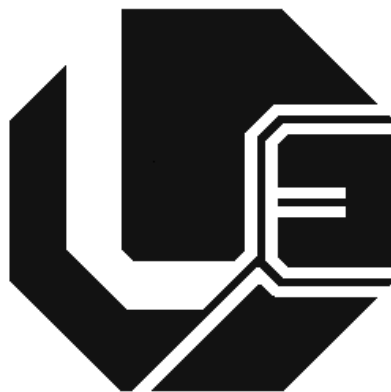


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Faculdade de Engenharia Elétrica

Curso de Pós-Graduação na área de Engenharia Elétrica



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Flávio Elias Mesquita Lima

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira
na Dinâmica do Sistema Elétrico da Grande São Paulo**

**Uberlândia – MG
Junho de 2012**

Flávio Elias Mesquita Lima

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira
na Dinâmica do Sistema Elétrico da Grande São Paulo**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em Ciências
aprovada em 29/06/2012 pela banca examinadora:

Prof. José Roberto Camacho, PhD (UFU) – Orientador;
Prof. Márcio Nestor Zancheta, Dr. (IPEN);
Prof. Sebastião Camargo Guimarães Jr., Dr. (UFU).

**Uberlândia – MG
2012**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG - Brasil

L732e Lima, Flávio Elias Mesquita, 1973-
2012 O estudo da inserção do reativo da Usina Elevatória de Pedreira na dinâmica do sistema elétrico da Grande São Paulo / Flávio Elias Mesquita Lima. - 2012.
170 p. : il.

Orientador: José Roberto Camacho.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Energia elétrica - Teses. 3. Potência reativa (Engenharia elétrica) - Teses. 4. Sistemas de energia elétrica - Confiabilidade - Teses. 5. Sistemas de energia elétrica - Estabilidade - Teses. I. Camacho, José Roberto. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na Dinâmica do Sistema Elétrico da Grande São Paulo

Flávio Elias Mesquita Lima

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. José Roberto Camacho, PhD (UFU)
Orientador.

Prof. Alexandre Cardoso, PhD (UFU)
Coordenador do Curso de Pós Graduação.

DEDICATÓRIA

*A DEUS, a minha linda esposa, Adriana Silva Gadelha e
aos meus queridos filhos, Gabriel Gadelha Mesquita e
Miguel Gadelha Mesquita.*

*Ao meu pai, Elias Vieira Lima (in Memoriam) e minha
mãe, Maria de Lourdes Mesquita.*

AGRADECIMENTOS

A DEUS por me guiar durante todo o percurso do trabalho, dando a mim a oportunidade de realizar um desejo.

A minha esposa Adriana Silva Gadelha, que incansavelmente me apoiou, incentivou e cuidou de tudo que eu abandonei para dedicar-me exclusivamente a este trabalho.

Aos meus amados filhos, Gabriel Gadelha Mesquita e Miguel Gadelha Mesquita. Este trabalho é um de meus legados a vocês, para que assim, quando crescerem, entendam a importância da dedicação, do estudo e do trabalho.

Aos meus pais Elias Vieira Lima (in Memoriam) e Maria de Lourdes Mesquita, e minhas irmãs, Vivian Mesquita Lima e Cintia Mesquita Lima pelo incentivo e apoio contínuo.

Ao meu orientador Dr. José Roberto Camacho pelos ensinamentos, dedicação e paciência durante todo o processo deste trabalho.

Agradeço particularmente aos amigos e colaboradores Walter Ragnev, João Marcos Brito da Silva, Celavoro Shigemoro Yabiku, Fábio dos Santos Fonseca, José Maciel Filho e Jacyro Gramulia Junior pelo estímulo, apoio e contribuição em todas as etapas deste estudo e à professora Cirênia Conceição Silva Motta pela revisão gramatical.

A todos os amigos da EMAE – Empresa Metropolitana de Águas e Energia e da ETEC – Escola Técnica Estadual Getúlio Vargas pelo apoio e contribuição.

EPÍGRAFE

“Bem aventurado o homem que encontra sabedoria, e o homem que adquire conhecimento, pois ela é mais proveitosa do que a prata, e dá mais lucro do que o ouro. Mais preciosa é do que os rubis; tudo o que podes desejar não se compara a ela.”

Provérbios 4:13-15

RESUMO

Com a operação da Estação Reversível de Pedreira como compensador síncrono fornecendo potência reativa para São Paulo, muitas dúvidas surgiram quanto ao comportamento das máquinas e do próprio sistema elétrico em casos de contingências.

Como essa operação nunca foi feita neste sistema, não é possível saber quais os impactos dessa operação. A possibilidade de avaliação desses impactos em regime contínuo de operação direciona este trabalho cujo objetivo é analisar a estabilidade das máquinas e a dinâmica do sistema elétrico. Através de um programa computacional, foram simuladas contingências preestabelecidas que representem as falhas e eventos mais comuns do dia a dia desse sistema elétrico.

As simulações levaram em consideração as principais contingências, tais como, perda de linha de transmissão, perda de carga e outros. Essas simulações também consideraram as configurações reais de operação de barras, cargas e geradores de energia elétrica. O objetivo principal foi estudar um sistema elétrico real composto por geração, transmissão e consumo de energia elétrica, que agora tem conectado a essa rede a Estação Reversível de Pedreira fornecendo potência reativa.

O trabalho contém a descrição de todos os equipamentos presentes no sistema real que foram utilizados para criar um modelo digital utilizado pelo programa. A construção do modelo possibilitou o estudo do sistema elétrico através de simulações que seriam impossíveis de serem realizadas no sistema elétrico real.

Palavras chave: Energia Elétrica, Operação de Sistemas, Potência ativa, Potência Reativa, Contingência, Dinâmica, Qualidade, Confiabilidade, Estabilidade.

ABSTRACT

With the operation of the Pedreira Reversible Station as synchronous compensator providing reactive power to the city of São Paulo, many questions have arisen regarding the behavior of machines and the electric system in case of contingencies.

Once this operation has never been performed on this system it is not possible to know what the impacts of this operation are. The ability to assess these impacts in continuous operation directs this work whose goal is to analyze the stability of the machines and the dynamics of the electrical system. Through a computer program, predetermined contingencies were simulated to represent the most common faults and events of everyday life of the electrical system.

The simulations take into account the main contingencies such as loss of transmission line, load loss and others. These simulations also considered the actual settings of operation of busbars, loads and electricity generators. The main objective was to study a system composed of real electric generation, transmission and consumption of electricity, which now has connected to the network the Pedreira Reversible Station now providing reactive power to the system.

The paper contains a description of all equipment present in the real system that was used to create a digital model used by the program. The construction of the model allowed the study of the electrical system through simulations that would be impossible to be made in the real electrical system.

Keywords: Electric Energy, Systems Operation, Active Power, Reactive Power, Contingency, Dynamics, Quality, Reliability, Stability.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Diagrama Elétrico da Área Estudada no Estado de São Paulo	13
Figura 2.2	Detalhe da Área Estudada	14
Figura 3.1	Sistema Hidráulico da EMAE para geração em Henry Borden	21
Figura 4.1	Mudança do ponto de operação	37
Figura 4.2	Rotação da reta R (<i>estatismo</i>)	39
Figura 4.3	Reta R de <i>estatismo</i> ajustada pelo motor variador de velocidade	39
Figura 4.4	Diagrama de blocos do algoritmo adotado	42
Figura 4.5	Desenho da roda de conchas com a agulha e o defletor	43
Figura 4.6 (a)	Sem defletor, jato de água direto na concha	44
Figura 4.6 (b)	Com defletor, jato de água desviado da concha	44
Figura 4.7	Agulha principal e agulha auxiliar	44
Figura 4.8	Princípio básico de funcionamento do sistema de excitação	50
Figura 4.9	Curva típica de capacidade – Limites	51
Figura 5.1	Curva característica das cargas	60
Figura 5.2	Modelo de carga com impedância constante	61
Figura 5.3	Circuito equivalente de um gerador CA	62
Figura 5.4	Circuito equivalente simplificado de um gerador CA	63
Figura 5.5	Circuito equivalente para um gerador e um motor	63
Figura 5.6 (a)	Diagrama fasorial do gerador sobreexcitado	65
Figura 5.6 (b)	Diagrama fasorial do gerador subexcitado	65
Figura 5.7	Diagrama vetorial do gerador	66
Figura 5.8	Diagrama vetorial do gerador com potência ativa fixa	67

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico da Grande São Paulo**

Índice de figuras

Figura 5.9 (a)	Diagrama fasorial do motor sobreexcitado	68
Figura 5.9 (b)	Diagrama fasorial do motor subexcitado	68
Figura 5.10	Limite de aquecimento do enrolamento de campo	70
Figura 5.11	Limite de potência da turbina	71
Figura 5.12	Limite de estabilidade teórico imposto pelo ângulo máximo de potência	72
Figura 5.13	Respostas de três máquinas durante uma perturbação	73
Figura 5.14	Curva de capacidade típica de um gerador	74
Figura 5.15 (a)	Diagrama fasorial do compensador subexcitado	78
Figura 5.15 (b)	Diagrama fasorial do compensador sobreexcitado	78
Figura 6.1	Diagrama de operação das linhas HB–PE 1 e 2 para o caso 1	96
Figura 6.2	Diagrama de operação das linhas HB–PE 1 e 2 para o caso 2	97
Figura 6.3	Diagrama de operação das linhas HB–PE 1 e 2 para o caso 3	98
Figura 6.4	Diagrama de operação das linhas HB–PE 1 e 2 para o caso 4	99
Figura 7.1	Tensões nas barras do entorno sem o reativo de Pedreira	103
Figura 7.2	Tensões nas barras do entorno com o reativo de Pedreira	103
Figura 7.3	Tensões nas cargas da linha HB-Pedreira C2 sem o reativo de Pedreira	104
Figura 7.4	Tensões nas cargas da linha HB-Pedreira C2 com o reativo de Pedreira	105
Figura 7.5	Tensões nas barras do entorno sem o reativo de Pedreira	106
Figura 7.6	Tensões nas barras do entorno com o reativo de Pedreira	107
Figura 7.7	Tensões nas cargas das linhas HB PE C2 sem o reativo de Pedreira	108
Figura 7.8	Tensões nas cargas das linhas HB PE C2 com o reativo de Pedreira	108
Figura 7.9	Potência ativa da unidade 1 de Henry Borden sem o reativo de Pedreira	109
Figura 7.10	Potência ativa da unidade 1 de Henry Borden sem o reativo de Pedreira	109

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico da Grande São Paulo**

Índice de figuras

Figura 7.11	Tensão das barras do entorno sem o reativo de Pedreira	112
Figura 7.12	Tensão das barras do entorno com o reativo de Pedreira	112
Figura 7.13	Tensão das cargas das linhas HB PE sem o reativo de Pedreira	113
Figura 7.14	Tensão das cargas das linhas HB PE com o reativo de Pedreira	113
Figura 7.15	Ângulo (δ) das unidades de H. Borden externa sem o reativo de Pedreira	115
Figura 7.16	Ângulo (δ) das unidades de H. Borden externa com o reativo de Pedreira	115
Figura 7.17	Ângulo (δ) da unidade 11 de Henry Borden sem o reativo de Pedreira	116
Figura 7.18	Ângulo (δ) da unidade 11 de Henry Borden com o reativo de Pedreira	116
Figura 7.19	Tensão das barras do entorno sem o reativo de Pedreira	117
Figura 7.20	Tensão das barras do entorno com o reativo de Pedreira	117
Figura 7.21	Tensão das cargas do entorno sem o reativo de Pedreira	118
Figura 7.22	Tensão das cargas do entorno com o reativo de Pedreira	118
Figura 7.23	Potências reativas das unidades térmicas sem o reativo de Pedreira	120
Figura 7.24	Potências reativas das unidades térmicas com o reativo de Pedreira	120
Figura 7.25	Ângulo (δ) das unidades de Pedreira	121
Figura 7.26	Tensões nas barras do entorno, sem o reativo de Pedreira	123
Figura 7.27	Tensões nas barras do entorno, com o reativo de Pedreira	123
Figura 7.28	Ângulo (δ) das unidades térmicas sem o reativo de Pedreira	125
Figura 7.29	Ângulo (δ) das unidades térmicas com o reativo de Pedreira	125
Figura 7.30	Potência reativa das máquinas térmicas sem o reativo de Pedreira	126
Figura 7.31	Potência reativa das máquinas térmicas com o reativo de Pedreira	126
Figura 7.32	Tensões nas cargas das linhas HB PE com o reativo de Pedreira	127
Figura 7.33	Tensões nas barras do entorno com o reativo de Pedreira	128
Figura A1	Diagrama elétrico utilizado no modelo de simulação	144

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico da Grande São Paulo**

Índice de figuras

Figura A2	Posição da área de estudo na rede de operação regiões Sul e Sudeste	145
Figura A3	Detalhe da área de estudo na rede de operação regiões Sul e Sudeste	146
Figura C1	Regulador com queda de velocidade de dois estágios	162
Figura D1	Curva de capacidade das unidades de 35 MW de Usina Henry Borden	164
Figura D2	Curva de capacidade das unidades de 65 MW de Usina Henry Borden	164
Figura D3	Curva de capacidade das unidades de 66 MW de Usina Henry Borden	165
Figura D4	Curva de capacidade das unidades de 70 MW de Usina Henry Borden	165
Figura D5	Curva de capacidade das unidades 1 e 2 da Termoelétrica de Piratininga	166
Figura D6	Curva de capacidade das unidades 3 e 4 da Termoelétrica de Piratininga	167
Figura D7	Curva de capacidade das unidades térmicas de Fernando Gasparian	168
Figura D8	Curva de capacidade das unidades 1 e 6 da Usina Elevatória de Pedreira	169
Figura D9	Curva de capacidade das unidades 2, 3 e 7 da Usina Elevatória de Pedreira	169
Figura D10	Curva de capacidade da unidade 5 da Usina Elevatória de Pedreira	170
Figura D11	Curva de capacidade da unidade 8 da Usina Elevatória de Pedreira	170

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico da Grande São Paulo**

Índice de tabelas

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1	Faixas de tensão para controle nos barramentos da área São Paulo	33
Tabela 6.1	Total de barras presentes no diagrama.	84
Tabela 6.2	Total de linhas presentes no diagrama	85
Tabela 6.3	Total de máquinas presentes no diagrama	87
Tabela B1	Valores dos parâmetros das linhas constantes neste trabalho	150
Tabela B2	Características dos transformadores do sistema	153
Tabela B3	Características dos compensadores síncronos do sistema	154
Tabela B4	Características dos geradores da UHB Externa	155
Tabela B5	Características dos geradores da UHB Subterrânea	155
Tabela B6	Características dos geradores da Usina Piratininga	156
Tabela B7	Características das turbinas da Usina Piratininga	157
Tabela B8	Características das unidades reversíveis da Usina Elevatória Pedreira	158
Tabela B9	Valores das Unidades da UEP como bomba capacitiva	159
Tabela B10	Valores das Unidades da UEP como bomba indutiva	159
Tabela B11	Valores das Unidades da UEP como síncrono sobreexcitado	160
Tabela B12	Valores das Unidades da UEP como síncrono subexcitado	160
Tabela B13	Comparação entre o turbinamento de UEP e UHB	161

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico da Grande São Paulo**

Lista de abreviaturas e siglas

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AES Eletropaulo S.A.	Companhia Distribuidora de Energia Elétrica
ANAREDE	Análise de Redes
“Black Start”	“partida no escuro”
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CESP	Companhia Energética de São Paulo S.A.
CNOS	Centro Nacional de Operação do Sistema
COSR-SE	Centro de Operações do Sistema Regional Sudeste
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
CTEEP	Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
EDP Bandeirante S.A.	Companhia de Eletricidade e Serviços S.A.
ELEKTRO	Companhia de Eletricidade e Serviços S.A.
EMAE	Empresa Metropolitana de Águas e Energia
ETD	Estação Transformadora de Distribuição
ETT	Estação Transformadora de Transmissão
ETU	Estação Transformadora de Usina
FURNAS	Companhia Geradora e Transmissora de Energia
GECO	General Electric Company
GVO	Gande Volume de Óleo
HB-PED C1	Linha Henry Borden Pedreira Circuito 1
HB-PED C2	Linha Henry Borden Pedreira Circuito 2
IO-ON.SE.3SP	Instrução de Operação Normal da Área 345/230 kV de São Paulo
LIGHT S/A	Serviços de Eletricidade S/A

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico da Grande São Paulo**

Lista de abreviaturas e siglas

LT	linha de transmissão
MPO	Manual de Procedimento da Operação
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
Petrobrás	Petróleo Brasileiro S.A
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PSAT	Power System Analysis Toolbox
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo S.A
SE	Subestação
SIN	Sistema Interligado Nacional
TYE	Trecho de linha de transmissão
UEP	Usina Elevatória de Pedreira
UET	Usina Elevatória de Traição
UG's	Unidades Geradoras
UHB	Usina Hidroelétrica Henry Borden
UNP	Usina Termoelétrica Nova Piratininga
UTP	Usina Termoelétrica Piratininga

Lista de símbolos

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampére – unidade de corrente elétrica
avr	Regulador automático de tensão
B	Susceptância
ca	Corrente alternada
cc	Corrente contínua
<i>droop</i>	Estatismo
dslc	Sincronizador Digital e Controle de Carga
E_f	Tensão gerada, por fase
E_g	Tensão gerada pelo gerador
EHI	Interface Eletro-Hidráulica
E_m	Tensão recebida pelo motor
<i>fmm</i>	Força magneto motriz
fp	Fator de potência
H	Constânte de inércia
HP	Horse Power – unidade de potência mecânica
Hz	Hertz – unidade de frequência
I	Corrente elétrica
K_{eq}	Ganho de equalização
K_{ff}	Ganho <i>feedforward</i>
Kg	Quilograma – unidade de peso
km ²	Quilometro quadrado – unidade de área (10 ⁶ m ²)
kV	Kilovolt – unidade de tensão elétrica (10 ³ V)
m ³	Metro cúbico - unidade de volume

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico da Grande São Paulo**

Lista de símbolos

m	Metro – unidade de distância
ms	Mili segundo – unidade de tempo
m ³ / s	Metro cúbico por segundo - unidade de vazão
MVA	Megavoltampere – unidade de potência aparente (10 ⁶ VA)
MVAr	Megavoltamper reativo – unidade de potência reativa (10 ⁶ Var)
MW	Megawatt – unidade de potência (10 ⁶ W)
MW.h	Megawatthora – unidade de energia elétrica
P	Potência Ativa (W)
pid	Proporcional-Integral-Derivativo
Pmec	Potência mecânica
PQ	Barra com potências P e Q constantes
Ppri	Potência primária
PRT	Painel de Regulação de Tensão
pu	por unidade
PV	Barra com potência P e tensão V constantes
Q	Potência Reativa (VAr)
Ra	Resistência do enrolamento da armadura
RN-EPUSP	Referência de nível da USP
rpm	Unidade de velocidade - rotação por minuto
<i>Slack bus</i>	Barra de folga
T	Torque Mecânico
T ^{''} d	Constante de tempo subtransitória de eixo direto
T ^{''} q	Constante de tempo subtransitória de eixo quadratura
tg	Regulador automático de velocidade

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico da Grande São Paulo**

Lista de símbolos

t_{mr}	Modular de Tripla Redundância
v	Volt – unidade de tensão elétrica
X_d	Reatância de eixo direto
X'_d	Reatância transitória de eixo direto
X''_d	Reatância subtransitória de eixo direto
X_q	Reatância de eixo quadratura
X'_q	Reatância transitória de eixo quadratura
X''_q	Reatância subtransitória de eixo quadratura
X_{ar}	Indutância da reação da armadura
X_d	Reatância síncrona do eixo d
X_g	Reatância síncrona do gerador
X_i	Indutância da armadura
X_m	Reatância síncrona do motor
X_s	Reatância síncrona
X_q	Reatância síncrona do eixo q
Z	Impedância
ω_s	Velocidade Angular
δ	Ângulo de potência do gerador
θ	Ângulo entre a tensão e a corrente

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico da Grande São Paulo**

Sumário

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	A definição do problema	4
2	O ESTADO DA ARTE	8
2.1	Um breve histórico	8
2.2	O estado da arte	9
3	O SISTEMA ELÉTRICO	16
3.1	Linhas de transmissão do sistema	16
3.2	Transformadores e autotransformadores do sistema	16
3.3	Compensadores síncronos	17
3.3.1	Compensador síncrono de Ibiúna	17
3.3.2	Compensador síncrono de Embu-Guaçú	18
3.3.3	Compensador síncrono de Santo Ângelo	18
3.3.4	Compensador síncrono de Tijuco Preto	18
3.4	Usinas do sistema	19
3.4.1	Usina Henry Borden	19
3.4.1.1	Usina Henry Borden Seção Externa	21
3.4.1.2	Usina Henry Borden Seção Subterrânea	22
3.4.2	Usina Termoelétrica Piratininga	24
3.4.3	Usina Termoelétrica Fernando Gasparian	25
3.4.4	Usina Elevatória de Traição	25
3.4.5	Usina Elevatória de Pedreira	26

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico da Grande São Paulo**

Sumário

3.4.6	Usina Elevatória de Pedreira - Ensaios Operacionais	28
3.5	Cargas do sistema	29
3.6	Operação do sistema	30
3.6.1	Área de 230kV e 88kV	30
3.6.2	Área de 345kV e 440kV	32
4	O CONTROLE DO SISTEMA ELÉTRICO	35
4.1	Aspectos gerais da regulação do sistema	35
4.2	Reguladores de velocidade	38
4.2.1	Usina Henry Borden seção Subterrânea	41
4.2.2	Usina Henry Borden seção Externa	43
4.2.3	Usina Termoelétrica Piratininga	45
4.2.4	Usina Termoelétrica Fernando Gasparian	46
4.2.5	Usina Elevatória de Pedreira	47
4.2.6	Usina Elevatória de Traição	47
4.2.7	Compensadores Síncronos	48
4.3	Reguladores de tensão	48
4.3.1	Usina Henry Borden seção Subterrânea	49
4.3.2	Usina Henry Borden seção Externa	51
4.3.3	Usina Termoelétrica Piratininga	53
4.3.4	Usina Termoelétrica Fernando Gasparian	53
4.3.5	Usina Elevatória de Pedreira	54
4.3.6	Usina Elevatória de Traição	54
4.3.7	Compensadores Síncronos	55

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico da Grande São Paulo**

Sumário

5	TEORIA DOS COMPONENTES DO SISTEMA	56
5.1	Aspectos gerais	56
5.1.1	Estabilidade de frequência	58
5.1.2	Estabilidade de tensão	59
5.2	A carga	60
5.3	A máquina síncrona	61
5.3.1	Efeito da Excitação da Máquina Síncrona	62
5.3.2	Curva de Capabilidade do Gerador Síncrono	69
5.3.3	Estabilidade angular	72
5.3.4	Estabilidade a pequenas perturbações	73
5.3.5	Estabilidade transitória	74
5.3.6	Enrolamentos amortecedores	76
5.4	Compensador síncrono	78
6	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO SISTEMA	80
6.1	Descrição geral	80
6.2	A construção do diagrama estudado	83
6.2.1	Barra	84
6.2.2	Linhas de transmissão	84
6.2.3	Transformadores	85
6.2.4	Disjuntores	85
6.2.5	Máquinas síncronas	86
6.2.6	Regulador de tensão	88
6.2.7	Regulador de velocidade	89
6.2.8	Banco de capacitores e indutores	90

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico da Grande São Paulo**

Sumário

6.2.9	Carga	91
6.2.10	Bloco PV	91
6.2.11	Bloco Slack bus	92
6.2.12	Bloco de frequência	92
6.3	Descrição geral do sistema	92
6.3.1	Caso 1	96
6.3.2	Caso 2	97
6.3.3	Caso 3	98
6.3.4	Caso 4	99
7	RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	101
7.1	Aspectos gerais	101
7.2	Perda da LT HB – PE1 – caso 2	102
7.3	Perda da LT HB – PE1 – caso 4	105
7.4	Perda do Bando de Capacitores da Barra 485 – caso 3	110
7.5	Perda do Gerador 31 de Fernando Gasparian – caso 3	110
7.6	Perda do Gerador 1 de Henry Borden caso 4	114
7.7	Perda da Carga da Barra 485 – caso 3	119
7.8	Perda da Carga da Barra 3488 – caso 3	122
7.9	Curto-Circuito na Barra 483 – caso 3	124
7.10	Perda do TR1 de Piratininga – caso 3	129
8	CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS	131
8.1	Conclusões	131
8.2	Propostas para futuros trabalhos	138

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico da Grande São Paulo**

Sumário

Bibliografia	139
Anexo A – Diagrama elétrico da região estudada	144
Anexo B – Parâmetros e ensaios dos equipamentos do sistema	147
Anexo C – Reguladores de velocidade	162
Anexo D – Curvas de capacidade	164

CAPÍTULO I
INTRODUÇÃO

Construída no século passado, com a primeira unidade geradora de energia elétrica, unidade nº1, entrando em operação em 1926, a Usina Hidroelétrica de Henry Borden desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de São Paulo. Localizada no município de Cubatão, estado de São Paulo, ao pé da serra do mar, essa usina é considerada um marco da engenharia hidroenergética, sendo a obra mais desafiadora da época. Sua operação depende da represa Billings, que apresenta, em sua topografia, um aproveitamento hidráulico na forma de um reservatório artificial de acumulação e da barragem reguladora do Rio das Pedras, a um desnível de 720m em relação ao nível do mar. Para completar a vazão natural que alimentaria a usina, foi projetada a canalização do rio Pinheiros, para posterior reversão, lançando suas águas no reservatório Billings; entretanto, seria necessário vencer o desnível de 30m que os separava. Para esse propósito, foram construídas duas usinas de bombeamento, a Usina Elevatória de Traição e a Usina Elevatória de Pedreira que, após sua instalação no canal Pinheiros retificado, permitiu a reversão contínua das águas lançando-as no reservatório Billings. Porém, em função da contínua degradação da qualidade das águas que transitam na região metropolitana de São Paulo, em 1992, através da Resolução Conjunta SMA/SES-03, suspendeu-se, por tempo indeterminado, o bombeamento contínuo dessas águas, exceto para controle de cheias.

