6.97 12 6.2 .03050.059

(No) (Ra)(H)(D)(MVA)Fr C

0014 8.2 100

9999

(

(=====

(CURVAS DE SATURACAO DE GERADORES

(=====

DCST

(No) T(Y1)(Y2)(X1)

0052 2 0.021 8.281 0.8

(No) T(Y1)(Y2)(X1)

0053 2 0.0212 8.230 0.8

(No) T(Y1)(Y2)(X1)

0054 2 0.0267 7.25 0.8

9999

(

(=====

(MODELOS DE REGULADORES DE TENSÃO

(=====

DRGT MD20

(No) (Tm)(Ka)(T1)(T2)(T3)(T4)(Lmn)(Lmx)

0022 50 0.04 .0001-5.00 5.00

(

(No) (Tm)(Ka)(T1)(T2)(T3)(T4)(Lmn)(Lmx)

0023 100 0.02 .0001-5.00 5.00

(

(No) (Tm)(Ka)(T1)(T2)(T3)(T4)(Lmn)(Lmx)

0024 200 0.05 .0001-5.00 5.00

9999

(

(=====

(MODELOS DE ESTABILIZADORES (PSS)

(=====

DEST MD01

(No) (K)(T)(T1)(T2)(T3)(T4)(Lmi)(Lma)

0032 251.515.2596.0367.2596.0367-9999+9999

(

(No) (K)(T)(T1)(T2)(T3)(T4)(Lmi)(Lma)

0033 151.515.1668.0433.1668.0433-9999+9999

(

(No) (K)(T)(T1)(T2)(T3)(T4)(Lmi)(Lma)

0034 101.515.1665.0550.1665.0550-9999+9999

9999

(

FIM

(=====

CASO3 – Arquivo 6Barras.stb

(=====

(ASSOCIACAO DE ARQUIVO PARA SAIDA DE RELATORIOS

(=====

ULOG

4

C:\CEPEL\ANATEM\6barras\6barras.OUT

(

(=====

(ASSOCIACAO DE ARQUIVO COM FLUXO DE POTENCIA (ANAREDE)

(=====

ULOG

2

C:\CEPEL\ANATEM\6barras\6barras.SAV

(

(=====

(ASSOCIACAO DE ARQUIVO COM DADOS PARA PLOTAGEM

(=====

ULOG

8

C:\CEPEL\ANATEM\6barras\6barras.PLT

(

(=====

(ASSOCIACAO DE ARQUIVO DE SAIDA DE MENSAGENS DE EVENTOS

(=====

ULOG

9

C:\CEPEL\ANATEM\6barras\6barras.LOG

(

(=====

(DADOS DE OPCOES DEFAULT DE EXECUCAO

(=====

DOPC IMPR CONT

(Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E

IMPR FILE CONT 80CO

9999

(

(=====

(ALTERACAO DE CONSTANTES DO PROGRAMA

(=====

DCTE

(Ct) (Val)

TEPQ .01 (tolerancia de convergencia exigida p/ fluxo de potencia)

TEMD 1.E-6

TETE 1.E-6

TABS 1.E-6 (tolerancia absoluta)

9999

(

(=====

(RESTABELECIMENTO DO CASO DE FLUXO DE POTENCIA

(=====

ARQV REST

1

(

(=====

(LEITURA DE MODELOS

(=====

ULOG

3

C:\CEPEL\ANATEM\6barras\6barras.BLT

ARQM

(

(=====

(DADOS DE MAQUINAS E ASSOCIACAO DAS MAQUINAS AOS CONTROLES

(=====

DMAQ

(..... Barra Infinita

(No) Mq (P) (Q) Un (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nb)

1 10 11

(

(..... Gerador polos salientes – GER 02

(No) Mq (P) (Q) Un (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nb)

2 10 12 22 32

(

(..... Gerador polos salientes – GER 03

(No) Mq (P) (Q) Un (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nb)

3 10 13 23 33

(

(..... Gerador polos salientes – GER 04

(No) Mq (P) (Q) Un (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nb)

4 10 14 24 34

(

9999

(

(=====

(DADOS DE EVENTOS

(=====

(APCB -> aplicacao de curto-circuito em barra CA

(RMCB -> remocao de curto-circuito em barra CA

(

DEVT

(

(APLICAÇÃO DE CURTO AUTO EXTINTO EM 0.12 S

(Tp) (Ttmp) (El)(Pa)Nc(Ex)(%)(ABS)MqUn(Bl)P(Rc)(Xc)(Bc)

APCB 0 6

RMCB .12 6

(

9999

(

(=====

(DADOS DE SIMULACAO

(=====

DSIM

(Tmax (Stp) (P) (I)

5 .003 5

(

(=====

(DADOS DAS VARIAVEIS DE SAIDA

(=====

DPLT

(Tp)M(El) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (Bl) P

DELT 2 10 1 10

DELT 3 10 1 10

DELT 4 10 1 10

(PELE 2 10

(PELE 3 10

(PELE 4 10

(

9999

(

(=====

(EXECUCAO DA SIMULACAO

(=====

EXSI

(

(=====

(DADOS DE OPCOES DEFAULT DE EXECUCAO

(=====

DOPC

(Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E

IMPR D FILE D CONT D

9999

(

(=====

(FIM DA SIMULACAO

(=====

FIM