Essa restrição impôs à Usina Henry Borden uma limitação na sua capacidade de geração e, conseqüentemente, a todas as cargas a ela ligadas. Com o crescente aumento da demanda por energia elétrica, algumas cargas atendidas por essa malha começaram a detectar problemas no fornecimento de energia, sendo o mais comum, dentre eles, o baixo nível de

Capítulo I - Introdução

energia elétrica, ou seja, (baixo perfil de tensão). A solução encontrada foi o fornecimento de energia reativa através da Usina Elevatória de Pedreira [18]. A disponibilidade de potência reativa apresenta grandes vantagens por requerer pequenos investimentos, porém, seus impactos no sistema elétrico ainda não são totalmente conhecidos.

A possibilidade de avaliação desses impactos direciona este trabalho cujo objetivo é analisar a estabilidade transitória das máquinas e da dinâmica em parte do sistema elétrico de São Paulo, por meio de simulações computacionais, e verificar seu comportamento em contingências preestabelecidas que representem as falhas e eventos mais comuns do dia a dia em grandes sistemas elétricos de potência.

Henry Borden, Pedreira e Traição são algumas das usinas operadas pela EMAE – Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A. A descrição do parque gerador da EMAE será detalhada mais adiante.

Localizada em um dos maiores centros de carga do Brasil, com linhas de transmissão de pequena extensão, uma geração firme de 889MW e duas usinas de bombeamento reversíveis com capacidade de geração de potência reativa, essa malha é, estrategicamente, necessária e de elevada confiabilidade para o sistema.

Em se tratando de uma pesquisa, com lastro em um sistema real, este trabalho tem grande importância acadêmica por apresentar resultados práticos similares aos teóricos contribuindo para a solidificação do conhecimento sobre a dinâmica e a estabilidade das máquinas e do sistema.

Para a EMAE, a qual o sistema estudado pertence, a pesquisa revelou uma grande oportunidade de aumentar sua participação na operação do sistema elétrico de São Paulo, criando uma nova identidade para a usina no sistema elétrico, gerando, também, nova receita para a empresa.

Capítulo I - Introdução

Visando à melhor compreensão do assunto abordado e do desenvolvimento deste trabalho, será apresentada, abaixo, a estrutura desta dissertação de mestrado.

O Capítulo I, *Introdução*, contém a explicação sobre a sua estrutura, seu desenvolvimento, a indicação dos assuntos por capítulos e uma definição do problema existente - o motivador deste estudo.

No Capítulo II, *O Estado da Arte*, é apresentada a descrição completa do problema do sistema elétrico estudado, tratando, principalmente, da estabilidade transitória das máquinas e da dinâmica do sistema, suas causas e consequências. Estão incluídos também itens referentes ao histórico, a aspectos ambientais gerais do complexo formado pelas usinas e principais estruturas de operação.

O Capítulo III, *O Sistema Elétrico*, será ilustrado com diagramas elétricos, tabelas e dados técnicos das usinas de geração hidráulica e térmica, usinas elevatórias de bombeamento, linhas de transmissão às quais estão conectados compensadores síncronos que compõem essa malha, os vários transformadores responsáveis por conectar todo esse sistema em seus diferentes níveis de tensão e suas diversas cargas. São mencionadas, inclusive, as características operacionais com as limitações e recomendações através das instruções de operação do ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico.

Neste Capítulo são apresentados ainda os ensaios e testes realizados nos geradores reversíveis da Usina Elevatória de Pedreira pela LIGHT S/A (Serviços de Eletricidade).

No Capítulo IV, *Controle do Sistema*, são expostas as teorias sobre os sistemas de regulação e seus modelos, especificando cada um dos equipamentos pertencentes às usinas presentes neste trabalho.

No Capítulo V, *Teoria dos Componentes do Sistema*, são apresentados os desenvolvimentos teóricos dos principais equipamentos elétricos presentes no sistema em

Capítulo I - Introdução

estudo, representados por meio das curvas características de funcionamento de cada equipamento, seus limites de operação e aplicações.

O Capítulo VI, *Simulação Computacional do Sistema*, é dedicado à exploração dos programas utilizados nas simulações computacionais, suas parametrizações e dados utilizados. Um deles é o “PSAT” (Power System Analysis Toolbox), desenvolvido por Federico Milano, e de domínio público; “ANAREDE” (Análise de Redes) é o outro, programa oficial do CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), utilizado pelo ONS (Operador Nacional do Sistema) e por empresas pertencentes ao Sistema Elétrico brasileiro.

O Capítulo VII, *Resultados e Análise dos Resultados Obtidos*, contém os resultados obtidos mediante simulações do sistema, comparando-os com o comportamento mais real possível do sistema e das máquinas.

No Capítulo VIII, *Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros*, estão detalhados não só os resultados mas também as conclusões obtidas após estudo realizado por intermédio das simulações, sugerindo, ainda, novos trabalhos a partir desses resultados.

1.1 – A Definição do Problema

A questão da compensação reativa e de sua influência na tensão de um determinado sistema de potência são assuntos que vêm sendo discutidos por especialistas do setor de energia elétrica há bastante tempo. Nesse aspecto, a compensação reativa, quando efetuada de forma adequada, é necessária para, dentre outras razões, garantir um maior e melhor aproveitamento do sistema elétrico existente. Essa prática propicia o equilíbrio conveniente no balanço entre a geração e o consumo de potência reativa e, desse modo, disponibiliza, para a operação, uma condição própria de controle de tensão, principalmente, o atendimento ao sistema [18].

Capítulo I - Introdução

A compensação de energia reativa por parte de sistemas, quer sejam estáticos como os bancos de capacitores, quer dinâmicos como os compensadores síncronos da Usina Elevatória de Pedreira - foco deste trabalho - somente tem influência positiva quando realizada próximo às cargas [13].

Em função do baixo perfil de tensão verificado nas barras do sistema de subtransmissão de 88kV da AES Eletropaulo S.A. (distribuidora de energia elétrica), foi colocado, em prática, um estudo sobre a geração de energia reativa através da Usina Elevatória de Pedreira trazendo resultados positivos na correção dessas tensões [18].

Em 2009 e 2010, a usina trabalhou conectada ao sistema, cerca de 11,77% e 16,59% do tempo, respectivamente, funcionando apenas como motor, bombeando as águas do controle de cheias. Para o sistema elétrico, a usina Elevatória de Pedreira sempre foi considerada uma carga consumindo energia ativa média de 100 MW quando conectada como bomba.

Vale lembrar que a conexão da Usina, como compensador síncrono, dá-se apenas de segunda a sexta-feira, das 08h00min. às 24h00min. Diariamente, das 00h00min. às 08h00min., as unidades permanecem conectadas ao sistema, porém, com o seu fornecimento de energia reativa no mínimo. Em feriados, finais de semana e pontes que ligam feriados prolongados, as unidades também não são despachadas ficando, nesses casos, desligadas eletricamente, ou seja, máquina parada e disjuntor aberto, de acordo com a Instrução de Operação (IO-ON. SE. 3SP) do ONS [31].

Diante dessa nova situação, foi feito um estudo para se analisar a estabilidade dinâmica dessas máquinas no sistema, uma vez que esse procedimento não faz parte da operação atual da usina em questão.

Além dessa mudança, com referência à sua forma de estar conectada ao sistema,

Capítulo I - Introdução

fornecendo, agora, energia reativa, ela passa a ficar conectada durante um tempo maior do que aquele do período de bombeamento. Essa forma de operação é muito conveniente, pois evita um número excessivo de partidas dessas máquinas, mas pode implicar em impactos dinâmicos mais severos tanto para as máquinas da usina como para o sistema.

Este estudo exemplificará casos e situações com o intuito de entender e visualizar os efeitos dessa usina conectada operando como compensador síncrono.

Do ponto de vista elétrico, essa operação contribui para a manutenção do perfil correto de tensão em algumas barras do sistema: as ETD's – Estações Transformadoras de Distribuição de Imigrantes, Varginha e Rio Bonito, pertencentes à empresa AES Eletropaulo S.A. (distribuidora de energia elétrica). Apesar de estarem próximas às usinas de geração de energia elétrica, essas estações apresentam baixas tensões nos seus barramentos de 88kV, o que obriga a empresa a fazer a compensação de tensão por meio de seus transformadores de potência e banco de capacitores, o que, às vezes, não é o suficiente. A ETD Imigrantes possui transformador sem tap de regulação de tensão, fazendo a baixa tensão no 88kV refletir-se na média tensão de distribuição (13,8kV).

A compensação por parte das unidades geradoras reversíveis da Usina Elevatória de Pedreira tem, como vantagem, a utilização de recursos próprios da empresa não havendo, aí, a necessidade de grandes aportes financeiros adicionais para se corrigir tal problema.

A operação das máquinas para o controle de cheias, quando operando como compensador síncrono, traz grande benefício. O tempo de partida de uma máquina parada para o bombeamento, que gira em torno de 20 minutos, passa a ser imediato, o que, em termos de tempo para a operação de combate às cheias, torna-se extremamente significativo.

A geração de reativo, por parte dessas máquinas, traz, ainda, uma economia de energia aos cofres da empresa EMAE. Quando as máquinas estão desligadas, devem manter o

Capítulo I - Introdução

estator e o rotor aquecidos e isso consome energia na forma de calor. Um exemplo é o ocorrido em 2004, na Usina Elevatória de Pedreira, que ficou ligada ao sistema apenas 2,84% do tempo funcionando como motor e bombeando as águas para o controle de cheias. No restante, ficou parada, consumindo uma energia de 518,3 MW/h, com o custo anual de R\$ 40.427,00, somente para manter seus enrolamentos aquecidos evitando que absorvessem umidade, o que diminuiria a sua vida útil [18].

Nos períodos de estiagem, as máquinas ficam paradas por longo tempo, sendo necessários, semanalmente, testes de movimentação de máquinas, implicando várias partidas durante esse período, o que, também, pode diminuir a sua vida útil.

Diante desses e de outros benefícios provenientes da geração da energia reativa, a operação contínua das máquinas despertou a curiosidade sobre possível impacto dinâmico para essas unidades, para os geradores de usinas adjacentes e para o sistema como um todo.

No capítulo II, será apresentada uma descrição sobre os problemas operativos mais comuns do sistema, um mapa da região estudada e um resumo dos aspectos históricos deste sistema.

CAPÍTULO II

O ESTADO DA ARTE

2.1 – Um Breve Histórico

Em 1883, ocorre, no Brasil, o primeiro aproveitamento hidrelétrico para uso privado na mineração Santa Maria, em Diamantina MG e, em 1884 Rio Claro no estado de São Paulo, passa a ser a segunda cidade a ter iluminação pública [1]. Com o desenvolvimento do setor elétrico, em 1892 circula o primeiro bonde elétrico na cidade do Rio de Janeiro e São Paulo, em 1900. A partir dessa época, os grandes centros nacionais, as capitais e principais cidades vão recebendo iluminação e transporte elétrico, mas as indústrias ainda não conseguem emergir. Somente em 1920, graças às disponibilidades hídricas, São Paulo passa a ser a região mais industrializada.

Muitas cidades, no Brasil, possuíam pequena geração hidráulica própria, não sendo suficiente para o seu desenvolvimento, atendendo apenas o básico, a iluminação, e isso impactava diretamente suas economias; seria necessário interligar os centros, mas essa tecnologia era, ainda, rudimentar.

Em 1922, chega ao Brasil, a convite de Alexander Mackenzie, o engenheiro americano Asa K. Billings, trazendo, na bagagem, uma significativa experiência internacional e vocação inovadora. Formando um grupo seleto de especialistas, composto por brasileiros como Edgard de Souza e Eloy Chaves, logo percebem que as Pequenas Centrais Hidroelétricas já não mais cumpriam o seu papel; era, então, chegado o momento das Grandes Centrais Hidroelétricas. Um ousado projeto de reversão das águas do planalto rumo ao Oeste, para armazená-las em um grande reservatório, deu origem, em 1926, à Usina Hidroelétrica Henry Borden, com uma capacidade inicial instalada de 28.050KW.

Capítulo II – Um breve histórico e o estado da arte

Isso era, entretanto, apenas um pequeno passo rumo ao progresso. Havia, ainda, um grande obstáculo a ser vencido – a unificação de todas as centrais de geração.

A maior parte das Pequenas Centrais Hidroelétricas já operava em 50 ou 60Hz, mas havia diferentes frequências em diversas localidades como, por exemplo, Curitiba com 42Hz, Jundiá com 40Hz e Petrópolis com 125Hz [1].

Através do Decreto-Lei n. 4.295, de 13 de maio de 1942, fica, então, determinada a utilização das frequências de 50 e 60Hz. O passar do tempo aliado a vários estudos e ao surgimento de dificuldades, em 1961, levou uma comissão a recomendar a utilização da frequência de 60Hz.

Graças a essa padronização, foi possível a unificação dos grandes centros de geração e carga. Para isso foram utilizados dois dispositivos elétricos relevantes para a interligação dos sistemas - as linhas de transmissão e os transformadores. Esse sistema deu origem às instalações atuais e que são utilizadas nesta pesquisa.

2.2 – O Estado da Arte

Por definição do ONS, para fins de estudos elétricos e em função das características de cada região, o Estado de São Paulo foi dividido por áreas. Apresentamos, aqui, o sistema elétrico em estudo que se refere à área VI. Esta área atende a parte do mais importante e complexo centro consumidor de energia elétrica do país - a cidade de São Paulo, incluindo, também, parte do litoral que compreende as cidades de Santos, Praia Grande, Cubatão e São Vicente.

Esse sistema é operado por uma série de empresas que compõem essa malha: EMAE (geração de energia elétrica), AES Eletropaulo S.A. e CPFL Piratininga S.A. (distribuidoras de energia), FURNAS - Centrais Elétricas S.A. (geradora e transmissora de energia), CTEEP -

Capítulo II – Um breve histórico e o estado da arte

Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista S.A. (transmissão de energia), EDP Bandeirante S.A. e ELEKTRO – Eletricidade e Serviços S.A. (distribuição de energia) e CESP – Companhia Energética de São Paulo S.A. (geração de energia elétrica).

Historicamente, esse sistema foi muito importante no século passado sendo responsável pelo desenvolvimento e avanço industrial da região metropolitana de São Paulo.

Naquela época, foram construídos dois dos maiores e mais importantes complexos geradores de energia elétrica, a Usina Hidroelétrica Henry Borden e a Usina Termoelétrica Piratininga. Essas construções foram consideradas como marco histórico devido à sua grandeza e aos desafios tecnológicos para a época, sendo, sem dúvida, uma obra essencial na área para o desenvolvimento elétrico e industrial de São Paulo e do Brasil.

Com o decorrer do tempo, uma forte industrialização e urbanização tomaram conta, rapidamente, dessas áreas transformando a cidade na megametrópole como a conhecemos hoje. Associado a esse crescimento, houve um grande aumento nas cargas da região trazendo a necessidade da construção de diversas subestações transformadoras de transmissão, distribuição e várias linhas de transmissão para interligarem esses sistemas, permitindo o incremento de geração de grandes usinas como, por exemplo, Ilha Solteira e Três Irmãos da (CESP), Itaipu e outras.

Graças às linhas de transmissão de extra-alta-tensão de corrente alternada ou por meio do interessante sistema de transmissão, também extra-alta-tensão por corrente contínua, essa energia pode chegar, com grande facilidade e rapidez, aos centros consumidores para os quais é destinada.

Por conta da extensão do país e das distâncias percorridas pela energia ao se deslocar das usinas geradoras para os centros consumidores, o sistema conta, hoje, com diversos níveis de tensão e, graças aos sistemas de transformação de energia, todos esses níveis diferentes de

Capítulo II – Um breve histórico e o estado da arte

tensão puderam ser interligados.

Essa imensa malha também necessita de dispositivos de controle, começando pelos reguladores de tensão e velocidade dentro das centrais geradoras e terminando na própria malha do sistema elétrico. Além desses, existem ainda os bancos de capacitores, os indutores, os compensadores síncronos e os transformadores reguladores que estão dispostos, estrategicamente, em algumas subestações ao longo do sistema.

Em São Paulo, as subestações de 88kV Piratininga e Baixada Santista possuem banco de capacitores de 28,8MVar e 126MVar; nas subestações de 345kV Ibiúna e Tijuco Preto existem bancos de 1200MVar e 800MVar; em ambos os casos compatíveis com a quantidade de energia transportada.

Além de dispositivos como esses, existem, inclusive, usinas que ficam praticamente no centro de carga e que, através da potência reativa fornecida por seus geradores, é possível controlar as tensões nas barras de 88kV e 230kV, caso da Usina Hidroelétrica Henry Borden, pertencente à (EMAE) [27].

Compondo esse cenário, há a Usina Elevatória de Traição (UET) e a Usina Elevatória de Pedreira (UEP) cuja função é inverter o fluxo normal das águas do canal Pinheiros para seu bombeamento na represa Billings, objetivando o melhor aproveitamento na Usina Hidroelétrica Henry Borden. Hoje, por motivos ambientais, esse bombeamento fica condicionado a determinadas situações que venham a permiti-lo, como é o caso do controle de cheias do sistema Tietê/Pinheiros de São Paulo. Além disso, em função do baixo nível de água no reservatório, a geração de potência ativa é menor que a capacidade disponível, operando, então, boa parte do tempo gerando potência reativa.

O acréscimo de geração e de cargas conectadas às linhas de interligação desse sistema trouxe, também, o aumento do nível de corrente de curto-circuito, o que obriga o sistema a

Capítulo II – Um breve histórico e o estado da arte

operar de forma restrita [32]. Outra particularidade é a existência de algumas linhas de transmissão muito antigas e com alto valor de impedância devido à sua construção e características de manutenção.

Esse é o caso das linhas entre a ETU - Henry Borden e a ETU - Pedreira, que são as Linhas de 88kV HB-PED C1 e HB-PED C2, as quais alimentam as ETD's Varginha, Rio Bonito e Imigrantes. Além dessas peculiaridades, as cargas alimentadas pelo sistema possuem características sazonais tendo em vista as regiões atendidas - a capital e o litoral, devendo ser levado em conta, ainda, a característica do aproveitamento da energia pelos segmentos industrial, residencial e comercial.

Além disso, é através dessas linhas de transmissão que o sistema pode (em certas condições) operar em anel, permitindo haver intercâmbio de fluxos de energia ativa e reativa. Na Figura 2.1 é mostrada a área de estudos na região de São Paulo e na Figura 2.2 o detalhe da área estudada. A Figura A1, anexo A, mostra o diagrama elétrico reduzido utilizado no modelo de simulação.

O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na Dinâmica do Sistema Elétrico da Grande São Paulo

Capítulo II – Um breve histórico e o estado da arte

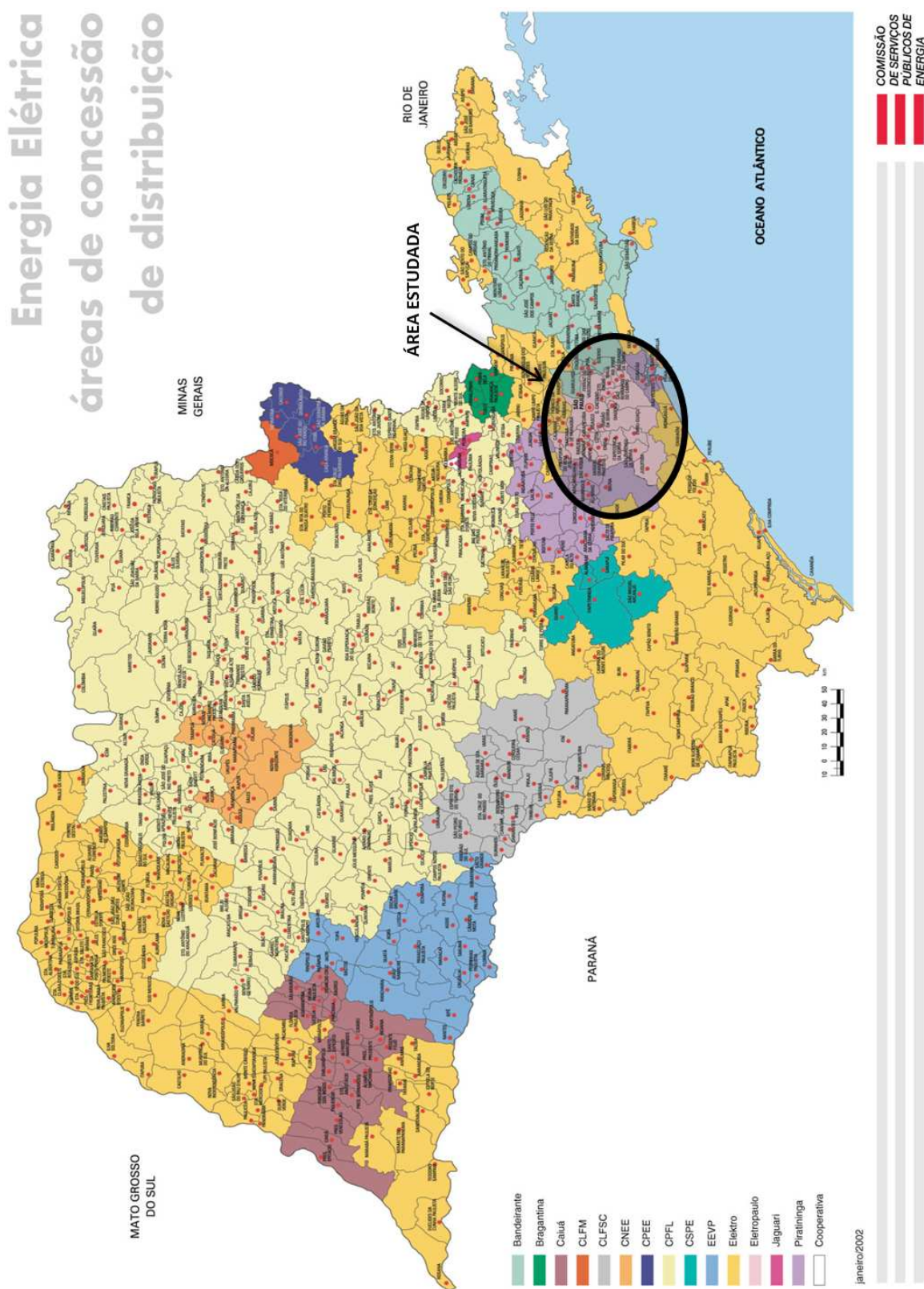


Figura 2.1 – diagrama elétrico da área estudada no Estado de São Paulo

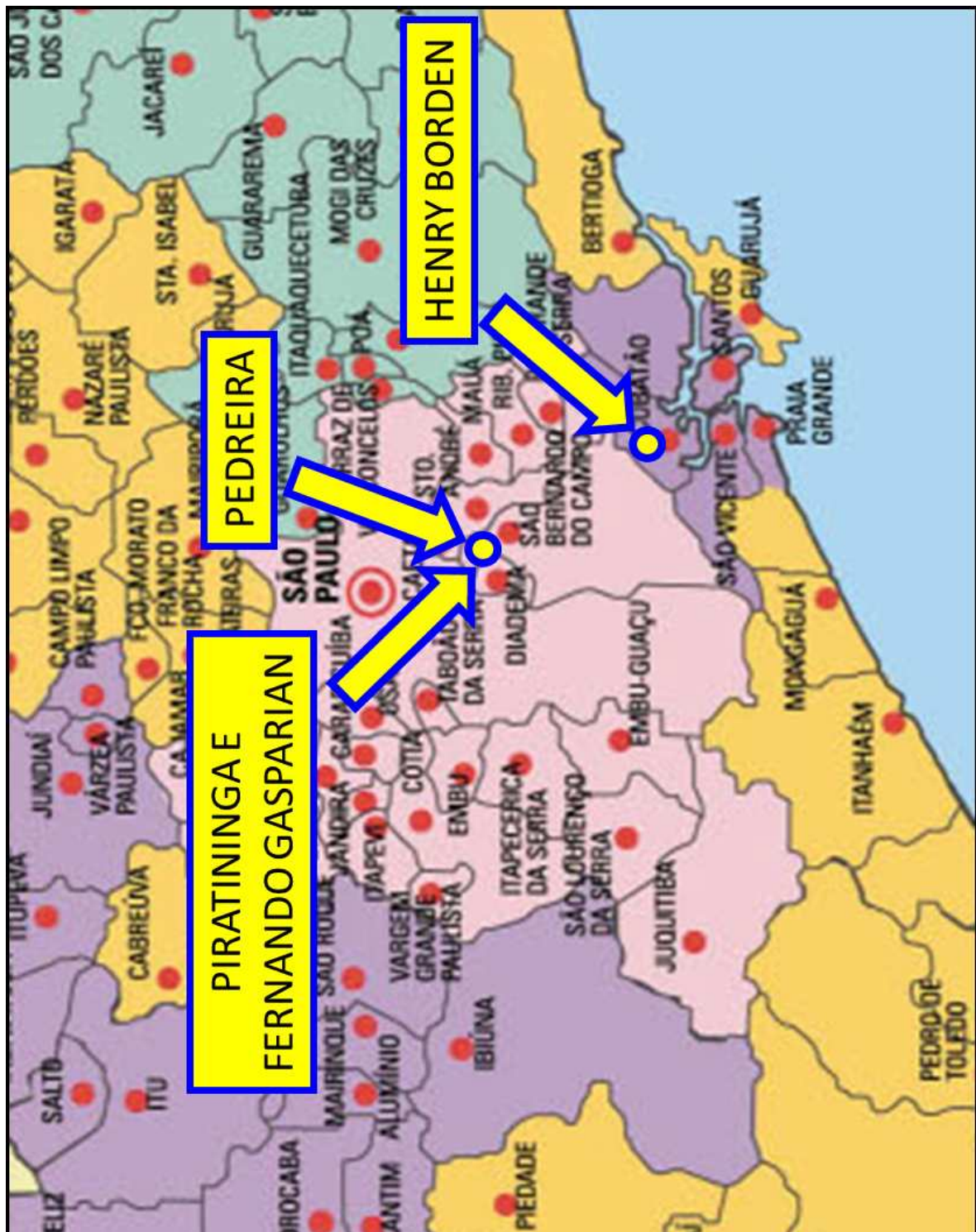


Figura 2.2 – detalhe da área estudada

Capítulo II – Um breve histórico e o estado da arte

Hoje, devido a uma progressiva ocupação desordenada e consequente crescimento da demanda por energia, vive-se uma situação cada vez mais complexa graças a, principalmente, dois fatores: falta de investimentos e constante degradação da infraestrutura, ambos são barreiras para possível solução dos problemas.

Embora, praticamente, $\frac{1}{4}$ da energia elétrica do Brasil esteja no estado de São Paulo, ainda existem, inacreditavelmente, áreas com problemas de baixa-tensão e restrições operativas como é o caso das cargas das ETD's Varginha, Rio Bonito e Imigrantes, alimentadas pelas linhas Henry Borden - Pedreira.

O capítulo III, a seguir, apresentará, além das principais características das usinas presentes neste estudo, as condições e restrições a elas impostas.

CAPÍTULO III

O SISTEMA ELÉTRICO

Este capítulo apresenta as características de todas as usinas e equipamentos do sistema estudado, detalhando as principais condições e restrições dos componentes do sistema elétrico em estudo.

3.1 - Linhas de Transmissão do Sistema

O sistema elétrico em estudo possui 88 linhas de transmissão em vários níveis de tensão que vão desde 20kV até 440kV. Devido à época em que foi construído, o tipo de projeto, níveis de tensão, comprimento, materiais disponíveis na época e o seu contínuo envelhecimento, é possível observar que os parâmetros das linhas são bem diferentes. No Anexo B, a Tabela B1 apresenta os parâmetros das linhas de transmissão utilizadas neste estudo, retirados do programa Anarede do ONS (base 100MVA e tensão 138kV) [36].

3.2 - Transformadores e Autotransformadores do Sistema

Igualmente, ou até mais importantes do que as linhas de transmissão, dada à elevada quantidade e diferentes níveis de tensão, os transformadores e os autotransformadores são largamente utilizados ao longo de todo o sistema, sendo em um total de 49 transformadores e 3 autotransformadores.

Sua inserção nos circuitos de potência é estrategicamente importante, pois são os únicos dispositivos elétricos capazes de conectar os vários sistemas de energia em níveis diferentes de tensão. A Tabela B2 no Anexo B apresenta os dados dos transformadores e dos auto transformadores de interligação do sistema.

Capítulo III – O Sistema Elétrico

Obs: O tap usual varia conforme a característica da carga (leve, média e pesada) e com o período do ano. Os parâmetros foram retirados do programa Anarede do ONS (base 100MVA e tensão 138kV) [36].

3. 3 - Compensadores Síncronos

Os compensadores são grandes máquinas síncronas que não geram potência ativa, são responsáveis por gerar apenas grandes montantes de potência reativa, operando no sistema como grandes motores em flutuação. A malha em estudo possui quatro (4) compensadores síncronos distribuídos estrategicamente nos pontos de entrada de energia do sistema de São Paulo, eles tem a função de ajustar a tensão da região, operando nas barras de 345kV e 440kV [18] [38].

A seguir serão descritos em detalhes as características de cada um deles:

3.3.1 - Compensador Síncrono de Ibiúna.

Pertence à FURNAS - Centrais Elétricas S.A. (geradora e transmissora de energia elétrica), é composto por quatro máquinas síncronas, podendo produzir um total de energia reativa que vai de (+1.200MVar) à (- 1080MVar). Sua tensão de saída é de 20kV, ligado através de um transformador, ficando conectado à Subestação de Ibiúna de 345kV.

Ele é responsável pelo ajuste de tensão na entrada da energia proveniente do elo de corrente contínua de Itaipú, mantendo a tensão na barra nº 86 – Ibiúna de 345kV nos seguintes patamares: Carga pesada e média de 354kV à 362kV e na carga leve de 335kV à 348kV.

Sua principal função é evitar que haja um colapso de tensão, caso haja perda de um bipolo do elo de corrente contínua, por isso, é importante trabalhar sempre com o máximo de folga de potência reativa possível.

3.3.2 - Compensador Síncrono de Embu-Guaçu.

Propriedade da empresa CTEEP - Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista S.A. (transmissão de energia elétrica), este compensador é acionado por um motor assíncrono de rotor bobinado que é montado sobre o mesmo eixo do compensador. Esse motor de 8 pólos aciona todo o conjunto até a velocidade de sincronismo, 900rpm, podendo produzir energia reativa que vai de (+ 250MVar) à (-175MVar), com uma tensão de saída é de 16kV e corrente de 9.021A. Ligado através de um transformador, este conjunto fica conectado à Subestação de Embú-Guaçú de 440kV.

Tem a função de controlar a tensão na barra nº 582 - Embu Guaçu de 345kV nos seguintes patamares: Carga pesada e média de 354kV à 362kV e carga leve de 335kV à 348kV.

3.3.3 – Compensador Síncrono de Santo Ângelo.

Este também da mesma empresa CTEEP - Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista S.A. (transmissão de energia elétrica), é acionado por um motor assíncrono de rotor bobinado nas mesmas condições descritas anteriormente no compensador de Embú-Guaçú.

Pode gerar energia reativa de (+ 250MVar) à (- 175MVar), com uma tensão de saída de 16kV. Ligado através de um transformador, fica conectado à Subestação de Santo Ângelo de 440kV com a função de controlar a tensão na barra nº 449, Santo Ângelo de 345kV, nos patamares de carga pesada e média de 354kV à 362kV e na carga leve de 335kV à 348kV.

3.3.4 – Compensador Síncrono de Tijuco Preto

Também da empresa FURNAS - Centrais Elétricas S.A. (geradora e transmissora de energia elétrica), o compensador síncrono de Tijuco Preto pode gerar energia reativa que vai de (+ 300MVar) à (- 180MVar) com uma tensão de saída de 20kV. Conectado à Subestação

Capítulo III – O Sistema Elétrico

de Tijuco Preto de 345kV através de um transformador de três enrolamentos, ele é responsável pelo ajuste da tensão na entrada da energia proveniente das linhas de extra alta tensão de 750kV de Itaipu. Sua função é manter a tensão na barra nº 78, Tijuco Preto 345kV, nos patamares de carga pesada e média de 354kV à 362kV e na carga leve de 335kV à 348kV.

A Tabela B3 no Anexo B apresenta os dados dos Compensadores Síncronos.

3.4 - Usinas do Sistema

O sistema em estudo é composto por um conjunto formado por Usinas Hidroelétricas do complexo gerador Henry Borden seção externa e seção subterrânea, a Usina Termoelétrica de Piratininga e Fernando Gasparian, bem como as Usinas Elevatórias de Pedreira e Traição [27]. Cada uma dessas usinas será detalhada a seguir.

3.4.1 - Usina Henry Borden

O projeto original para o aproveitamento hidráulico da Usina Henry Borden, idealizado pelo Engenheiro Asa K. Billings resultou na formação do Reservatório Billings, localizado no planalto, com capacidade de $1,2 \times 10^9 \text{ m}^3$ e com área inundada de $127,1 \text{ km}^2$ e na construção da Usina Hidrelétrica Henry Borden, que ele alimenta.

Este grande lago artificial é depositário das mais elevadas taxas de precipitações pluviométricas e também das águas captadas da bacia do Rio Tietê.

A barragem principal localizada junto à Estação Elevatória de Pedreira tem 1.500m de comprimento e 25m de altura.

Através da reversão das águas do Canal Pinheiros, as águas da bacia do Rio Tietê são lançadas no Reservatório Billings. Dois outros grandes contribuintes naturais compõem essa bacia, que são o Reservatório do Guarapiranga e do Rio Grande, mas como suas águas são utilizadas para abastecimento, eles se mantêm isolados deste sistema.

Capítulo III – O Sistema Elétrico

Para a viabilização do sistema de geração Henry Borden, a vazão natural do alto da serra não era suficiente, logo, era necessária uma complementação, então foi realizada a canalização do Rio Pinheiros, que anteriormente afluía em direção ao Rio Tietê e construídas as Usinas Elevatórias de Traição e Pedreira. Somadas a um sistema de comportas construído na confluência do Rio Tietê e do Canal Pinheiros, destinadas a controlar a passagem das águas e reter detritos e vegetação aquática, Barragem Móvel e a Estrutura de Retiro, a reversão das águas do Rio Tietê e do Canal Pinheiros tornou-se possível.

Primeiramente a vazão do Rio Tietê é bombeada pela Usina Elevatória de Traição vencendo um desnível de 5m de altura. De Traição, as águas fluem através do Canal Pinheiros até a Usina Elevatória de Pedreira onde são elevadas em mais 25m e lançadas no Reservatório Billings, vencendo um desnível total de 30m.

Por gravidade as águas do Reservatório Billings fluem até o Reservatório de Regulação do Rio das Pedras, onde estão localizadas as tomadas d'água para as duas seções da Usina Henry Borden.

A passagem dessas águas é feita através de um canal a céu aberto de 1.800m de comprimento, por 8,5m de profundidade, Barragem Reguladora Billings-Pedras.

O Reservatório do Rio das Pedras possui 30km² de área e volume d'água de 33.10⁶m³ na cota máxima de *728,50m. Junto a um dos braços do Reservatório do Rio das Pedras fica instalada a Barragem do Rio das Pedras com estrutura em arco de gravidade de 173m de comprimento e 35m de largura. Possui 03 (três) comportas deslizantes, tipo gaveta, com capacidade de descarga de 75,24m³/s na cota máxima de *728,50m.

O sistema hidroelétrico de Henry Borden consiste de duas Usinas; uma Externa e uma Subterrânea, com alta queda hídrica, aproximadamente 728m, e uma das maiores eficiências energéticas, (produtividade = 5,654MW), ou seja, 1 m³/s de água turbinado, gera 5,654MW.

A Figura 3.1 ilustra o sistema hidráulico descrito.

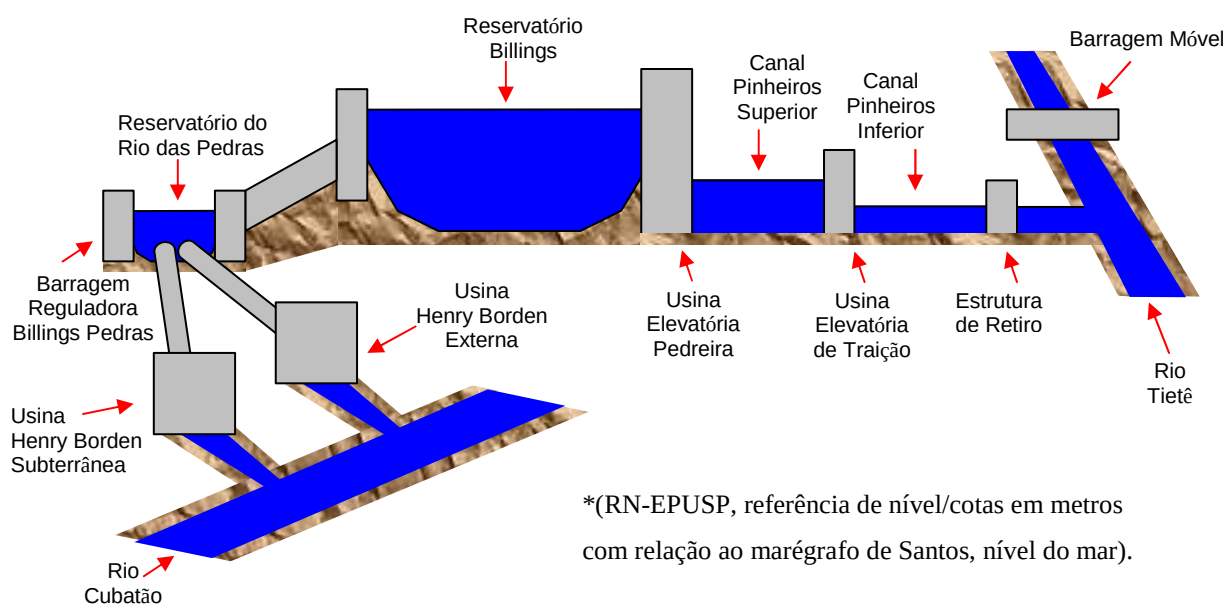


Figura 3.1 – Sistema Hidráulico da EMAE para geração em Henry Borden

Ainda no reservatório Billings, temos a captação de água pela SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo S.A, para abastecimento público e consumo da população. Além dessa captação, as águas desse reservatório são consideradas de usos múltiplos, ou seja, lazer, esporte, captação, reservatório de acumulação e outros, o que leva a EMAE a ter uma complicada operação desse reservatório e em alguns casos a limitação da geração da Usina de Henry Borden.

A seguir veremos em detalhes as principais características destas usinas.

3.4.1.1 – Usina Henry Borden Seção Externa

Construída no início do século passado com entrada em operação da primeira unidade geradora (Gerador 1) em 1926, esta usina é composta por (08) oito unidades geradoras de eixo horizontal, com capacidade instalada total de 469MW. Cada unidade geradora é constituída por duas turbinas tipo Pelton instaladas nas extremidades, cada uma acionada por um injetor. Assentado sobre dois mancais todo o conjunto tem ao centro o gerador com rotor de 20

Capítulo III – O Sistema Elétrico

bobinas-pólos com rotação de 360rpm.

A Tabela B4 do Anexo B apresenta as características dos geradores da Usina de Henry Borden seção externa.

As unidades geradoras nº 1 à 7 geram em seus terminais uma tensão de 11kV e os transformadores elevam para 88kV, suprindo os barramentos Norte e Sul da ETU (Estação Transformadora de Usina) Henry Borden de 88kV. A estação contém 16 linhas de transmissão das empresas; AES Eletropaulo S.A. e CPFL Piratininga S.A. (distribuidoras de energia elétrica), CTEEP S.A. (transmissão de energia elétrica) e uma linha de interligação do sistema de 88/230kV. A unidade geradora nº 8 também de 11kV pode ser conectada tanto as barras de 88kV quanto ao 230kV. Atualmente devido ao elevado nível de corrente de curto circuito na região, essa unidade encontra-se ligada ao sistema de 230kV.

As unidades geradoras nº 1 e 2 são as responsáveis por alimentar todo o sistema auxiliar da estação. Além disso, a usina possui um gerador hidráulico de capacidade de 3,5MVA dedicado exclusivamente para também alimentar o serviço da estação. O sistema de excitação de todas as unidades é rotativo, feito através de um sistema independente composto de um motor que aciona o conjunto de excitação. Esse sistema será descrito em uma seção específica sobre regulação, capítulo IV.

Além disso, essa usina recebe a denominação de “*Black Start*” o que a torna de extrema importância para o sistema de recomposição da região. Usinas consideradas “*Black Start*” são usinas responsáveis por iniciar o sistema elétrico em caso de “*Blackout*”.

3.4.1.2 – Usina Henry Borden Seção Subterrânea

Também do século passado, com entrada em operação em 1956, esta usina tem uma capacidade total instalada de 420MW, distribuídas igualmente entre as (06) seis unidades de (70MW cada). Cada máquina possui uma roda integral de aço inoxidável (turbina hidráulica)

Capítulo III – O Sistema Elétrico

do tipo Pelton de eixo vertical com 4 injetores distribuídos.

A rotação nominal das máquinas é de 450rpm e a queda bruta é igual a 718m. As turbinas das unidades geradoras nº 11 à 14 são de fabricação da empresa Dominion Engineering e os geradores da General Eletric. As turbinas das unidades geradoras nº 15 e 16 são da Allis-Chalmers e os geradores são Westinghouse.

Ligados por meio de mesmo eixo estão turbina, gerador e excitatriz, apenas após a modernização ocorrida em 2001, a excitação piloto passou a ser estática através de tiristores. Assim como o anterior, esse sistema será descrito mais à frente, capítulo IV.

Com uma tensão de saída 13,8kV, esses geradores possuem enrolamentos em estrela aterrado no estator, com 240 bobinas distribuídas em 2 circuitos por fase ligados em paralelo e enrolamento do rotor com 16 bobinas pólos, Tabela B5 do Anexo B.

A tensão gerada em 13,8kV é elevada para 230kV através de transformadores trifásicos de fabricação da General Eletric, com capacidade nominal de 75MVA.

Nessa usina, em particular, tanto os geradores, quantos os transformadores ficam dentro das instalações, e os cabos trifásicos, já em 230kV, saem da usina dentro de tubos de diâmetro aproximado de 40cm com óleo isolante sob alta pressão (cabos oleostáticos). Com apenas 6 tubos nessa bitola, um para cada máquina, levar esses cabos com esse nível de tensão de dentro da usina até fora, no pátio, torna-se muito simples. Essa tecnologia permitiu que essa usina fosse construída dentro da serra do mar, por isso é chamada de subterrânea.

Hoje sistemas como esse são raros em função da complexidade de manutenção e da reposição do óleo isolante com características muito específicas e de peculiar produção, que praticamente não existe mais. A última empresa que o produzia era a Petrobras – Petróleo Brasileiro S.A, mas em função da pouca procura e alto custo de produção, este óleo já não é mais produzido.

Capítulo III – O Sistema Elétrico

Toda potência gerada é transmitida através de uma estação convencional de superfície, suprindo os barramentos Leste e Oeste de 230kV, onde derivam-se 3 linhas de transmissão da empresa CTEEP S.A. (transmissão de energia elétrica). Uma interliga a ETU Henry Borden 230kV à SE Piratininga de 230kV e duas interligam a ETU Henry Borden 230kV à SE Baixada Santista de 230kV, e mais uma linha de interligação entre a ETU Henry Borden 230kV e o Anel de 230/88kV, interligando as estações Henry Borden.

3.4.2 - Usina Termoelétrica Piratininga

Construída na metade do século passado com entrada em operação em 1954, a Usina Termoelétrica Piratininga foi construída nas margens do Canal Pinheiros, próximo ao Reservatório Billings com (04) quatro unidades geradoras. Duas unidades tem tensão de saída de 13,8kV que é transformada para 88kV e conectada ao barramento da SE Piratininga, e duas com tensão de saída de 14,4kV que é transformada para 230kV e conectadas ao barramento da SE Piratininga.

As unidades 1 e 2 que estão conectadas ao 88kV possuem potência de 100MW cada e as unidades 3 e 4 que estão conectadas no 230kV possuem potência de 136MW cada.

As turbinas, originalmente utilizavam óleo como combustível, mas devido a restrições ambientais, atualmente utilizam o gás natural. Em janeiro de 2001 foi instituído um consórcio com a Petrobras – Petróleo Brasileiro S.A, para a implantação de mais (04) quatro turbinas a gás em ciclo combinado, aumentando a capacidade de geração, (hoje Usina Fernando Gasparian).

Atualmente, as unidades nº 1 e 2 utilizam o ciclo Rankine regenerativo sem reaquecimento, já as unidades nº 3 e 4 operam segundo o mesmo ciclo, porém com caldeira com seções de reaquecimento. As Tabelas B6 e B7 do Anexo B mostram os dados técnicos das máquinas dessa Usina.

3.4.3 - Usina Termoelétrica Fernando Gasparian

A Usina Termoelétrica Fernando Gasparian de 2005 é uma das 13 termoelétricas que compõe o parque gerador da companhia Petrobras. Essa usina é composta por (04) quatro geradores com potência de 168MVA cada, ligadas duas ao barramento de 88kV, (unidades nº 41 e 42) e duas ligadas ao barramento de 230kV, (unidades nº 31 e 32) da SE Piratininga. As unidades geradoras utilizam turbinas a gás tipo *heavy duty* – ciclo *Brayton*, gerando tensões em 13,8kV, ligadas através de transformadores aos barramentos de 88kV e 230kV da SE Piratininga.

Para um melhor aproveitamento da energia térmica do gás natural e consequente busca de elevação do rendimento da planta ela foi projetada para operar em ciclo aberto, (menor eficiência) ou ciclo combinado, (maior eficiência termodinâmica) com a Usina Termoelétrica Piratininga. Cada duas unidades da Usina Fernando Gasparian alimentam, utilizando os gases de exaustão através de uma caldeira de recuperação, uma das duas unidades, 3 e 4, da Usina Termoelétrica Piratininga. Infelizmente os dados técnicos mais específicos dessas unidades não estão disponíveis por questões estratégicas da empresa responsável.

A posição das Usinas acima descritas é mostrada no diagrama oficial do ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico através das Figuras A2 e A3 no Anexo A [43].

3.4.4 - Usina Elevatória de Traição

A Usina Elevatória de Traição foi inaugurada em 1940 como o objetivo reverter o curso das águas do Canal Pinheiros, para serem encaminhadas à Usina Elevatória de Pedreira e depois ao Reservatório Billings. A usina possui (04) quatro unidades geradoras reversíveis com potência total de 22MW distribuídas igualmente entre as unidades, que podem funcionar como geradores de energia e como unidades de bombeamento.

Capítulo III – O Sistema Elétrico

Dotadas de turbinas com rotor tipo Kaplan de eixo vertical e acionadas por motores síncronos, sua capacidade de bombeamento é de $280\text{m}^3/\text{s}$, elevando as águas em cerca de 5 metros.

Do ponto de vista energético, a reversão do Canal Pinheiros tem como propósito manter os volumes d' água nos reservatórios do Rio das Pedras e Billings suficientes para garantir a geração na Usina Henry Borden. Hoje, essa operação acontece somente para o controle das cheias (combate a enchentes).

A Usina Elevatória de Traição não é importante sob o ponto de vista elétrico por não estar no caminho do fluxo necessário de reativos. Ela está ligada na SE Bandeirantes que já possui compensação de potência reativa por um banco de capacitores de 28,8MVar.

3.4.5 - Usina Elevatória de Pedreira

A Usina Elevatória de Pedreira foi inaugurada em 1939, com a entrada em operação da unidade nº 4, que foi a 1ª unidade reversível do mundo, ou seja, poderia funcionar como bomba ou como gerador de energia elétrica e foi sendo ampliada gradativamente. A unidade nº 7 foi trazida da antiga Usina Hidroelétrica Edgard de Souza, localizada no Rio Tietê, e instalada em Pedreira em 1986 e a unidade nº 8, que foi a última, foi instalada em 1993.

A Usina possui hoje (07) sete unidades geradoras reversíveis e (01) uma unidade de bombeamento com uma potência elétrica total de 100MW de energia elétrica dedicadas ao bombeamento das águas do Canal Pinheiros, lançando-as no reservatório da Billings.

Todas as turbinas são dotadas de rotor tipo Francis, movidas por motores síncronos de 6,6kV. As máquinas 1 à 7 são unidades geradoras reversíveis, pois podem operar absorvendo ou fornecendo potência ativa para o sistema, podendo ainda funcionar como compensadores síncronos, absorvendo ou fornecendo potência reativa para o sistema. A unidade nº 8 somente pode operar absorvendo potência ativa, ou seja, apenas como motor,

Capítulo III – O Sistema Elétrico

fornecendo ou absorvendo potência reativa, portanto é considerada como bomba.

As águas do Canal Pinheiros passam para o Reservatório Billings através desta usina, cuja capacidade atual de bombeamento é de $395\text{m}^3/\text{s}$, elevando as águas em cerca de 25m. De acordo com a Resolução Conjunta SMA/SES 03/92, atualizada pela Resolução SEE-SMA-SRHSO-I, de 13/03/96, as águas do Canal Pinheiros não podem mais ser bombeadas continuamente para o Reservatório Billings. Esse bombeamento é feito somente quando as vazões provocadas pelas chuvas elevam o nível das águas do rio Tietê ou do Canal Pinheiros, podendo provocar enchentes na região.

Cada unidade é interligada à Estação Transformadora da Usina Pedreira de 88kV por um transformador trifásico; a partida é realizada diretamente pelos transformadores, em tap de tensão reduzida, através de chaveamento de disjuntores. No caso da unidade nº 4 a partida se dá com tensão plena. A partida é feita como motor assíncrono através de seus enrolamentos amortecedores com aplicação de corrente alternada no estator da unidade.

Essas unidades possuem um sistema de distribuidor que permite controlar o fluxo de água que entra na turbina, assim como também é responsável pelo estanqueamento da turbina em casos de parada. Na partida, o distribuidor fica fechado, mantendo a turbina vazia, sem água. Para garantir que a água não entre, um sistema de compressor injeta ar comprimido dentro da turbina criando uma bolha de ar que impede a entrada de água. Um sistema de vedação garante que esse ar não vai escapar e uma vez que a turbina não tem água, a unidade pode partir.

Nessas condições, a unidade geradora reversível parte como um motor assíncrono, apenas com o peso da turbina vazia, sem água, e quando ela atinge a RPM nominal a vedação cede e o distribuidor é aberto, permitindo que a água entre e assim se inicie efetivamente o bombeamento.

Capítulo III – O Sistema Elétrico

A Usina Elevatória de Pedreira dispõe de dois barramentos trifásicos, (barras Norte e Sul de 88kV), podendo ser alimentadas diretamente pela estação da Usina Henry Borden, através das linhas de transmissão Henry Borden Pedreira de 88kV Circuito 1 e Circuito 2. Pode também ser ligada à estação da Usina Termoeletrica Piratininga, através da linha de transmissão Piratininga Pedreira de 88kV Circuito 1.

Os transformadores de cada unidade são ligados aos barramentos de 88kV através de um disjuntor e uma seccionadora para cada barra. Essa disponibilidade de dois barramentos para alimentação dos transformadores das unidades proporciona inúmeras opções de manobras para equilíbrio de carga, transferência de barramento e linhas de serviço, isolamento de equipamento para manutenção e etc. No Anexo B, as Tabelas B2 e B8 apresentam os dados elétricos dessas unidades. Para efeito de estudos, os dados que não estavam disponíveis foram substituídos por dados baseados em similaridade entre unidades e na sua ausência, dados literários.

3.4.6 - Usina Elevatória de Pedreira - Ensaios Operacionais [18]

Como a operação dessas unidades é muito dinâmica a EMAE realizou uma série de ensaios com o intuito de verificar o comportamento das máquinas para as diferentes formas de operação. Conforme relatórios da empresa, as máquinas síncronas da Usina Elevatória de Pedreira nº 2, 4 e 5 foram ensaiadas e seus resultados estão disponíveis no Anexo B.

Observação: as unidades de nº 1, 2, 3, 6 e 7 são similares, sendo que os ensaios foram realizados na unidade nº 2.

Pelos resultados obtidos nos ensaios é possível concluir que a Usina Elevatória de Pedreira pode funcionar nas seguintes características:

1. Como usina de bombeamento, com turbinamento máximo de 395m³/s com uma potência necessária de 113,6MW. Nesta situação ela pode operar na

faixa de (-67,9 MVar) à (30 MVar).

2. Como compensador síncrono, conectada ao sistema ela pode operar absorvendo 7,8 MW e operando na faixa de 100MVar à -111 MVar.

3.5 – Cargas do Sistema

O sistema em estudo abrange uma grande área com alimentação de diversas cargas que possuem características sazonais, devido à variedade das regiões, capital e litoral e também pelas características de seus consumidores: industrial, residencial e comercial.

Para o estudo dinâmico da potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira, foram levantadas as cargas do complexo abrangido pelas linhas conectadas ao sistema de geração da EMAE, que são as mais próximas e que tem maior influência. São elas;

- Barra nº 485 – SE Piratininga de 88kV. Cargas que atendem parte da região Sul da cidade de São Paulo, concessionária AES Eletropaulo S.A. (distribuidora de energia elétrica);
- Barra nº 481 – ETU Henry – Borden 88kV, que atendem as cargas do litoral, como as cidades de Praia Grande, São Vicente e parte de Santos, incluindo as cargas industriais de Cubatão, concessionária CPFL Piratininga S.A. (distribuidora de energia elétrica);
- Barras nº 3499 – ETD Imigrantes, nº 3489 – ETD Varginha 1, nº 3488 – ETD Varginha 2 e nº 3492 – ETD Rio Bonito que atendem as cargas da região Sul da cidade de São Paulo e do município de São Bernardo do Campo. Essas cargas estão ligadas nas linhas de transmissão Henry Borden – Pedreira Circuitos 1 e 2 de 88kV sob responsabilidade também da concessionária AES Eletropaulo S.A. (distribuidora de energia elétrica).

Para esse estudo, foram utilizadas as cargas mensais do ano de (2010), considerando os períodos de carga leve, média e pesada.

Capítulo III – O Sistema Elétrico

3.6 – Operação do Sistema

3.6.1 – Área de 230kV e 88kV

Com o aumento das cargas e consequente aumento de geração, e de novas linhas de transmissão que interligaram a região e das novas fontes de energia (novas usinas), o nível de curto circuito admissível em vários equipamentos do sistema foram superados principalmente na região de 88kV [18]. Isto levou a operação dos sistemas elétricos a sofrer certas restrições, tais como:

- Quando são ligadas nas duas extremidades uma das duas linhas Henry Borden Pedreira circuitos 1 e 2 de 88kV entre as Subestações ETU Pedreira na barra (483) e ETU Henry Borden na barra (481), temos que desligar duas unidades geradoras de 65MW na Usina Henry Borden de 88kV.
- Quando são ligadas nas duas extremidades as duas linhas Henry Borden Pedreira circuitos 1 e 2 de 88kV entre as Subestações ETU Pedreira barra (483) e ETU Henry Borden barra (481), temos que desligar duas unidades geradoras de 65MW mais uma de 35MW na Usina Henry Borden de 88kV.
- O banco de transformadores nº 231 de 75MVA que interliga as ETU Henry Borden de 88kV e 230kV, permanece desligado, pois por ele passaria um fluxo de potência muito superior à sua capacidade.
- Quando são ligadas as unidades de bombeamento da Usina Elevatória de Pedreira, temos que desligar a interligação de 88kV Piratininga barra (485) – Pedreira barra (483) – Henry Borden barra (481).

Devido a problemas ambientais, já citados anteriormente, a Usina Hidroelétrica de Henry Borden normalmente é despachada com geração mínima nos horários de carga leve e média e no horário de carga pesada, com o suficiente para atender as cargas da ETU Henry

Capítulo III – O Sistema Elétrico

Borden, eliminando as sobrecargas das linhas de 88kV Henry Borden – Baixada Santista.

Outra característica de operação e despacho da Usina Henry Borden é a sua utilização em casos de contingências ou em grandes manutenções no sistema, nos quais a usina é despachada com geração máxima até a normalização do sistema, quando retorna ao seu despacho mínimo. Como a Usina esta localizada dentro do centro de cargas, suas linhas de transmissão são curtas, o que traz grande segurança, além disso, é a fonte confiável mais próxima. Esta operação está prevista nos procedimentos de rede, estabelecida pelo ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico.

Devido à sua localização, próxima à carga, a Usina Henry Borden tem outro importante papel que é na regulação de tensão da região, pois ela consegue manter a tensão nos barramentos de 88kV e 230kV, através de seu despacho de potência reativa.

Além disso, sempre que é necessário são também utilizados os bancos de capacitores dos barramentos de 88kV para auxiliar no controle de tensão da malha de 345kV.

Em função da baixa tensão nas cargas das ETD's Varginha, Imigrantes e Rio Bonito, quando alimentadas pelo barramento de 88kV da ETU Henry Borden, uma alternativa seria ligar todas as cargas apenas pelo barramento da ETU de Pedreira, mas devido ao nível de curto circuito, alguns cuidados são necessários.

As linhas de 88kV Henry Borden – Pedreira C1 e C2 não podem ficar ligadas em operação cruzada, ou seja, uma linha ligada em cada ponta. Nesta situação o anel de 88kV entre as barras (485) Piratininga, (483) Pedreira e (481) Henry Borden poderia ser fechado através do secundário dos transformadores das ETD's: Varginha, Imigrantes e Rio Bonito.

A elevação de geração térmica da usina termoeletrica Piratininga (EMAE), por razões elétricas, somente poderá ser adotada depois de esgotados todos os recursos operativos disponíveis e atingido os níveis de tensão mínimo definidos nas instruções de operação ou os

Capítulo III – O Sistema Elétrico

carregamentos máximos permitidos.

Tudo isso, trás então a discussão da importância de se gerar energia reativa na Usina Elevatória de Pedreira.

3.6.2 – Área de 345kV e 440kV

No período de carga média, os síncronos da SE Embu-Guaçu barra (581), SE Santo Ângelo barra (593), SE Tijuco Preto barra (76) e SE Ibiúna barra (86) deverão operar, sempre que possível, com uma reserva de 1300MVar.

Os compensadores síncronos da SE Embu-Guaçu barra (581) e SE Santo Ângelo barra (593), ambos da empresa CTEEP - Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista S.A. (transmissão de energia elétrica), deverão operar, preferencialmente, mantendo folga em torno de 100MVar em cada um deles.

As tensões de geração deverão ser ajustadas de forma a obter níveis de tensão satisfatórios, o mais linear possível, ao longo de toda área de 440kV, procurando, sempre que houver possibilidade, mantê-las em condições normais, folga de regulação tanto no sentido de aumentar como diminuir a tensão do sistema.

O CNOS (Centro Nacional de Operação do Sistema) e o COSR-SE (Centro de Operações do Sistema Regional Sudeste) coordenam, junto com a EMAE (Empresa Metropolitana de Águas e Energia), no período de carga pesada as providências necessárias para a maximização da geração em Henry Borden, respeitando a reserva de potência. O objetivo é manter a área de São Paulo em um nível de confiabilidade elevado e reduzir o carregamento no sistema de transmissão comum às áreas do Rio de Janeiro e São Paulo.

Visando suprir as necessidades de potência reativa do processo de conversão do ELO CC, em condição de regime normal, os síncronos de Ibiúna barra (86) devem operar mantendo uma margem global equivalente à capacidade de 1 compensador síncrono que vai

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico da Grande São Paulo**

Capítulo III – O Sistema Elétrico

de (-200 a +300 MVar). Na empresa FURNAS – Centrais Elétricas S.A. (geradora e transmissora de energia elétrica), esses compensadores devem operar em função do número de síncronos em serviço, nas faixas de operação a seguir:

Com 1 compensador síncrono: em torno de zero MVar.

Com 2 compensadores síncronos: (-100 + 150MVar) por síncrono.

Com 3 compensadores síncronos: (-135 + 200MVar) por síncrono.

Com 4 compensadores síncronos: (-150 + 225MVar) por síncrono.

Os barramentos de 230kV e 440kV deverão operar dentro das faixas estabelecidas de tensão. Para os demais barramentos de 230kV e 440kV, uma tensão máxima de 105% e uma tensão mínima de 95%. Assim é possível manter o controle dentro das faixas preestabelecidas, conforme a Tabela de tensão abaixo:

Tabela 3.1 - Faixas de tensão para controle nos barramentos da área São Paulo.

NOME	Nº BARRA	PESADA (kV)	MÉDIA (kV)	LEVE (kV)
IBIUNA – 345kV	86	354 a 362	354 a 352	335 a 348
SANTO ÂNGELO – 345kV	594	335 a 362	335 a 362	335 a 348
EMBU-GUAÇU – 345kV	582	335 a 362	335 a 362	335 a 348
TIJUCO PRETO – 345kV	78	354 a 362	354 a 362	335 a 348
PIRATININGA – 230kV	484	232 a 238	232 a 238	228 a 236
HENRY BORDEN – 230kV	480	231 a 237	231 a 237	229 a 235

Diante de todas essas adversidades na operação do sistema elétrico da malha da região metropolitana de São Paulo, algumas opções foram estudadas com o objetivo de entender a estabilidade das máquinas e o comportamento dinâmico do sistema.

O objetivo é simular contingências com base em casos reais na operação do sistema com as unidades da Usina Elevatória Pedreira, gerando potência reativa e, ainda, observar os impactos, benefícios e dificuldades dessa nova configuração de operação.

Capítulo III – O Sistema Elétrico

O próximo capítulo trata do controle do sistema elétrico e apresenta todos os reguladores de tensão e velocidade disponíveis das várias usinas contidas neste estudo, assim como suas respectivas teorias. Estão, também, apresentados os modelos desses equipamentos e sua descrição, dados técnicos, aspectos específicos e teóricos quanto ao seu funcionamento e ao seu comportamento no sistema.

CAPÍTULO IV

O CONTROLE DO SISTEMA ELÉTRICO

4.1 – Aspectos Gerais da Regulação do Sistema

Nos estudos de grandes sistemas de potência representados em regime permanente, os resultados indicam uma situação estática do sistema que serve para avaliar, por exemplo, o balanço de *carga x geração* em períodos como dias, meses, anos e patamares de cargas leve, média e pesada. Esses resultados mostram o perfil do consumo de energia quer seja por uma indústria, cidade ou, até mesmo, por um estado ou região do país.

Esse balanço de geração é extremamente importante, pois é por intermédio dele que as decisões sobre os despachos de energia são tomadas [7] [11] [14]. Determinar se uma usina hidroelétrica ou termoelétrica deve ser despachada ou, ainda, uma nuclear, é uma tarefa naturalmente complexa ainda mais se for caso de despacho nacional. A situação, entretanto, pode ficar ainda mais difícil para a operação, pois esse despacho não leva em consideração somente os aspectos técnicos, aliás, eles, por relevância, podem ser os últimos.

Questões econômicas, custo da energia produzida, aspectos estratégicos, despachos de usinas, de extrema importância para o sistema, restrições de utilização de combustível como a água dos reservatórios, o gás das termoelétricas, confiabilidade, capacidade disponível, questões políticas e tantos outros fatores alimentam os simuladores e orientam os programadores do sistema.

Uma vez acertados esses aspectos iniciais do planejamento e operação do sistema, com suas configurações de geração e carga já determinadas, os estudos mostram que há sempre um equilíbrio entre o que se gera de energia elétrica e o que se consome, incluindo as perdas. Por este motivo, os estudos dinâmicos têm sempre como condições inicial e final uma

Capítulo IV – O Controle do Sistema Elétrico

situação possível de operação.

Do ponto de vista estático, é fácil perceber que o equilíbrio, ou seja, a geração disponível por todas as máquinas ou usinas geradoras de energia é função da demanda total de energia mais as perdas. Sabemos, porém, que o comportamento do sistema não é estático e, sim, dinâmico, portanto é necessário ter conhecimento da repercussão das perturbações em todo o sistema.

O simples desligar de uma linha de transmissão, por exemplo, o desligamento de um grande bloco de consumidores ou, ainda, um curto-circuito, modifica, totalmente, não só a distribuição das cargas envolvidas ao longo desse percurso, mas também o efeito da modificação da topologia do sistema e de seus parâmetros elétricos pelas unidades geradoras. Nesse aspecto, os estudos dinâmicos são imprescindíveis.

Analisando do ponto de vista da estabilidade de sistemas de fornecimento de energia, essas constantes modificações na topologia e no carregamento tornam complexas as operações das unidades geradoras. Os sistemas de controle se constituem em recursos disponíveis de extrema importância no auxílio dessas operações; graças a eles, é possível a operação dinâmica de todo o sistema elétrico.

O primeiro controle ocorre de forma natural, dentro do próprio sistema de energia e é conhecido como “*Regulação Própria do Sistema*” ou “*Regulação Natural*” [7].

Se for considerado um súbito acréscimo das cargas no sistema, caracteriza-se uma situação em que o consumo ficou acima da geração, portanto, um déficit de geração. A partir desse momento, a diferença é compensada através da energia das massas girantes (inércia de todas as máquinas interligadas, simultaneamente, no sistema) presente no sistema e disponível dentro dele. Como a carga varia com a frequência, em geral, quando há um decréscimo de frequência, decai, também, o valor absoluto da carga. A partir daí, o sistema tende a ir para

Capítulo IV – O Controle do Sistema Elétrico

um novo patamar, diferente daquele que estava antes da variação, e a autorregular-se alcançando um novo equilíbrio – a chamada “*Regulação Própria do Sistema*” que pode ser expressa pelo parâmetro “*D*”, também conhecido como “*Coefficiente de Amortecimento*” [7].

Considerando “ P_D ” a carga ativa do sistema, pode-se chegar à seguinte indicação;

$$D = \frac{\Delta P_D}{\Delta f} \quad (4.1)$$

De acordo com a Figura 4.1, verifica-se que, se for considerada uma regulação própria do sistema suficiente para estabelecer um novo ponto de operação, desde que tendendo ao equilíbrio, chega-se a uma variação de frequência.

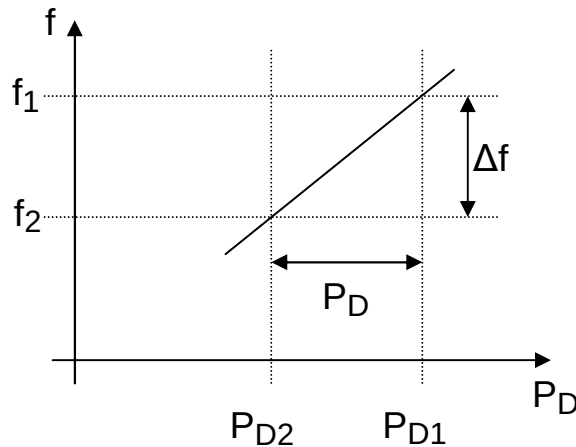


Figura 4.1 – Mudança do ponto de operação

$$\Delta f = \frac{\Delta P_D}{D} \quad (4.2)$$

Em sistemas de grande porte, as variações das potências podem atingir valores consideráveis, provocando grandes oscilações de frequência o que, certamente, levaria o sistema à instabilidade (colapso).

Além disso, esses eventos têm impactos diferentes no sistema elétrico dependendo

Capítulo IV – O Controle do Sistema Elétrico

dos períodos em que acontecem.

Essa complexa operação, somada às grandes variações sistêmicas, justifica a aquisição dos processos de regulação inseridos nas máquinas.

4.2 – Reguladores de Velocidade

Viu-se, anteriormente, que as operações em sistemas elétricos de grande porte não podem ficar, apenas, sob os cuidados da sua própria regulação. É necessário, portanto, que todas as unidades geradoras possuam dispositivos automáticos de regulação, tanto de velocidade quanto de tensão. A atuação coordenada desse conjunto é conhecida como “*Regulação Primária*” embora esse termo esteja mais ligado à regulação de velocidade da máquina.

Os reguladores de velocidade atuam diretamente na turbina, modificando a admissão de água de acordo com o necessário a fim de ajustar a RPM da máquina dentro de seus limites operacionais.

Outro ponto importante é o *estatismo* da máquina (*speed droop*), definido como a sua regulação primária, responsável pela participação efetiva na divisão da carga em eventos de aumento ou diminuição dela. No diagrama de blocos, esse parâmetro é representado como “ $1/R$ ”. Sua efetiva ação dentro do regulador de velocidade está ligada à atuação na válvula de admissão de água para a turbina.

Como o *estatismo* das unidades geradores se dá em uma porcentagem da sua potência nominal, logo, máquinas com potências e ajustes percentuais diferentes resultam em diferentes participações na repartição dessas cargas. A Figura 4.2 mostra essa operação.

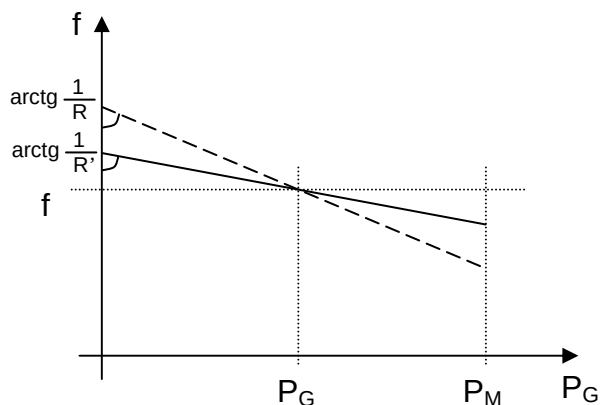


Figura 4.2 – Rotação da reta R (estatismo) [7]

Para eventuais modificações na demanda do sistema, a máquina tenderia a suprir uma parcela dessa carga; essa ação, porém, pode provocar a modificação da frequência nominal da máquina, sendo necessária, então, a ação do segundo estágio da regulação [7].

A regulação secundária se dá pela variação do posicionamento da válvula sensível à frequência (*flyball*), por meio de um motor variador de velocidade. Essa variação é importante, pois, graças a ela, a frequência de operação da máquina pode ser ajustada – Figura 4.3.

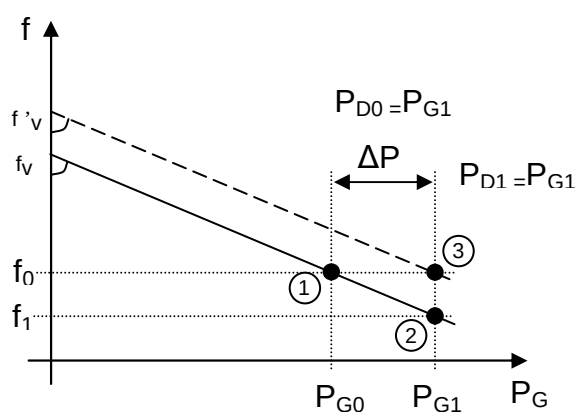


Figura 4.3 – Reta R de estatismo ajustada pelo motor variador de velocidade [7]

A Figura 4.3 apresenta uma simulação do comportamento da geração e da carga durante uma solicitação de aumento de demanda de carga.

Capítulo IV – O Controle do Sistema Elétrico

O gráfico $f \times P_G$ apresenta a operação inicial de um sistema pela representação do ponto 1. Após uma variação de carga, a unidade, para atendê-la, passará de P_{G0} para P_{G1} e isso implica em um decréscimo da frequência: $f_0 > f_1$. O ponto 2 é, então, o novo ponto de operação, mas com uma frequência menor. A partir desse instante, o motor variador vai operar até que o integrador reconheça que a frequência de operação voltou para a posição determinada, frequência nominal. Para esse caso, é o ponto 3. A Figura mostra, ainda, que essa variação não modifica o ângulo da reta R , apenas sua posição, logo, não há modificação no parâmetro do *estatismo*.

A Figura C1, Anexo C, mostra a posição efetiva de atuação desses dispositivos no regulador de velocidade.

Em grandes sistemas multimáquinas, a inércia do sistema elétrico se encarrega de solicitar das máquinas determinadas modificações na sua operação, ora exigindo mais potência ativa, ora menos, e o *estatismo* vai determinar o comportamento individual de cada máquina para um mesmo evento.

É possível, também, perceber, pela observação das oscilações de grandezas elétricas em situações de variação de cargas, que existe uma correlação entre f (frequência) e P (potência ativa), assim como ocorre com U (tensão) e Q (potência reativa), o que constitui, basicamente, duas malhas de controle:

- (1) a malha de controle da frequência, fortemente ligada à grandeza elétrica P .
- (2) a malha de controle da tensão, fortemente ligada à grandeza elétrica Q .

Embora as duas malhas de controle sejam de grande importância para a adequada operação de unidades geradoras de energia, é sua operação coordenada que garante o bom funcionamento do equipamento.

Pode-se dizer, então, que as duas malhas de controle são independentes, mas isso não

Capítulo IV – O Controle do Sistema Elétrico

é totalmente verdade, pois as cargas do sistema variam com a tensão, provocando variações de cargas ativas e nos coeficientes de potência sincronizantes, logo, variações de tensão também contribuem para as variações de frequência. Reguladores de velocidade ou reguladores hidráulicos são utilizados para os ajustes necessários à correção dessas variações de frequência.

4.2.1 – Usina Henry Borden - Seção Subterrânea

Os reguladores de velocidade das unidades 11 a 16 da Usina Subterrânea de Henry Borden foram modernizados em 1998, passando para um sistema de controle individual digital modular de tripla redundância com um sincronizador e controle de carga [28] [30]. A interface eletro-hidráulica é composta por um sistema baseado em válvulas proporcionais. Para os defletores foi utilizada uma válvula distribuidora de dois estágios.

Para as agulhas, o sistema hidráulico é de simples estágio, sem a presença de válvula distribuidora. Dada a baixa vazão, as válvulas proporcionais acionam, diretamente, os servomotores. Uma realimentação eletrônica independente de posição foi incluída para cada servomotor de controle (1 defletor e 4 agulhas).

O sistema é composto de três núcleos de processamento totalmente independentes com CPU's e módulos de entradas e saídas próprios.

Os núcleos monitoram todos os dados, individualmente, de todas as entradas e geram todas as saídas. O regulador utiliza um algoritmo com PID (Proporcional-Integral-Derivativo) duplo para controlar as agulhas e defletores. Nele, agulhas e defletores respondem, virtualmente, de forma independente, a qualquer perturbação. Cada elemento possui seu PID com seus ganhos associados e isso permite respostas rápidas em função de seu curto tempo de atuação.

Os defletores são posicionados por meio de uma comparação entre sua posição real e

Capítulo IV – O Controle do Sistema Elétrico

a posição desejada; essa comparação (erro) é ponderada pelo ganho de equalização (K_{eq}) que determina o quão rápido o defletor será posicionado pela curva agulha/defletor.

Por serem independentes, é, também, permitido ao regulador operar a turbina com diferentes combinações de agulha de forma a maximizar o rendimento do conjunto gerador. Assim, durante a partida ou em níveis de baixa potência, é possível entrar em operação somente com duas agulhas e, à medida que a potência gerada aumenta, as outras agulhas são chamadas a atuar.

Esse controle visa a obter uma relação bem mais linear, pois a potência gerada depende, somente, da queda líquida, vazão total e eficiência da turbina (potência/vazão), enquanto que outras, não lineares, utilizam (potência/posição). A Figura 4.4 ilustra o algoritmo adotado.

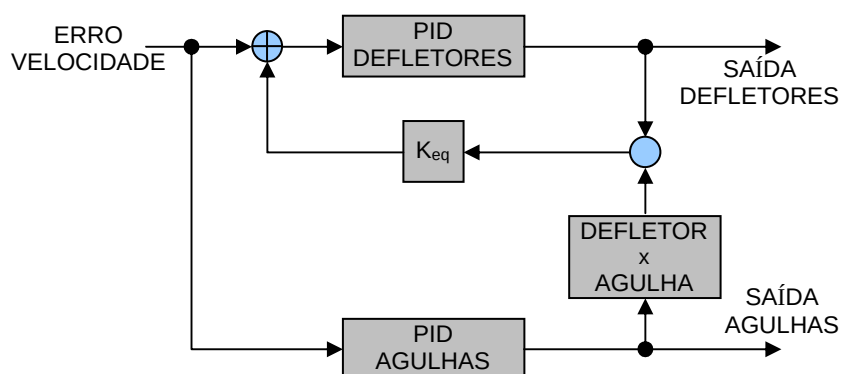


Figura 4.4 – Diagrama de blocos do algoritmo adotado

Nessa operação, o *estatismo* permanente (*droop*), responsável pela regulação primária, é um parâmetro ajustável podendo variar de 0 a 10% com a unidade em operação. No caso de Henry Borden, os reguladores de velocidade, tanto da Usina Externa quanto da Usina Subterrânea, têm seus *estatismos* ajustados em 5% da velocidade (RPM) da máquina [22].

4.2.2 – Usina Henry Borden - Seção Externa

Os reguladores da Usina Henry Borden, seção externa, apresentam, basicamente, dois modelos: um, para as unidades nº 1 e 2, que são sistemas mais antigos, e outro, para as demais unidades [25] [30].

Basicamente, a diferença entre esses reguladores é que todas as unidades, exceto as nº 1 e 2, possuem defletores para desviar a água.

Também com reguladores de dois estágios, as unidades 3 a 8 possuem um dispositivo chamado defletor, uma espécie de “escudo” cuja função é desviar o jato de água que sai da agulha e vai em direção às conchas. Esse jato é responsável por fornecer potência mecânica à turbina e, conseqüentemente, ao gerador, fazendo a máquina girar em sua rotação nominal.

Em casos de necessidade de fechamento da agulha em um tempo muito rápido, emergências, por exemplo, a máquina deve ser desligada o mais breve possível para ser protegida. Eletricamente, isso acontece, pois nessas situações, o disjuntor da unidade abre e isola a máquina, mas a sua parada não acontece instantaneamente; ela permanece girando, pois as agulhas levam um tempo bem maior para se fecharem completamente – Figura 4.5.

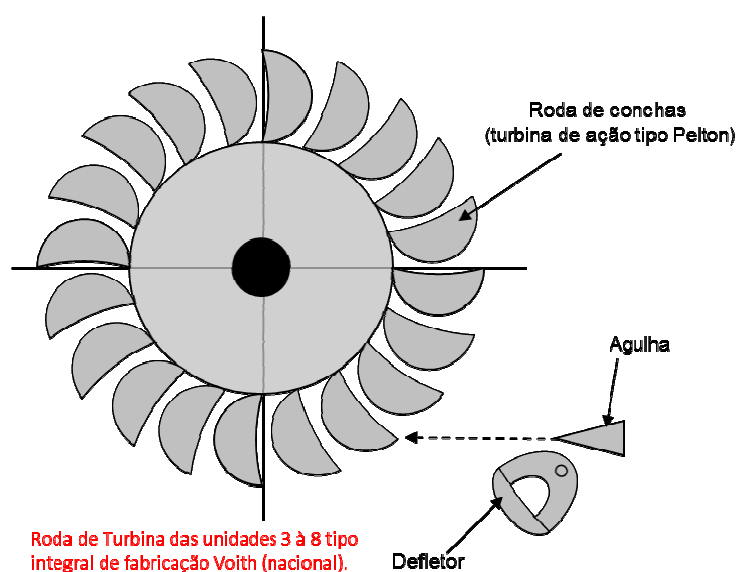


Figura 4.5 – Desenho da roda de conchas com a agulha e o defletor

Capítulo IV – O Controle do Sistema Elétrico

Nesses casos, o defletor é extremamente importante, pois, quando há um desligamento de emergência, as válvulas vão começar a se fechar e, instantaneamente ao desligamento do disjuntor, o defletor entra na frente do jato de água e o desvia da roda de conchas. Como já não há mais torque mecânico sendo aplicado à turbina, o sistema de freios pode ser aplicado porque, agora, a máquina está girando apenas por força da inércia da massa girante – Figuras 4.6 (a) e 4.6 (b).

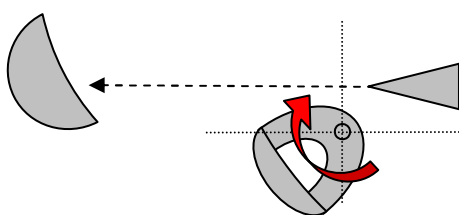


Figura 4.6 (a) Sem defletor, jato de água direto na concha

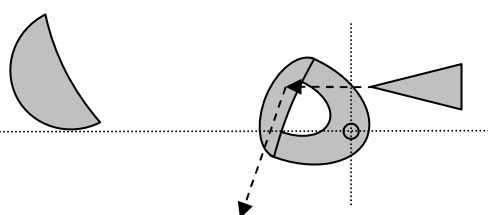


Figura 4.6 (b) Com defletor, jato de água desviado da concha

As unidades nº 1 e 2, por serem as mais antigas, possuem um sistema diferente - não têm defletores; possuem uma segunda agulha, (agulha auxiliar) – Figura 4.7 [22].

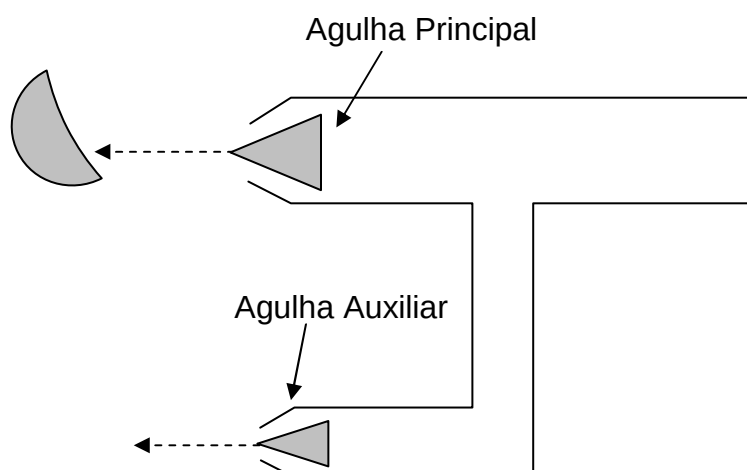


Figura 4.7 – Agulha principal e agulha auxiliar

Nesse sistema, em casos de necessidade de fechamento da válvula principal, a agulha principal deve ser fechada o mais rápido possível tendo, assim, seu fluxo de água desviado

Capítulo IV – O Controle do Sistema Elétrico

para a agulha auxiliar que, conseqüentemente, deslocará o jato de água da turbina, de forma similar ao processo por defletor.

Como o regulador de velocidade ainda é o original, seu sistema é totalmente mecânico e utiliza os conceitos mais elementares dos sistemas de controle de velocidade, a variação do posicionamento da válvula sensível à frequência (*flyball*) preso ao eixo da máquina por uma polia e um motor variador de velocidade. Somado ao ajuste manual de estatismo, esse regulador é importante, pois, graças a ele, a frequência de operação da máquina pode ser ajustada.

4.2.3 – Usina Termoelétrica Piratininga

Os reguladores de velocidade das unidades da Usina Termoelétrica Piratininga são do tipo válvula piloto giratória de ação simples. Fabricados pela General Electric, integram as turbinas e estão instalados na estrutura dianteira das máquinas, denominada “front standard”. São do tipo MHC (Mechanical Hydraulic Control), com sensor de velocidade modelo “flywheel” (pêndulo centrífugo), baseando-se, exclusivamente, em sinais mecânicos de pressão de óleo. O sistema controla, sequencialmente, abertura e fechamento de válvulas de bloqueio e controle de vapor, podendo atuar mantendo o domínio de carga em valores preestabelecidos ou ainda controlando frequência (função desabilitada na UTP). É do tipo “falha segura”, ou seja, qualquer perda de pressão desarma e causa o “trip” da unidade, fechando todas as válvulas de vapor (admissões e extrações). Possui sensores que provocam o desligamento nos seguintes casos:

- Sobrevelocidade (um valor predeterminado + 2 níveis de retaguarda)
- Baixa frequência
- Baixo vácuo no condensador
- Desgaste no mancal de escora

Capítulo IV – O Controle do Sistema Elétrico

Esses reguladores possuem uma descrição de funcionamento muito similar aos já apresentados, pois são totalmente mecânicos e não foram modernizados; os mais conhecidos são os reguladores com queda de velocidade.

4.2.4 – Usina Termoelétrica Fernando Gasparian

Dotadas de um sistema mais moderno de regulação de velocidade, as unidades da Usina Termoelétrica Fernando Gasparian utilizam um sistema de controle e monitoramento indicado para turbinas a gás chamado EGATROL 8. Compreende uma sequência de controle de variáveis de processo analógico mais o sistema de proteção da turbina.

Com o núcleo redundante de alto desempenho, esse controlador é projetado, especificamente, para controle de turbina a gás com bibliotecas padrão e módulos aplicados a diferentes tipos de turbina, reduzindo a possibilidade de erros, aumentando a confiabilidade e disponibilidade do sistema. Por intermédio de algoritmos avançados de controle modular de malhas aberta e fechada, grupos de unidades são coordenados sob rotinas de acordo com os processos programados. A operação é totalmente automatizada com a intervenção do operador apenas na seleção do combustível e na definição da carga demandada. Possui, ainda, sistemas de proteção de acordo com IEC 61508 com cada canal de proteção implementado em um controlador separado.

A interface homem máquina (IHM) é de simples operação oferecendo todas as informações sobre a máquina. Apresenta fluxo de processo otimizado promovendo uma análise eficiente do status da máquina. Alarmes e eventos são armazenados e anunciados acústica e visualmente. O sistema de monitoramento da turbina permite determinar o estado real da máquina por meio da supervisão de parâmetros como supervisão de velocidade, vibrações, temperatura, chama do queimador e registros das tensões geradas.

Capítulo IV – O Controle do Sistema Elétrico

4.2.5 – Usina Elevatória de Pedreira

Com turbinas do tipo Francis e máquinas reversíveis, podem operar como gerador de energia elétrica ou como bomba. Como sua função principal é a de bombeamento, seus sistemas de regulação de velocidade se restringem a um distribuidor que fica em torno da turbina.

O distribuidor é um dispositivo mecânico composto por aletas móveis controladas para administrar a adução de água para a turbina. Completamente fechado, permite o estancamento da turbina, extremamente importante em casos de manutenção e partida da máquina.

Para a partida como unidade de bombeamento ou como compensador síncrono, a turbina fica sem água até que a máquina esteja em RPM nominal; a partir daí, para operação como compensador síncrono ela fica como está, e como bomba, basta abrir o distribuidor e deixar a água entrar. Dessa forma, a unidade pode partir sem o peso da água, apenas com o da turbina vazia, reduzindo os impactos elétricos e mecânicos na unidade.

Como essas unidades trabalham com o bombeamento de vazões praticamente fixas, os distribuidores não são preparados para controle de vazão limitando sua operação a regulador hidráulico de velocidade.

4.2.6 – Usina Elevatória de Traição

As unidades de bombeamento da Usina Elevatória de Traição utilizam turbinas do tipo Kaplan com pás articuladas, o que lhes permite controles mais precisos da vazão bombeada.

Não sendo essa usina objeto deste estudo, o detalhamento de seu sistema não será tratado.

Capítulo IV – O Controle do Sistema Elétrico

4.2.7 – Compensadores Síncronos

Como esses compensadores são de empresas distintas, tais como, FURNAS e CTEEP, o acesso às informações e a aquisição de dados suficientes sobre os reguladores de velocidade tornou-se restrito.

Tendo em vista que a maioria dos equipamentos é muito antiga e, ainda, sem modernização, mantendo, portanto, seus equipamentos originais, isso pode facilitar o entendimento de seu funcionamento uma vez que o princípio básico é o mesmo.

4.3 – Reguladores de Tensão

O gerador síncrono é responsável pela produção de energia elétrica, sendo, normalmente, acionado por uma turbina controlada por um regulador hidráulico cuja finalidade é manter a velocidade de rotação.

Associado a ele, existem, também, o sistema de excitação e o regulador de tensão que têm a função de alimentar o enrolamento de campo do gerador com corrente contínua para produzir o fluxo magnético na máquina e controlar a tensão de saída.

Os sistemas de excitação podem ser classificados, basicamente, em dois tipos: estático e rotativo.

O sistema estático de excitação considera a utilização de chaves estáticas tiristorizadas, controladas por sistemas eletrônicos, possui uma fonte de corrente contínua por meio de banco de baterias ou sistemas auxiliares externos para auxiliar a partida da máquina. Este sistema dispensa partes móveis.

O sistema rotativo exige a presença de uma excitatriz que pode ser um gerador de corrente contínua ou um alternador.

Em máquinas com excitatrizes rotativas existe um gerador de corrente contínua

Capítulo IV – O Controle do Sistema Elétrico

autoexcitado, excitador piloto, que, geralmente, é montado sobre o eixo da própria máquina.

O regulador de tensão (AVR) tem a função de controlar a corrente de campo da excitatriz do gerador que é realizado por intermédio de um reostato ligado em série com o campo do gerador. Variando a corrente de excitação das máquinas, é possível controlar a tensão gerada.

Os reguladores de tensão determinam a regulação primária da tensão das máquinas síncronas que é definida através dos ganhos dos AVR's que, por sua vez, podem determinar se o sistema é estável ou não. Em situações onde a tensão é modificada, vão atuar diretamente no sistema de excitação da máquina para tentar corrigir essas eventuais modificações.

4.3.1 – Usina Henry Borden - Seção Subterrânea

Na Usina Subterrânea, o sistema de regulação é totalmente digital.

O sistema de excitação do gerador síncrono é constituído por um regulador de tensão, um transformador de excitação, além de comandos, controles e proteção desse sistema [28]. Um painel na sala de controle da Usina Externa permite a visualização das grandezas do gerador e do regulador, mensagens de alarmes, entrada de comando e parâmetros.

O regulador de tensão SIMADYN D[®] modelo da empresa SIEMENS, é digital e utiliza retificadores tiristorizados, módulos microprocessados com armazenamento em memória EPROM/EEPROM, rodam rotinas do *software* (programa) de controle, regulação, disparos dos tiristores e das pontes retificadoras.

O sistema de excitação retira, dos terminais da própria máquina síncrona, a energia necessária para a excitação, por meio de um transformador trifásico a seco e de média tensão. A Figura 4.8 mostra o princípio básico de funcionamento do sistema de excitação na parte de potência.

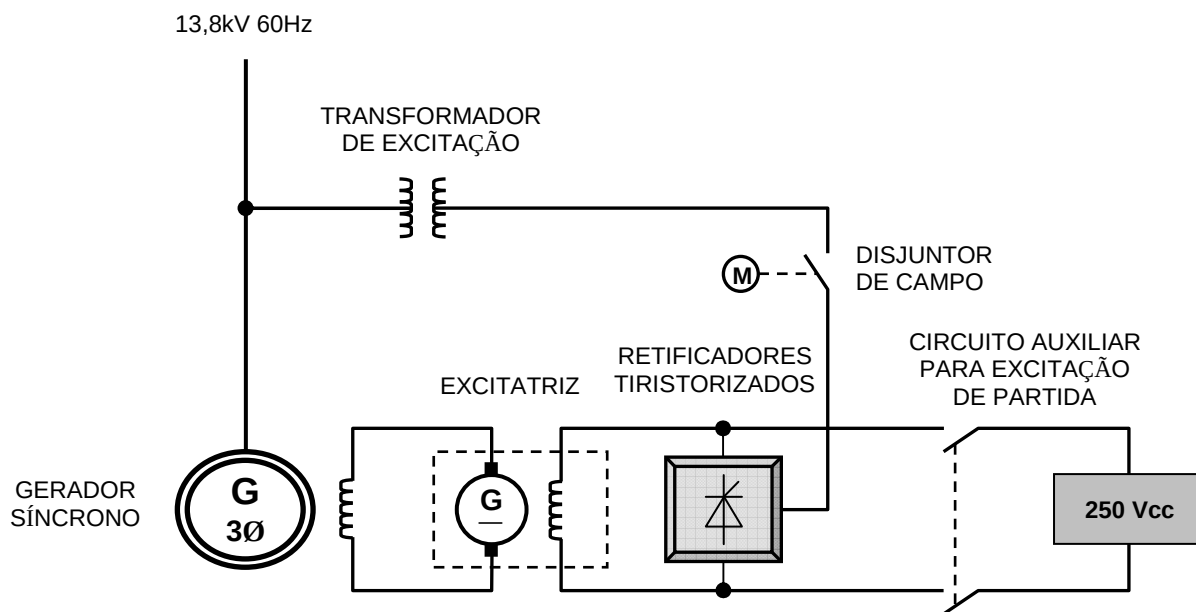


Figura 4.8 – Princípio básico de funcionamento do sistema de excitação

O controle da tensão gerada é feito pelo enrolamento de campo da excitatriz sem escovas, pois a excitação de partida, ou escorvamento da unidade, é feita utilizando-se as baterias em (250Vcc) da Usina.

A regulação de tensão, geração de impulsos de disparo dos tiristores, geração dos valores de referência (*setpoints*) da tensão terminal e da corrente de excitação, o controle dos processos de escorvamento, a parada e a supervisão do sistema de excitação são completamente digitais, realizados pelo controlador SIMADYN D[®].

O canal do regulador automático de tensão (AVR) compara o valor da tensão do gerador com o valor de referência ou *setpoint* ajustado.

O regulador ajusta, automaticamente, a corrente de excitação do gerador, no sentido de corrigir qualquer diferença observada entre o valor real da tensão terminal e o valor de referência ajustado. Os limites operacionais são definidos no diagrama de capacidade do gerador – Figura 4.9.

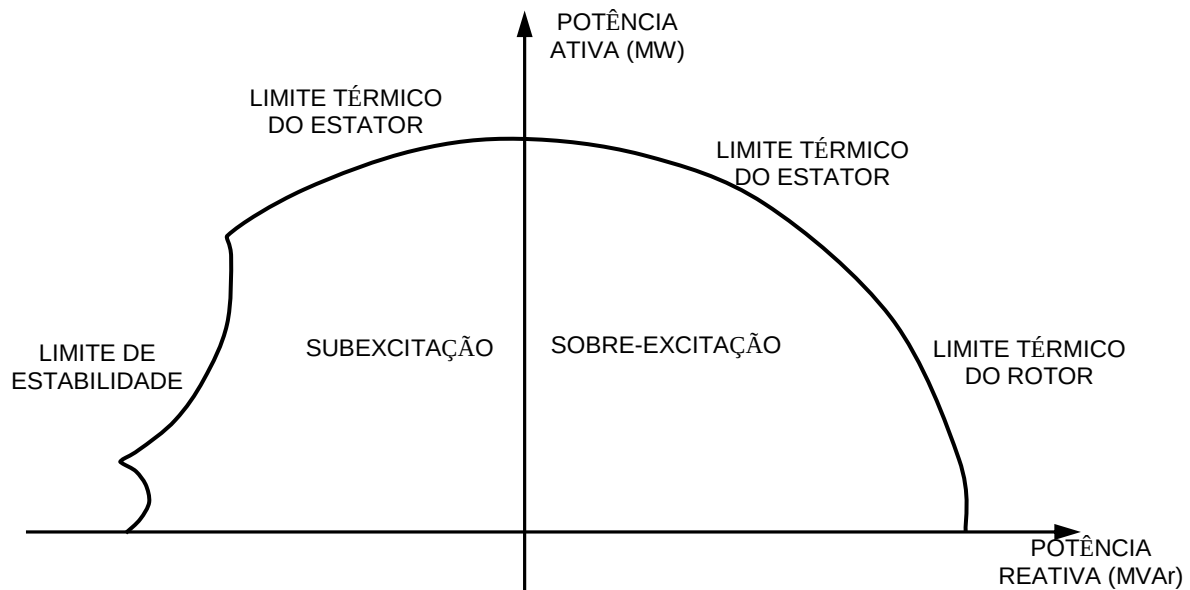


Figura 4.9 – Curva típica de capacidade – Limites

Os limites estabelecidos pela curva de capacidade são:

- Limite Térmico do Rotor – garantido pelos limitadores de sobre-excitação e de máxima corrente de excitação;
- Limite de Estabilidade – garantido pelo limitador de subexcitação.

4.3.2 – Usina Henry Borden - Seção Externa

Os reguladores de tensão instalados, atualmente, nas unidades geradoras de energia da Usina de Henry Borden, seção externa, são os originais da empresa Westinghouse, modelo “BJ-30” [25] [30] e utilizam bancos de resistência para fazer o controle da corrente de excitação no campo da máquina. Esse sistema é feito por meio de máquinas rotativas localizadas fora do eixo das máquinas, excitação motora externa.

Um motor de 290HP, alimentado em 440V, aciona todo o conjunto que é composto por um pequeno gerador, (excitador piloto), na extremidade do conjunto, seguido de outro maior (excitador principal).

O excitador piloto é um gerador com um remanescente no seu conjunto (magnetismo permanente) que lhe permite criar corrente e tensão sem necessitar de auxílio externo; essas

Capítulo IV – O Controle do Sistema Elétrico

tensões e correntes vão diretamente para o excitador principal que eleva essa tensão para valores em torno de 250Vcc. Por meio de bancos de resistência (reostatos), a corrente é controlada pelo regulador de tensão e, posteriormente, enviada ao campo do gerador com o objetivo de manter o controle da tensão de saída do gerador.

Para isso, existe uma variação do conjunto de resistências por intermédio de um motor que controla a corrente de campo no excitador. Oscilações de tensão operam o motor do regulador de tensão que, por sua vez, modifica a posição do conjunto de resistências, alterando a corrente de excitação do campo do gerador, levando a corrente ao valor suficientemente requerido para trazer a tensão do gerador ao seu valor normal.

Construído com tecnologia do início do século XX e, totalmente, eletromecânico, esse regulador apresenta uma estrutura complexa.

Embora a operação descrita para o regulador de tensão seja bem simples, seu ajuste, manutenção e construção, não o são.

Por um lado, a grande vantagem do regulador de tensão “BJ-30” é a sua robustez, característica que o manteve até os dias atuais, desde a operação da primeira máquina, em meados de 1926. Por outro, há uma grande desvantagem, pois esse tipo de regulador possui muitas partes móveis com alavancas, bobinas, contatos, motores, molas e tantos outros dispositivos que o tornam, praticamente, mecânico.

O passar do tempo, a falta de peças de reposição e o desgaste natural do sistema de regulação, acrescentados às novas exigências na operação otimizada do sistema elétrico de potência, esses reguladores se tornaram obsoletos.

Estudos e ensaios realizados nas unidades comprovaram a sua baixa eficiência no atendimento aos requisitos básicos para um sistema de regulação [30].

4.3.3 – Usina Termoelétrica Piratininga

Construída em meados dos anos 50 para auxiliar no fornecimento de energia a São Paulo, possui (04) quatro unidades geradoras de origem térmica; as unidades nº 1 e 2 possuem caldeiras alimentadas a óleo e gás para produção de vapor, e as unidades nº 3 e 4, com caldeiras de recuperação. Após a construção da Usina Termoelétrica de Fernando Gasparian, (Petrobras/EMAE) em 2005, com também (04) quatro unidades geradoras movidas a gás, unidades nº 31, 32, 41 e 42, foi possível a operação em ciclo combinado com as unidades nº 3 e 4 da Piratininga.

Para as máquinas da Usina Termoelétrica de Piratininga, o modelo utilizado foi o UNITROL[®] 6000 da empresa ABB, sistema de reguladores de tensão e sistemas de excitação estática. O conversor de potência possui pontes tiristorizadas, totalmente, controladas, supressor de campo com resistor de descarga e proteção contra sobretensão de campo. Possui sistema pré-excitação para partidas em casos de baixa tensão residual do gerador. Contém módulos de comunicação, controle e medição obtendo rendimento otimizado com canais de entradas e saídas interligados por fibra ótica. Com um ciclo de operação E/S's de 400µs e um controle lógico em malha fechada, é um sistema de rápida resposta, tornando-se confiável. O conversor de potência tem uma tensão de alimentação C. A. de 1500V com um nível de isolamento de até 7,5kV e IHM de fácil acesso. Por se tratar de um sistema moderno e digital, apresenta todas as facilidades disponíveis para render melhores desempenhos e facilitar a operação das unidades térmicas da usina Piratininga. Devido à restrição ao acesso, não houve possibilidade de aquisição de mais dados sobre os reguladores de velocidade.

4.3.4 – Usina Termoelétrica Fernando Gasparian

Similarmente ao sistema utilizado na usina Piratininga, o modelo de reguladores de tensão e sistemas de excitação estática da Usina Termoelétrica de Fernando Gasparian é o

Capítulo IV – O Controle do Sistema Elétrico

UNITROL[®]F, também da empresa ABB. Com um sistema de pontes tiristorizadas, totalmente, controladas, possui sistema pré-excitação para partidas, em casos de baixa tensão residual do gerador e módulos de comunicação, controle e medição por fibra ótica. Através do Sistema Estabilizador de Potência (PSS), oscilações de potência, causadas por mudanças repentinas de cargas, são rapidamente ajustadas, contribuindo para a estabilidade da unidade. Com IHM de fácil acesso, é um sistema moderno e digital e apresenta todas as facilidades disponíveis viabilizando a operação das unidades térmicas da usina. Não houve, novamente, possibilidade de aquisição de mais dados sobre os reguladores de tensão em decorrência de restrição ao acesso.

4.3.5 – Usina Elevatória de Pedreira

Conforme descrito anteriormente, as unidades dessa usina podem gerar energia elétrica, mas, por ser o bombeamento a sua função principal, seus sistemas de regulação de tensão consistem apenas de um reostato cuja função é controlar a corrente de excitação que vai para a máquina. Sua operação é manual, uma vez feito o ajuste, ele permanecerá até que o operador o modifique.

A ausência de um regulador automático de tensão implica, na realidade, em ajustes da corrente de excitação sempre que houver uma mudança no comportamento do sistema (carga), o que se pode fazer manualmente. Em casos de modificações bruscas (contingências), é possível que as unidades percam o sincronismo em função das variações impostas e da ausência de sistemas que controlem essas variações.

4.3.6 – Usina Elevatória de Traição

Como as unidades de bombeamento da Usina Elevatória de Traição não fazem parte deste estudo, o detalhamento desse sistema não será tratado.

Capítulo IV – O Controle do Sistema Elétrico

4.3.7 – Compensadores Síncronos

Por esses compensadores pertencerem a empresas distintas, FURNAS e CTEEP, a restrição ao acesso impossibilitou a aquisição de dados suficientes sobre o sistema de excitação e regulação de tensão.

Alguns dos equipamentos citados aqui são muito antigos e, ainda, não sofreram modificações, sendo, portanto, seu funcionamento muito similar, facilitando, assim, o entendimento.

Equipamentos mais modernos com excitação estática digital não podem ser comparados com os antigos, pois têm muitas especificações, aplicações e funções diferentes e cada sistema é projetado de forma específica.

O capítulo V – Teoria dos componentes do sistema apresenta os aspectos teóricos, diagramas fasoriais, curvas de capacidade e detalhes dos geradores, bombas e compensadores síncronos que compõem esse sistema.

CAPÍTULO V

TEORIA DOS COMPONENTES DO SISTEMA

5.1 – Aspectos Gerais

Um dos principais problemas enfrentados na operação de grandes sistemas elétricos consiste na obtenção de valores nominais de tensão em todas as barras e nas extremidades das linhas de transmissão e a manutenção da estabilidade das máquinas durante todo o tempo de operação [7] [10] [11].

Linhas de transmissão muito longas quando operam em vazio ou com carga reduzida, tem sua capacitância elevada, aumentando a tensão à medida que se caminha do início para o fim destas linhas, ou seja, sentido da geração para o consumidor. Já quando estão carregadas, devido ao efeito resistivo próprio e ao efeito indutivo da carga, diminuem a tensão à medida que se caminha no sentido da geração para o consumidor.

Para as linhas em vazio, a fim de se reduzir o efeito capacitivo, tem-se utilizado reatores que são conectados às linhas de transmissão. Os reatores nada mais são que indutâncias cuja finalidade é anular o efeito capacitivo da linha de transmissão e desta forma reduzir o aumento de tensão. Como os reatores não possuem regulação, uma vez ligados à linha de transmissão, não há mais como alterar seu efeito sobre a linha, e assim a sua potência reativa indutiva tem um valor fixo. Já para os casos onde as linhas não possuem reatores, outro recurso disponível são as manobras de linhas, de tal forma que a alteração da configuração do sistema modifique a impedância total do circuito. Essa manobra inclui o desligamento de linhas de transmissão em paralelo, fazendo com que a linha remanescente fique com maior carregamento podendo diminuir do valor da tensão nos extremos da linha.

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

Para linhas de carregamento elevado, carga média ou pesada, temos uma diminuição da tensão terminal, causada pela queda de tensão o longo da linha, devido ao efeito resistivo e indutivo da linha. A fim de compensar estas quedas, uma solução é a utilização de capacitores em série nas linhas, elevação da tensão dos geradores e nas subestações, a modificação dos tap's dos transformadores elevadores, mas estes dois últimos recursos trazem alguns inconvenientes. Para os geradores, operar com a tensão nos limites superiores em muitos casos é prejudicial, pois levam necessariamente a uma maior solicitação da isolação podendo diminuir sua vida útil. Para os transformadores, a variação da tensão do sistema provoca uma movimentação na regulação automática sob carga, essas frequentes mudanças de tap's, trazem desgastes aos contatos, no entanto, operativamente estes recursos têm mais restrições quanto mais próximos de seus limites eles estejam operando.

Em subestações, os capacitores também podem auxiliar na regulação de tensão, mas sua função principal é na correção do fator de potência, já os reatores estáticos não servem para regular a tensão, mas apenas para controlá-la.

Nos sistemas de potência o ajuste de tensão é feito pelo despacho da energia reativa das usinas, pelos compensadores síncronos e pelos tapes dos transformadores.

O principal objetivo do sistema elétrico de potência é suprir a demanda de energia de acordo com dois princípios básicos; segurança e confiabilidade [2] [10].

Segurança se refere à manutenção dos níveis adequados de tensão e frequência de acordo com o perfil de cada sistema, desde que atendam as necessidades da carga, sem danos ao fornecedor.

Confiabilidade é garantir a entrega dessa energia elétrica com o menor número de interrupções possíveis. O conjunto harmônico dessas características pode garantir a estabilidade do sistema elétrico de potência.

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

Essa estabilidade está ligada ao comportamento do sistema quando este é submetido a uma perturbação, que pode ser de grande ou pequena escala, definindo e criando as divisões nos estudos de estabilidade.

A análise do comportamento do sistema quando submetido a uma grande perturbação, é chamada de análise de estabilidade de regime transitório.

No entanto, pequenas perturbações, de ocorrências relativamente frequentes, definem o outro tipo de estudo de estabilidade, ou seja, estudos de estabilidade de pequenas perturbações, para esses casos, os estudos são da estabilidade em regime dinâmico.

Pequenas perturbações podem ser consideradas como pequenos desvios no estado do sistema, como por exemplo, pequenos ajustes de geração, assim, matematicamente todas as equações podem ser linearizadas e as propriedades aplicáveis na análise de sistemas lineares podem ser utilizadas. Como este estudo vai abordar grandes perturbações, esses equacionamentos não serão considerados.

Os estudos de estabilidade podem ser divididos basicamente em três períodos:

- subtransitório (X'') (até $t \pm 0,1s$ ou aproximadamente 6 ciclos);
- transitório (X') ($t < 1s$ ou 60 ciclos) e
- permanente (X) ($t > 300s$).

Sistemas que apresentam instabilidade de tensão ocasionada por uma queda brusca desta grandeza, revelam um evento conhecido como *colapso de tensão*. Esses eventos nunca aparecem isoladamente, surgindo devido a sucessivos incrementos de carga com consequente superação de limites de suporte de potência reativa nesses pontos.

5.1.1 – Estabilidade de Frequência

Está associada à capacidade que o sistema deve ter para manter a frequência dentro de um certo valor nominal, mesmo em situações severas. Essa capacidade está associada à

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

habilidade do sistema em restaurar o balanço de geração/carga [23].

5.1.2 – Estabilidade da Tensão

Está ligada a capacidade do sistema de potência em manter os valores de tensão em patamares aceitáveis tanto em regime normal de operação quanto sob condições de *stress* do sistema logo após uma perturbação. Podemos considerar que o sistema é instável quando esses valores sofrem grandes elevações ou quedas de tensão, onde há a ação das proteções restringindo e modificando a operação dos sistemas interligados.

Em particular a instabilidade de tensão é um fator preocupante, pois para a correta manutenção é necessário um suporte de potência reativa, e muitas vezes, esse suporte não está disponível durante os grandes eventos.

O adequado balanço no fornecimento de potência reativa garante a manutenção das tensões do sistema, e como esse suporte é eficiente quando feito o mais próximo possível da carga, a maior parte desta compensação pode ficar comprometida durante uma grande perturbação.

Para os geradores, o fornecimento de potência reativa é limitado pela corrente máxima de excitação da máquina, que aparece indicado nas curvas de capacidade.

As linhas de transmissão apresentam um comportamento mais dinâmico, com característica mais capacitiva durante períodos de carga leve e mais indutiva ou resistivas nos períodos de carga média e pesada. Nestes casos certas máquinas do sistema podem absorver potência reativa das linhas durante os períodos de carga leve.

Desse modo, o balanço de potência reativa fornecido por uma linha de transmissão varia de acordo com o seu carregamento, que em situações normais, varia com os períodos definidos de carregamento conhecidos como carga leve, carga média e carga pesada.

A compensação através de banco de capacitores dá suporte de potência reativa, mas

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

para situações de baixo perfil ou grandes variações de tensão, podem não operar de forma adequada ao sistema.

5.2 – A Carga

Um outro fator de grande importância para a estabilidade do sistema é a característica da carga. Modelos que representam uma carga mostram a relação entre a tensão, potência e a corrente.

A escolha adequada dos critérios para a modelagem das cargas em um sistema elétrico influencia nos resultados em um estudo de estabilidade, e podem ser basicamente, divididas em dois grupos, Z constante e P constante.

Cargas do tipo potência constante são mais críticas sob o aspecto de estabilidade de tensão, problema esse que em sua maioria reside nas cargas industriais. A grande desvantagem dos modelos representados por potência constante, é que, em variações de tensão, os sistemas vão sempre exigir a mesma potência, Figura 5.1. Para estes casos, as variações de tensão podem provocar o colapso no sistema.

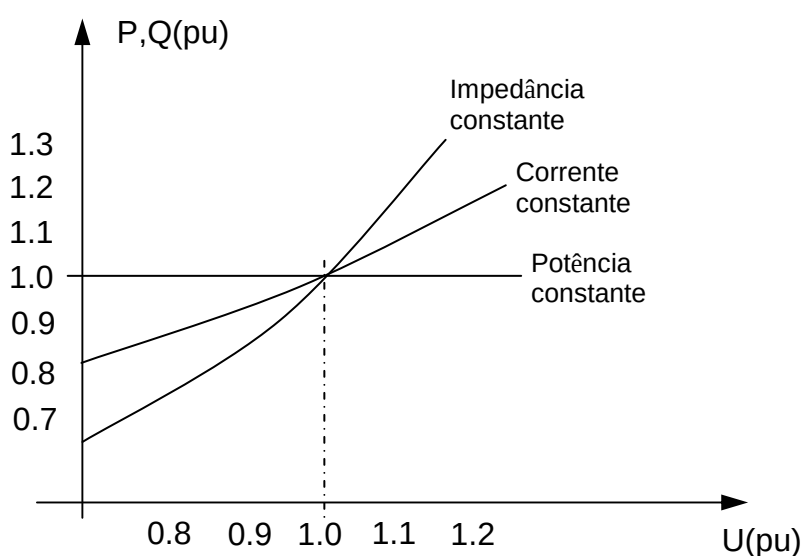


Figura 5.1 – Curva característica das cargas

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

Um outro caso são os modelos tipo corrente constante, nestes, a potência é proporcional a tensão, isto é, a corrente é independente da variação da tensão.

Já os modelos de impedância constante, além de representar o sistema com mais fidelidade, facilitam a convergência dos programas de simulação e análise de estabilidade transitória, Figura 5.2.

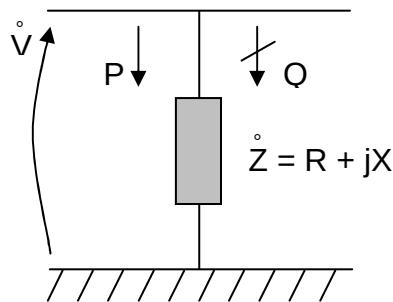


Figura 5.2 – Modelo de carga com impedância constante

5.3 – A Máquina Síncrona

As máquinas síncronas têm as características para trabalhar com velocidade síncrona e de possuir dois campos magnéticos: do estator, de corrente alternada, e do rotor, de corrente contínua. Quando absorve energia mecânica e fornece energia elétrica é denominado gerador, quando absorve energia elétrica e fornece energia mecânica é denominado motor.

Como gerador dependendo de sua aplicação pode diferenciar-se quanto ao aspecto construtivo para utilização como unidades geradoras de usinas termoeletricas, com turbinas à óleo, vapor ou gás, com alta rotação que vai de 1800 à 3600rpm, seu rotor é cilíndrico, com dois ou quatro pólos lisos, ou rotor liso. Por causa da alta rotação, no passado sua refrigeração era feita através do hidrogênio, hoje, em função de modificações como melhor classe de isolamento e projetos mais modernos, a refrigeração dessas máquinas é feita a ar.

Para utilização como unidades geradoras de usinas hidroelétricas, com

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

turbinas Pelton, Francis ou Kaplan, cujas rotações são baixas, menor que 900rpm, seu rotor é de pólos salientes e sua refrigeração é feita através do ar.

A máquina síncrona como gerador pode trabalhar sobreexcitada, com a tensão de excitação (corrente contínua) acima da nominal, fornecendo potência ativa e potência reativa, tendo o efeito físico igual ao de um capacitor para o sistema. Quando trabalha com tensão abaixo da nominal, subexcitada fornece potência ativa e absorve potência reativa, tendo o efeito físico igual ao de um indutor.

Como compensador síncrono, a máquina é girada a velocidade síncrona através de uma potência mecânica aplicada na turbina, funcionando como um gerador, ou como motor através da absorção de uma pequena potência ativa da rede para vencer as perdas rotacionais. Pode fornecer ou absorver potência reativa, dependendo de sua tensão de excitação.

5.3.1 – Efeito da Excitação da Máquina Síncrona

Considere a representação da máquina síncrona através do circuito equivalente abaixo:

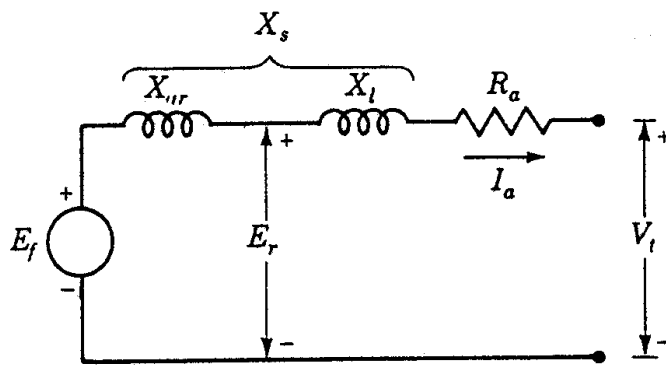


Figura 5.3 - Circuito equivalente de um gerador CA

Onde:

$V_t \rightarrow$ Tensão nos terminais, por fase;

$E_f \rightarrow$ Tensão gerada, por fase;

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

R_a → Resistência do enrolamento da armadura, por fase;

X_i → Indutância da armadura que representa o fluxo disperso, por fase;

X_{ar} → Indutância que representa a reação da armadura, por fase.

Somando as indutâncias X_{ar} e X_i e chamando-a de reatância síncrona (X_s), teremos então o circuito abaixo da Figura 5.4.

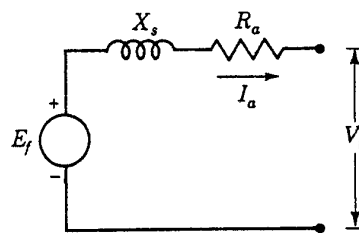


Figura 5.4 - Circuito equivalente simplificado de um gerador CA

Como R_a normalmente é bem menor que X_s , então podemos reduzir o circuito para:

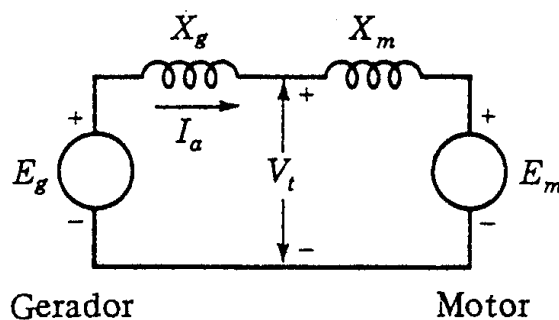


Figura 5.5 - Circuito equivalente para um gerador e um motor [18]

Onde:

X_g = Reatância síncrona do gerador

X_m = Reatância síncrona do motor

I_a = Corrente fornecida pelo gerador e recebida pelo motor

V_t = Tensão nos terminais do gerador e motor

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

E_g = Tensão gerada pelo gerador

E_m = Tensão recedida pelo motor

A variação da excitação da máquina síncrona constitui um fator importante para o controle do fluxo de potência reativa. Quando está subexcitado, fornece corrente adiantada em relação à tensão do sistema, nesta situação, a máquina pode ser considerada como solicitando corrente atrasada do sistema, operando como um indutor, recebendo potência reativa do sistema [13]. Quando o gerador está sobreexcitado, fornece corrente atrasada em relação à tensão para o sistema. A máquina também pode ser considerada como recebendo corrente adiantada do sistema, como um capacitor fornecendo potência reativa ao sistema.

Seja V_t constante, e se mantivermos a potência de entrada do gerador para o sistema, então, $|V_t| * |I_a| \cos\delta$ permanecerá constante quando variamos a corrente de excitação do campo CC, e com isso variarmos $|E_g|$.

$$|E_g| \cos\delta = V_t \quad (5.1)$$

O ângulo δ é o ângulo de conjugado ou ângulo de potência da máquina.

Esta ação pode ser explicada pela fmm da reação da armadura. Por exemplo, quando o gerador é sobreexcitado deve fornecer corrente atrasada, pois a corrente atrasada produz uma fmm em oposição, de modo a reduzir a sobreexcitação, Figura 5.6 (a), e quando o gerador é subexcitado, ele fornece corrente adiantada, Figura 5.6 (b).

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

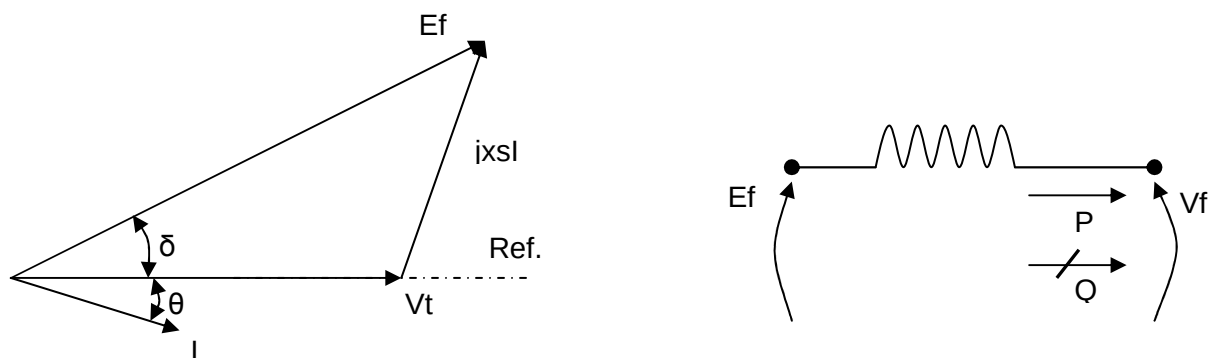


Figura 5.6 (a) - Diagrama fasorial do gerador sobreexcitado

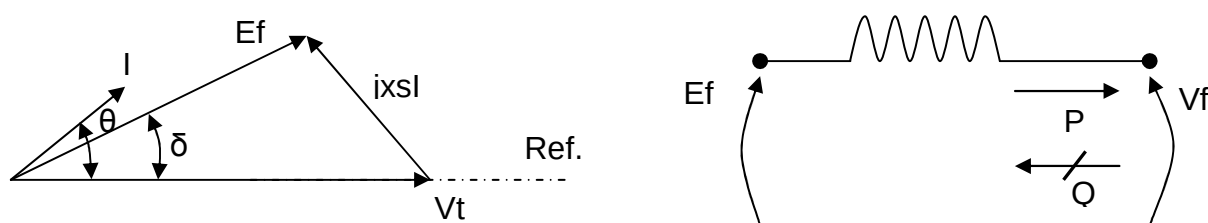


Figura 5.6 (b) - Diagrama fasorial do gerador subexcitado

Se a força eletromotriz E de um alternador estiver em fase e for igual à tensão de linha V a corrente na máquina será nula, não haverá nem fornecimento nem absorção de energia elétrica [7] [10] [11] [12]. Desde que a frequência da linha e a rotação do gerador permaneçam inalterados, somente uma força mecânica externa poderá mudar a condição de sincronismo.

Variando a corrente de excitação provocaremos uma modificação no valor de E , com isso, surgirá uma corrente I no estator do gerador que não envia potência ativa para o sistema, pois esse I é puramente indutivo.

Para que o gerador possa fornecer energia elétrica é necessário que o campo do rotor se adiante em relação ao do estator, assim aparecerá uma força de interação entre os dois campos responsáveis pelo torque no rotor, vencido pela turbina.

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

Nessa condição, a nova corrente I estará defasada de θ graus elétricos em relação a V . A potência ativa fornecida pelo gerador é proporcional a $I \cdot \cos\theta$ e a reativa $I \cdot \sin\theta$. O diagrama vetorial de um gerador é mostrado abaixo pela Figura 5.7.

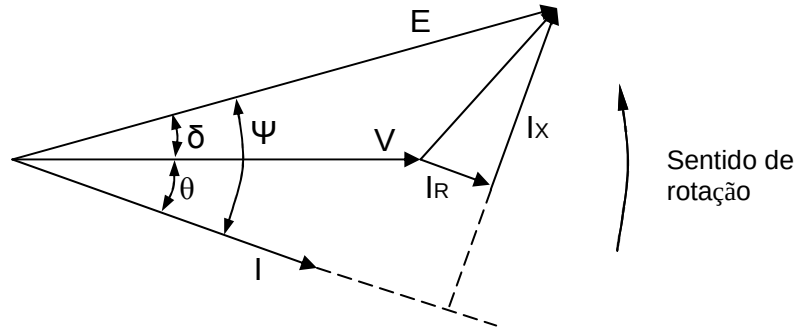


Figura 5.7 – Diagrama vetorial do gerador

Definimos δ como o ângulo de defasagem, em graus elétricos, entre a tensão do gerador e sua força eletromotriz.

A potência ativa fornecida pelo gerador é dada pela seguinte expressão;

$$P = 3 \cdot E \cdot I \cdot \cos\Psi \quad (5.2)$$

Desprezando-se a queda de tensão I_R , por ser muito pequena, teremos;

$$I \cdot X \cdot \cos\theta = E \cdot \sin\delta$$

$$E \cdot \cos\Psi = V \cdot \cos\theta$$

$$\text{onde } P = \frac{(3 \cdot E \cdot V)}{X} \cdot \sin\delta \quad (5.3)$$

Vejamos agora o que acontece quando se mantém constantes P e V e varia-se apenas a excitação.

$$\text{Temos: } P = 3 \cdot E \cdot I \cdot \cos\Psi = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos\theta = \frac{(3 \cdot E \cdot V)}{X} \cdot \sin\delta = \text{cte.}$$

donde $I \cdot \cos\theta = \text{cte}$ e $I \cdot X \cdot \cos\theta = \text{cte}$, pois $X = \text{cte}$

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

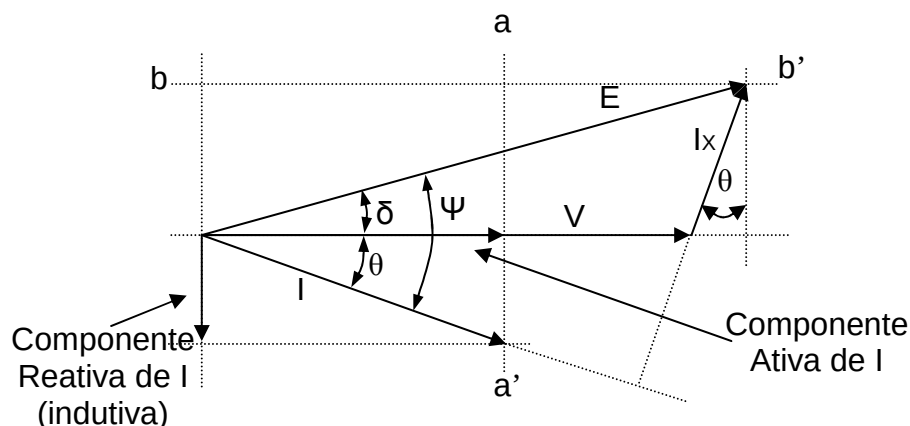


Figura 5.8 – Diagrama vetorial do gerador com potência ativa fixa

Através do diagrama da Figura 5.8, vemos que $I \cos \theta$ é a projeção de I sobre V e $IX \cos \theta$ é a projeção de E . Assim quando variarmos a excitação, a extremidade do vetor I se deslocará sobre a reta tracejada ($a a'$), e a extremidade do vetor E sobre ($b b'$). Aumentando a excitação aumentaremos E reduzindo δ e aumentaremos I , aumentando θ , se a carga for indutiva.

Diminuindo a excitação teremos o fenômeno inverso, sendo que θ diminuirá, podendo passar para zero (carga resistiva) e na sequência, aumentar, porém adiantando-se a tensão (carga capacitiva). Podemos dizer que a máquina está super-excitada, quando I está em atraso em relação a V (carga indutiva) e sub-excitada quando I está adiantada em relação a V (carga capacitiva).

A máquina síncrona também pode operar como motor síncrono, sobreexcitada, solicita corrente atrasada em relação à tensão e se comporta como um circuito capacitivo quando visto do sistema para o qual ele fornece potência reativa. Subexcitada, solicita corrente adiantada, absorve potência reativa e se comporta como um circuito indutivo quando visto do sistema. Figuras 5.9 (a) e 5.9 (b).

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

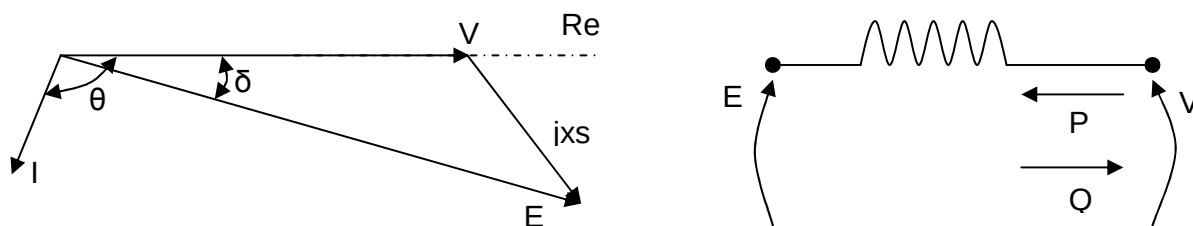


Figura 5.9 (a) - Diagrama fasorial do motor sobreexcitado

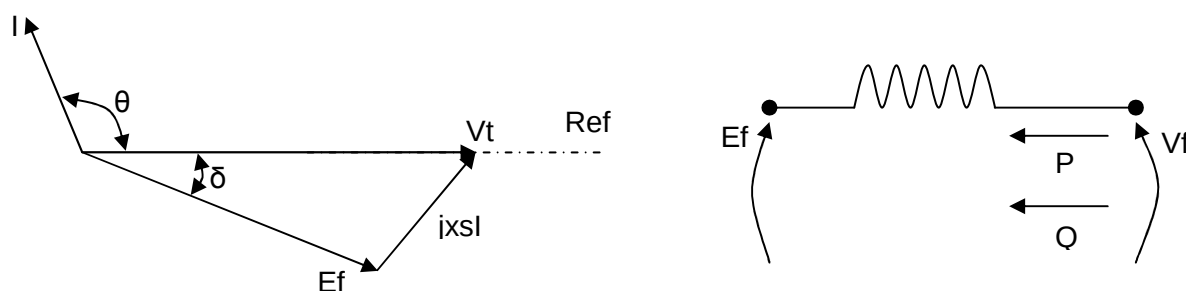


Figura 5.9 (b) - Diagrama fasorial do motor subexcitado

A expressão matemática das tensões da máquina síncrona é dada por;

$$E_f = (V_t \cdot \cos \delta + I_a \cdot R_a) + j (V_t \cdot \sin \delta \pm I_a \cdot X_s), \text{ para geradores} \quad (5.4)$$

$$E_f = (V_t \cdot \cos \delta - I_a \cdot R_a) + j (V_t \cdot \sin \delta \pm I_a \cdot X_s), \text{ para motores} \quad (5.5)$$

Onde:

E_f = tensão gerada (gerador) / recebida (motor)

X_s = Reatância síncrona

I_a = Corrente fornecida (gerador) / recebida (motor)

V_t = Tensão nos terminais

δ = Ângulo entre a corrente I_a e a tensão V_t

Observação: Na expressão em quadratura, (+), é usado para fatores de potência em avanço e (–) é usado para fatores de potência em atraso.

A expressão da potência ativa é dada por:

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

$$P = V_t I_a \cos \delta \quad (5.6)$$

A expressão da potência reativa é dada por:

$$Q = V_t I_a \sin \delta \quad (5.7)$$

5.3.2 - Curva de Capabilidade do Gerador Síncrono

A curva de capabilidade de uma máquina mostra os valores normais e os seus limites operacionais e através deles é possível operar um gerador ligado a um sistema elétrico fornecendo potência ativa e reativa, sem ultrapassar seus limites [16]. Isso garante a sua operacionalidade e vida útil.

Os limites dos geradores síncronos apresentados pela curva são:

- Limite de aquecimento da armadura (corrente máxima de armadura), que é a máxima corrente que pode circular sem danificar a isolação da máquina. A capacidade que o gerador tem de fornecer uma determinada potência está intimamente ligada à potência da turbina e ao sistema de excitação. Para máximos valores de excitação, podemos ter limitações térmicas na máquina;
- Limite de potência da turbina, que é a capacidade máxima de potência que a turbina pode oferecer. Embora alguns sistemas tenham condições de oferecer valores acima da sua capacidade, é sempre bom lembrar que há todo um conjunto acoplado que pode não suportar e;
- Limite de estabilidade, excitação mínima. Para mínimos valores de excitação, podemos ter problemas com a estabilidade da máquina.

O enrolamento de campo do rotor do gerador síncrono também pode ficar sobreaquecido devido as perdas ôhmicas, onde r_f é a resistência do enrolamento de campo e i_f a corrente de campo).

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

$$P = r_f * i_f^2 \quad (5.8)$$

A Figura 5.10 apresenta o limite de aquecimento do enrolamento de campo do gerador como um segmento de circunferência com centro no ponto O e raio $E_t V_t / x_s$. E_f é a força eletromotriz produzida pela corrente de campo (valor correspondente à máxima corrente de campo), V_f é tensão da barra infinita na qual está conectado o gerador e x_s é a reatância da armadura.

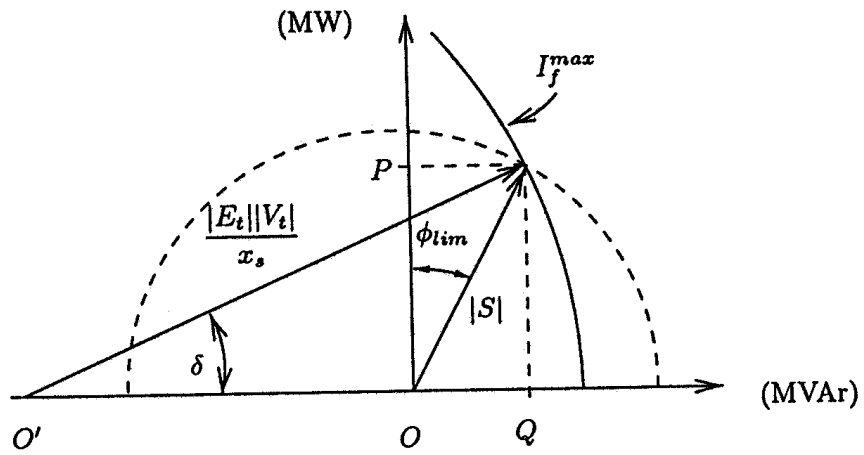


Figura 5.10 – Limite de aquecimento do enrolamento de campo [18]

Outra limitação que o gerador pode receber é da turbina. A potência mecânica que a turbina fornece ao eixo da máquina síncrona é dada pela seguinte equação:

$$P_{mec} = T * \omega_s \quad (5.9)$$

onde, T é o torque e ω_s é a velocidade angular $= 2\pi f / p$, onde f é frequência e p o número de pares de pólos da máquina.

A Figura 5.11 mostra esse limite na forma de um valor máximo de potência ativa gerada pela máquina, que dependendo das características da máquina, esse limite pode ser mais ou menos restritivo.

O limite de potência de turbina só afeta a potência ativa, pois a energia associada

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

à potência reativa é nula, a energia elétrica fornecida ao sistema é proporcional à energia mecânica fornecida ao eixo, descontadas as perdas.

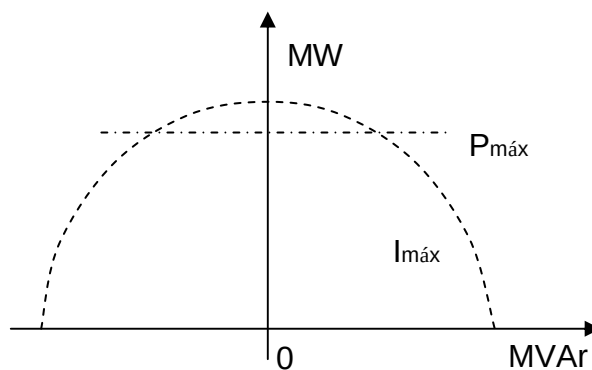


Figura 5.11 – Limite de potência da turbina

Também há um limite de estabilidade que é imposto pelo ângulo de potência máximo permitido, δ_{max} . Este tipo de limite está ilustrado na Figura 5.12.

No limite de $\delta_{max} = \pi / 2$ ou (90°) , aparece como o ângulo máximo permitido para que a máquina permaneça na região estável de operação e forneça a sua máxima potência, entendimento que é representado através da Figura 5.12.

$$P = P_{máx} * \text{sen}(\delta) \quad (5.10)$$

É fácil perceber que matematicamente para valores de $\text{sen}(\delta)$ maiores ou menores que $\pi / 2$ ou (90°) os valores serão menores que $P_{máx}$.

Suponhamos agora manter V e I_{ex} constantes e aumentarmos a potência mecânica fornecida ao gerador; δ e P aumentarão até P atingir o valor máximo ($\delta = 90^\circ$). Com um aumento subsequente da potência mecânica, δ ultrapassará 90° provocando uma redução de P e um novo aumento de δ . A partir desse instante, o gerador perde a estabilidade, δ cresce rapidamente e a máquina sai de sincronismo. A condição de estabilidade do gerador se torna mais crítica quando se trabalha na região de sub-excitada (carga capacitiva), Figura 5.12.

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

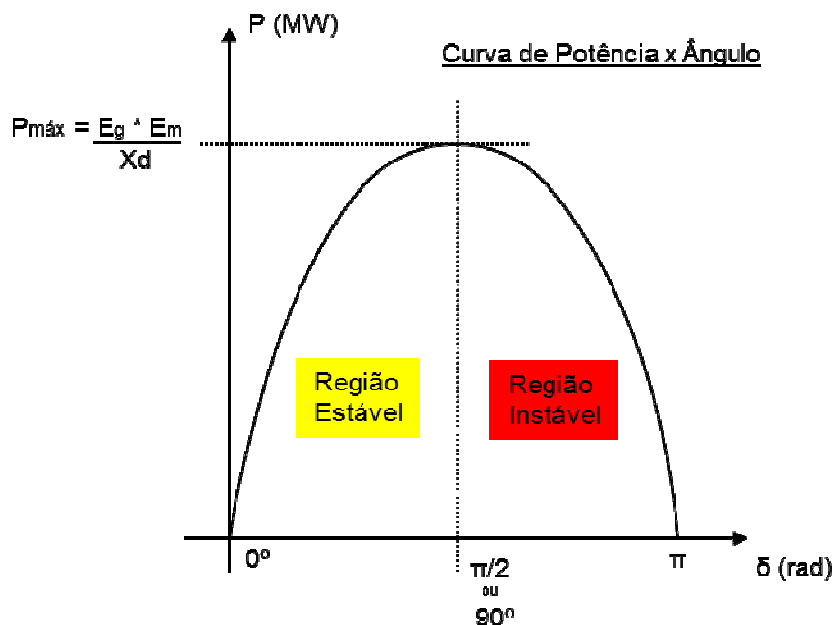


Figura 5.12 – Limite de estabilidade teórico imposto pelo ângulo máximo de potência

5.3.3 – Estabilidade Angular

Indica a habilidade dos geradores síncronos interligados ao sistema, permanecerem em equilíbrio (sincronizados), tanto em regime normal de operação assim como após uma perturbação [23].

Esse sincronismo é a capacidade que a máquina deve ter para manter ou recuperar as características normais de operação, que é o equilíbrio entre torque eletromagnético e o torque mecânico após os eventos no sistema.

Quando isso não ocorre, o resultado é o aumento constante do ângulo de carga da máquina, levando esse gerador à instabilidade angular e consequentemente a perda de sincronismo, Figura 5.13.

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

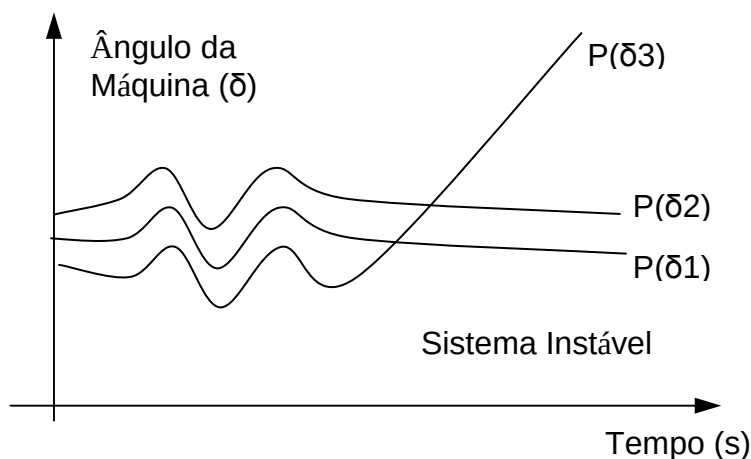


Figura 5.13 – Respostas de três máquinas durante uma perturbação.

O ângulo de carga (δ) é um artifício matemático que representa a diferença angular entre a tensão terminal (V_t) e a tensão interna do gerador (E_g).

Se a instabilidade se restringir a uma única unidade, o que para grandes perturbações é praticamente impossível em grandes sistemas interligados, o maior prejuízo pode ser o desligamento de uma única unidade. Quando isso não ocorre, então, a instabilidade de uma única unidade geradora, pode provocar essa mesma oscilação em outras máquinas próximas, onde o aumento momentâneo de potência exigida levaria à superação de seus limites de estabilidade e consequente desligamento. O desligamento de mais de uma unidade de geração, ou eventos de desligamentos em cascata, pode levar o sistema alimentado por esses geradores a uma situação de emergência ou “*black-out*”.

5.3.4 – Estabilidade a Pequenas Perturbações

Pequenos sinais de oscilação estão presentes o tempo todo no sistema durante sua operação, e são mais ou menos intensos em função de vários fatores. Eles podem ser observados em comutação de cargas, parametrizações impróprias dos sistemas de controle, (reguladores de tensão e velocidade), desajustes e folgas dos sistemas mecânicos de

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

acionamento, problemas elétricos da rede e outros.

Essas perturbações são suficientemente pequenas para serem consideradas como oscilações normais, pois não tem grande impacto no sistema e nem em sua operação. Por outro lado, precisam ser bem estudadas, pois seu efeito cumulativo pode levar as máquinas à instabilidade e tirá-las de operação.

As variações da corrente de excitação da máquina nos levam a vários pontos de operação diferentes que são conhecidos como curva de capacidade. A Figura 5.14 apresenta uma curva de capacidade típica.

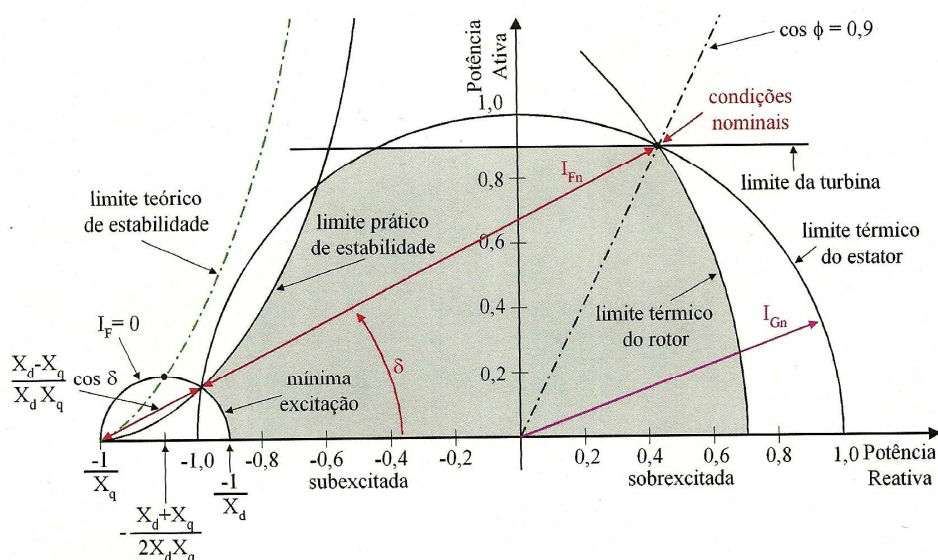


Figura 5.14 – Curva de capacidade típica de um gerador [16]

Todas as curvas de capacidade disponíveis das máquinas utilizadas nesta dissertação estão no anexo D.

5.3.5 – Estabilidade Transitória

A estabilidade transitória é a capacidade dos geradores do sistema de potência de manter o sincronismo após um grande distúrbio. As perturbações são provocadas por grandes

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

eventos no sistema, como por exemplo, curto-circuito, desligamento ou inserção de grandes blocos de carga ou de geração, ou ainda as oscilações devidas aos desligamentos de linhas de transmissão.

Durante e imediatamente após grandes perturbações, o sistema tende a se manter o mais estável possível, pela atuação simultânea de seus reguladores de tensão e velocidade, e em sequência, encontrar uma nova condição de operação. Essa pode tanto ser a mesma ou outra condição dada pela repartição da carga pelos geradores que continuam em operação, de tal forma que o sistema como um todo permaneça funcionando dentro de condições aceitáveis. Essas perturbações podem produzir grandes variações no ângulo de carga do gerador, modificando a relação de potências ativa e reativa fornecidas pela máquina.

A estabilidade transitória depende tanto do ponto inicial de operação, quanto da severidade da perturbação.

A estabilidade de um sistema dinâmico conectado a vários outros é a sua capacidade de retornar às condições estáveis de operação logo após ele ter sido submetido a uma perturbação. Essas condições estão intimamente ligadas ao comportamento de todos os elementos (linhas, geradores, cargas, indutores, capacitores, transformadores e etc.) conectados a esse sistema, e dependem do comportamento dinâmico de todos esses elementos.

Quando o rotor de uma máquina síncrona adianta-se de certo ângulo crítico, o acoplamento magnético entre o rotor, solidário à turbina, e o estator, deixa de existir. Nessas condições o rotor não consegue mais manter-se em sincronismo com o campo girante porque uma sobrecorrente no estator, com conseqüente maior potência elétrica, exige uma maior potência mecânica no rotor. Se a turbina não for capaz de entregar essa nova potência, logo, acabará por produzir um escorregamento entre campo magnético do estator e do rotor que faz

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

com que o ângulo de carga comece a aumentar.

Sempre que os pólos do rotor passam por uma condição angular de potência máxima, se afastando do funcionamento estável, nestas condições, surgem forças sincronizantes que tendem a puxar o rotor novamente para o sincronismo. Se esta situação se estende por muito tempo, ou esses ângulos crescem ininterruptamente, essas máquinas devem ser desligadas.

Para as máquinas, essa habilidade está ligada principalmente a uma resposta de qualidade dos reguladores de velocidade. Turbogeneradores de alta velocidade e geradores hidráulicos de baixa velocidade possuem respostas diferentes para essas mesmas situações.

As turbinas dos turbogeneradores sofrem mais com as bruscas variações de frequência, mais especificamente em situações de subfrequência, pois são mais sensíveis que as turbinas dos geradores hidráulicos. Esses problemas geralmente são associados a respostas inadequadas dos reguladores e das proteções.

5.3.6 – Enrolamentos Amortecedores

São utilizados por causarem efeitos de estabilidade sobre as máquinas síncronas e melhorarem os perfis de tensão [4]. Eles se dividem basicamente em dois tipos:

1. Completo ou conectado e;
2. Incompleto, desconectado ou aberto.

Ambos os tipos consistem de barras colocadas nos pólos e conectadas entre si em cada extremidade. Os enrolamentos amortecedores conectados possuem todos os seus condutores fechados em anéis, conectando as barras de todos os pólos, semelhante aos enrolamentos de um motor de indução gaiola de esquilo, exceto que as barras não são uniformemente espaçadas.

No enrolamento amortecedor desconectado, elas estão abertas entre os pólos, ficando independente, entretanto, enrolamentos amortecedores completos são eletricamente

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

superiores.

Podem ser classificados de acordo com sua resistência, onde enrolamentos de baixa resistência produzem maior torque e os de alta resistência, grande escorregamento.

Podem ser de dois andares, (como enrolamento de dupla gaiola de esquilo em motores de indução), contribuindo para melhorar as características de partida de máquinas síncronas fornecendo torque.

Podem amortecer as oscilações de velocidade, evitam distorções da forma de onda da tensão, equilibrando as tensões terminais das fases e protegem os pólos de variações de fluxos evitando aquecimentos.

Durante uma falha, pode fornecer torque de frenagem, reduzindo torque de aceleração e redução do stress sobre o isolamento do enrolamento de campo durante surtos de corrente no circuito da armadura.

Esses efeitos são conseguidos pois os enrolamentos amortecedores reduzem os valores dos seguintes parâmetros da máquina síncrona: x''_d , x''_q , x_2 , r_2 , T''_d , e T''_q .

Projetistas de geradores preferem amortecedores incompletos por razões mecânicas, particularmente onde a velocidade periférica é alta.

Para esses caso, há o perigo de dano para as conexões entre os pólos que não suportam a força centrífuga, por isso, enrolamentos amortecedores não são usados em turbogeradores.

Em contra partida, os núcleos de aço sólido do rotor de tais máquinas fornecem caminhos para correntes parasitas e, assim, produzem os mesmos efeitos como os amortecedores. Mesmo em máquinas com pólos salientes laminados e sem amortecedores, essas correntes parasitas nos pólos do rotor tem um efeito muito pequeno de amortecimento.

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

5.4 – Compensador Síncrono

O compensador é uma máquina síncrona utilizada para compensar variações lentas de tensão, de forma a atender o sistema transmissão, possibilitando entregar a máxima potência disponível dentro de valores nominais de tensão. No compensador síncrono a máquina funciona como um motor síncrono girando a vazio, consumindo do sistema uma potência elétrica suficiente para vencer as suas perdas internas (atrito, ventilação, aquecimento, etc.) variando sua tensão terminal.

Ajustando a regulação de tensão, sobreexcitando ou subexcitando, podemos operar o compensador de forma que em situações de carga pesada, quando a tensão tende a baixar nos pontos de consumo, sobreexcita-se o compensador fornecendo-se energia reativa elevando a tensão exigida pelo sistema. Fora da situação de carga pesada em que a tensão tende a aumentar devido ao efeito capacitivo das linhas de transmissão, o compensador deverá ser subexcitado, absorvendo energia reativa reduzindo a tensão.

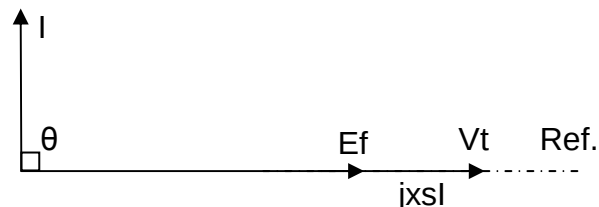


Figura 5.15 (a) – Diagrama fasorial do compensador subexcitado

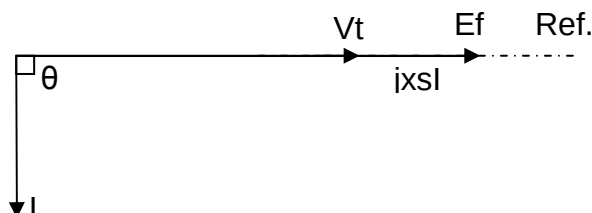


Figura 5.15 (b) – Diagrama fasorial do compensador sobre-excitado

Capítulo V – Teoria dos Componentes do Sistema

É importante ressaltar algumas das vantagens que estes compensadores trazem à operação do sistema:

1 – A geração de energia reativa (MVar) por parte dos compensadores, deixa os geradores disponíveis para a geração de potência ativa (MW).

2 – Evita que os geradores trabalhem com tensão de geração próxima de seus valores limites.

3 – Evita variação constante nos tap's dos transformadores elevadores sob carga, auxiliando na sua preservação.

4 – Reduz o número de manobras com reatores ou manobras de linhas de transmissão quando estas são necessárias para corrigir o valor de tensão.

5 – Facilidade de ajuste de tensão, bastando apenas ajustar a excitação do compensador síncrono em uma atuação bastante simples e rápida.

O capítulo VI, simulação computacional do sistema, apresenta as informações necessárias sobre a construção do diagrama de estudos, os principais equipamentos, o banco de dados que contém todos os dados utilizados, as bases, as quantidades de equipamentos os tipos e todo os equipamentos que envolveram a elaboração deste estudo.

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

CAPÍTULO VI

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO SISTEMA

6.1 – Descrição Geral

Este capítulo é dedicado à apresentação dos programas utilizados na realização deste trabalho. Aqui serão detalhadas etapas tais como; a construção do diagrama unifilar, entrada de dados, parâmetros utilizados, métodos matemáticos utilizados pelos programas, base de dados e outros.

Os dados utilizados na construção do diagrama unifilar foram obtidos através do programa ANAREDE – Análise de Redes pertencente ao CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica [36].

Esse programa é muito utilizado na área de sistemas elétricos sendo indicado para estudos de fluxo de potência e análise de contingências. Entre os usuários estão as empresas concessionárias de energia e empresas regulamentadoras e de pesquisa de energia tais como:

ONS - Operador Nacional do Sistema, empresa ligada ao governo federal na área de operação, EPE – Empresa de Pesquisa Energética, também ligada ao governo federal, ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, regulamentação e fiscalização.

Os dados da Rede de Operação, incluindo a Rede Básica e as demais redes que tenham influência direta na operação do SIN – Sistema Interligado Nacional são disponibilizados mensalmente a todos os agentes de energia. Esses dados são fornecidos pelas próprias empresas de energia elétrica e grupos de estudos ligados ao ONS.

A Rede de Operação e a Rede Básica representam as malhas controladas pelo ONS. Em geral, apenas algumas malhas com tensões de 88kV são controladas, mas acima de 230kV todas são. (MPO – Manual de Procedimentos da Operação do ONS – Módulo 10).

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

Para o desenvolvimento do estudo foram utilizados os seguintes dados do Programa de Análise de Redes (ANAREDE):

- Dados das cargas: potência ativa e reativa;
- Dados de geração de potência ativa e reativa;
- Impedância das linhas de transmissão; (resistência, reatância e susceptância);
- Impedância dos transformadores e auto-transformadores;
- Tap dos transformadores e dos auto-transformadores;
- Limites de operação dos equipamentos;
- Dados dos Compensadores síncronos: limites máximos e mínimos de operação;
- Dados dos Reatores e banco de capacitores e
- As curvas de capacidade das unidades geradoras.

O ANAREDE utiliza para seus cálculos o método trapezoidal implícito e suas potências de base são $S = 100\text{MVA}$ e $V = 138\text{KV}$.

Como este trabalho vai simular a parte dinâmica de eventos em um sistema real, que é a malha de São Paulo, o ANAREDE não será utilizado, apenas o seu banco de dados.

Esses dados foram utilizados para alimentar o programa PSAT – Power System Analysis Toolbox, programa, escolhido para a realização deste trabalho.

O PSAT é um programa de domínio público e foi desenvolvido pelo Dr. Federico Milano [37].

O programa é um aplicativo para ser utilizado dentro do ambiente do programa MatLab ou do programa Octave, que também é de domínio público.

O PSAT é um programa amigável, sua interface visual é bem simples, possui uma

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

biblioteca em forma de blocos de equipamentos que são utilizados na construção do diagrama que se deseja.

A construção é simples, pois vai se posicionando as barras, linhas, cargas e máquinas e depois todos são interligados, chegando ao final em um diagrama unifilar que representa o sistema em estudo. Cada componente do sistema possui uma caixa onde são inseridos os dados pertinentes, por exemplo, uma barra deve conter o nível de tensão de operação, a quantidade de entradas e saídas, o valor da tensão, módulo e ângulo, e assim sucessivamente.

Para uma precisa análise do sistema, o PSAT possui uma biblioteca de componentes estáticos e dinâmicos, que são utilizados na construção do modelo, são eles:

- Power Data Flow: barramentos, linhas de transmissão e transformadores, barra de folga, e barra PV de geração, cargas de potência constante e de impedância constante e admitâncias shunt.
- CPF (Fluxo de Potência Continuado) e OPF (Fluxo de Potência Ótimo) valores limites das linhas de transmissão, reserva de potência do gerador, dados de rampa do gerador, e as propostas de limites de demanda de energia.
- Operações de comutação: falhas de linhas de transmissão e de disjuntores de linha de transmissão.
- Medidas: frequência da barra e unidades de medição fasorial (PMU).
- Cargas: Tensão nas cargas dependentes, frequência nas cargas dependentes, cargas com impedância, corrente e potência constante, carga de recuperação exponencial e cargas termostaticamente controlada.
- Máquinas: máquinas síncronas e motores de indução

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

- Controles: Governadores de Turbina (TG), reguladores automáticos de tensão (AVR), PSS (Power System Stabilizer), limitadores de sobre-excitação, regulação de tensão secundária.
- Transformadores Reguladores: TAP's e LTC e transformadores com defasamento angular.
- Compensadores: Compensadores estáticos (Var), Capacitores Série controlados por Thyristor, compensadores síncronos e sistemas de transmissão de alta tensão DC.
- Turbinas Eólicas: modelos de vento, turbina eólica de velocidade constante em gaiola de esquilo (motor de indução), turbina eólica de velocidade variável com gerador de indução duplamente alimentado, e turbinas eólicas de velocidade variável com gerador síncrono de transmissão direta.
- Outros modelos: eixo dinâmico da máquina síncrona, ressonância sub-síncrona modelo de Célula a Combustível de Óxido Sólido.

Para a solução das simulações com fluxo de potência, (estáticas) e a dinâmica dos sistemas e das máquinas, foi utilizado o método de convergência de Newton Raphson, utilizando o método de integração Trapezoidal Rule, sendo o mais indicado em função da fácil convergência. A base é livre para ser adequada de acordo com a necessidade, embora o programa recomende potência base de $S = 100\text{MVA}$.

6.2 – A Construção do Diagrama Estudado

A construção do diagrama reduzido da malha estudada de São Paulo foi feita através da biblioteca do PSAT onde foram utilizados os seguintes blocos de equipamentos:

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

6.2.1 – Barra

As barras do PSAT se comportam como “*nós em um sistema elétrico*”, são utilizadas para comportar todos os equipamentos sendo considerada a unidade mínima da rede. As barras possuem apenas informações topológicas, como áreas, regiões, número de entradas e saídas e o nível de tensão. Para este estudo, foram considerados 10 valores diferentes de tensões, conforme a Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Total de barras presentes no diagrama.

Tensão	Total de Barras
765 kV	1
440 kV	9
345 kV	24
230 kV	8
88 kV	17
20 kV	4
14,4 kV	2
13,8 kV	12
11 kV	8
6,6 kV	8
Total	93 Barras

Barras com as tensões e códigos de cores utilizados na identificação das áreas.

6.2.2 – Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão são blocos utilizados para interligar todas as barras e seus equipamentos, sua parametrização se resume a potência aparente, tensão, frequência, resistência, reatância e susceptância.

Assim como as barras, essas linhas também estão presentes em vários níveis de tensões, conforme a Tabela 6.2.

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

Tabela 6.2 – Total de linhas presentes no diagrama.

Tensão	Total de Linhas
440 kV	11
345 kV	46
230 kV	08
88 kV	23
Total	88 Linhas

Linhas com as respectivas tensões e códigos de cores utilizados na identificação.

Os dados das linhas foram obtidos no programa ANAREDE, e podem ser encontrados no Anexo B.

6.2.3 – Transformadores

Os transformadores presentes neste trabalho são de três tipos, transformador com tap fixo, auto-transformador e transformador de três enrolamentos. Suas diferenças basicamente são a presença ou não de tap de comutação de tensão entre primário e secundário, pois as outras informações são idênticas, tais como: potência aparente, tensão, frequência, resistência e reatância. Neste trabalho estão presentes 49 transformadores, sendo um deles com três enrolamentos e 03 auto-transformadores. As características individuais de cada um deles está disponível no Anexo B.

6.2.4 – Disjuntores

Os disjuntores são os dispositivos utilizados neste diagrama para desenhar, ligar e desligar eletricamente o sistema, isolar equipamentos, modificar a configuração do sistema, simular interrupções, partida e parada de máquinas e outros. Seus dados basicamente são potência aparente, tensão, frequência e estado de operação, se ligado ou não, e em quais tempos (segundos).

Na simulação foram atribuídos tempos de 108ms para a operação dos disjuntores,

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

pois os estudos de operação dos disjuntores GVO (Grande Volume de Óleo) da EMAE mostraram que, tanto os disjuntores de 88kV quanto os de 230kV, possuem tempos de abertura de no máximo 3 ciclos, (50ms). Para a interrupção do arco, o disjuntor mais as proteções de barras de 88 e 230kV operam em torno de 83ms. Somadas a isso, temos os tempos de operação das CR's (Chaves Relé), que tem operação em torno de 25ms, logo, totalizando 108ms.

Para este trabalho foram considerados apenas os disjuntores mais importantes do sistema estudado que são em um total de sete, pois é através deles que é possível modificar a configuração de operação do sistema. Para as simulações de perdas de cargas, linhas de transmissão, máquinas e transformadores foram modelados disjuntores adicionais, mas sempre respeitando os tempos de operação desses equipamentos.

6.2.5 – Máquinas Síncronas

Como esse estudo é dinâmico, todas as máquinas inseridas no diagrama são máquinas síncronas, pois elas permitem a aquisição de sistemas de controle e variações nas máquinas de acordo com as oscilações ocorridas no sistema.

Para as máquinas síncronas, o PSAT oferece 8 tipos diferentes de máquinas, onde cada tipo tem uma parametrização diferente, o que também modifica seu comportamento. Para esse trabalho o tipo de máquina escolhido foi o tipo 4. Esse modelo oferece um comportamento dinâmico médio ao estudo e sua parametrização básica é a potência aparente, tensão, frequência, resistência e reatância, tempos de circuito, inércia e outras não tão comuns. A Tabela 6.3 apresenta as máquinas utilizadas neste estudo descrevendo os tipos presentes, suas quantidades e em quais níveis de tensão essas máquinas estão conectadas.

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

Tabela 6.3 – Total de máquinas presentes no diagrama.

Tensão	Total de Máquinas	
765 kV	1	Máquina Síncrona Equivalente
440 kV	2	Máquinas Síncronas Equivalentes
345 kV	1	Máquina Síncrona Equivalente
20 kV	4	Compensadores Síncronos
14,4 kV	2	Geradores Síncronos
13,8 kV	12	Geradores Síncronos
11 kV	8	Geradores Síncronos
6,6 kV	7	Geradores Síncronos Reversíveis
6,6 kV	1	Bomba Síncrona
Total	38	Máquinas

Tipos de máquinas e respectivas tensões nos códigos de cores.

Os dados das máquinas podem ser encontrados no Anexo B.

Particularmente a parametrização das máquinas foi muito complicada, pois como este estudo simula um sistema real, os dados teriam que ser reais. Como os parâmetros das máquinas na base de dados são diferentes dos requisitados no PSAT, algumas informações tiveram que ser encontradas junto a própria máquina.

Infelizmente, como essas máquinas são muito antigas, a maior parte das informações não estava disponível, uma boa parte do tempo despendido neste trabalho, foi exclusivamente na obtenção desses dados. Um outro grande obstáculo a ser contornado foi a obtenção de dados de equipamentos pertencentes a outras empresas, onde o acesso não era permitido.

A plataforma de dados dessas máquinas ficou dividida em quatro formatos diferentes, assim;

1. Dados com base nas informações dos próprios equipamentos, dados de placa, estudos, diagramas, relatórios, manuais e outros;

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

2. Dados baseados na similaridade entre os equipamentos. Alguns estudos e relatórios de máquinas possuem dados que podem servir para outras máquinas que possuam características similares a elas;
3. Dados literários. Na ausência de algumas informações que não estavam disponíveis em nenhuma das formas anteriores, o recurso mais indicado foi obter esses dados através de literatura, livros, dissertações e teses, e;
4. Parâmetros do programa. Como último recurso no preenchimento dos dados necessários para completar as parametrizações das máquinas, após esgotadas todas as possibilidades, foram utilizados valores médios fornecidos pelo programa. Felizmente este recurso foi pouco necessário.

O sistema estudado possui quatro grandes entradas de energia, Tijuco Preto (765kV) Itaipu AC; Ibiúna (345kV) Itaipu CC e Santo Ângelo e Embu Guaçú (440kV). Para simular todas essas entradas, foram colocados quatro geradores síncronos de forma a representar essas potências e as respectivas inércias nesses pontos. Essas máquinas são equivalentes e portanto não foram analisadas.

6.2.6 – Regulador de Tensão

Os reguladores de tensão, (AVR's), do PSAT são dispositivos que definem a regulação primária da tensão da máquina síncrona. Seus parâmetros básicos são os valores de tensão máxima e mínima e as constantes de tempo e são divididos em três tipos:

- AVR tipo I é uma versão simplificada do padrão IEEE de excitador dc.
- AVR tipo II é um modelo representado por uma excitatriz estática típica que se caracteriza por ganhos mais elevados e uma resposta mais rápida do que a excitação dc anterior.

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

- AVR tipo III é o modelo mais simples AVR que pode ser usado para avaliações de estabilidade simplificado.

Para este estudo, o AVR tipo I foi utilizado nas máquinas de Henry Borden externa e Pedreira. Para as demais máquinas, foi utilizado o AVR tipo III.

Essa opção por reguladores tipo I para um conjunto de máquinas e o tipo III para outro conjunto se deu em função da proximidade de funcionalidade dos reguladores com os modelos oferecidos. Vale lembrar que praticamente todas as máquinas presentes neste estudo são muito antigas e ainda possuem seus sistemas originais.

A aquisição de dados dos sistemas de regulação também foi muito complicada, pois a maioria dos sistemas já não possui manuais, ou possuem bem pouca informação e em um formato diferente. Para solucionar esses problemas foi adotado o mesmo procedimento na obtenção dos dados de máquinas.

A Usina Elevatória de Pedreira foi um caso a parte na obtenção desses dados. Como essas máquinas são dedicadas ao bombeamento das águas do Canal Pinheiros, elas funcionam apenas como motor e não possuem regulador de tensão. Em seu lugar existe apenas um reostato manual que é ajustado pelo operador quando a unidade esta operando como bomba. Como compensador síncrono, o procedimento é o mesmo.

Para este estudo, foi considerado um regulador tipo I para a Pedreira, pois para uma máquina que opera com um reostato, um simples regulador já seria o bastante. Como esse regulador não existe, seus dados foram obtidos com base nas potências das máquinas pelos mesmos processos já descritos.

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

6.2.7 – Regulador de Velocidade

Os governadores da turbina (TGs), assim chamados, definem o controle de frequência primária de máquinas síncronas. No PSAT os parâmetros básicos são, referência de velocidade, torques máximos e mínimos, estatismo e constantes de tempo e são divididos em dois modelos de reguladores.

- TG tipo I possui um governador, um servo e um bloco de reaquecimento, sendo mais indicado para máquinas térmicas.
- TG tipo II similar ao anterior, mas sem a constante de reaquecimento, sendo mais indicado para máquinas hidráulicas. Esse modelo é tipicamente mais do que adequado para a análise de estabilidade transitória.

Para as unidades térmicas das Usinas de Piratininga e Fernando Gasparian, foram adotados governadores do tipo I. Para as demais, tipo II.

Aqui, também foram adotados os modelos de reguladores de velocidade mais adequados a cada máquina com base nas informações solicitadas por cada tipo de regulador.

A obtenção desses parâmetros foi igualmente difícil como para os reguladores de tensão. Os critérios adotados foram os mesmos anteriores.

Infelizmente bem pouco dessas parametrizações estão disponíveis no ANATEM (programa de análise de transitórios eletromecânicos do CEPEL) ou em outro banco de dados.

6.2.8 – Banco de Capacitores e Indutores

Espalhados em pontos estratégicos do sistema, são responsáveis por auxiliar no suporte do nível de tensão das linhas de transmissão. Seus principais parâmetros são: potência aparente, tensão, frequência e susceptância.

$$Q = B \cdot V^2 \quad (6.1)$$

Onde:

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

Q = Potência Reativa

B = Susceptância

V^2 = Tensão

Para esses equipamentos, como a quantidade de informações disponíveis é bem pequena, a modelagem foi simplificada de forma a atender os requisitos da simulação, mas com a máxima fidelidade sistêmica.

6.2.9 – Carga

Na análise clássica de fluxo de potência, as cargas são: PQ constante ou admitância shunt. Para este estudo o modelo escolhido para as cargas foi o PQ constante.

Cargas PQ são modeladas como potência ativa e reativa constante, enquanto as tensões estiverem dentro dos limites especificados. Se um limite de tensão é violado, as cargas PQ são convertidas em impedâncias constantes.

Na análise de estabilidade transitória, cargas PQ são convertidas para impedância constante após a solução de fluxo de potência.

O modelo de impedância constante é o mais apropriado porque além de representar o sistema com mais fidelidade, facilitam a convergência dos programas de simulação e análise de estabilidade transitória.

Cargas do tipo impedância constante variam sua potência ativa inversamente ao quadrado da frequência, enquanto a potência reativa varia inversamente proporcional à frequência. Isso indica que a potência ativa das cargas é mais sensível às variações de frequência, enquanto a reativa, varia com as oscilações de tensão do sistema.

O levantamento das cargas foi feito através do banco de dados do ANAREDE.

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

6.2.10 – Blocos PV

Os blocos PV são normalmente colocados junto as máquinas ou barras, pois é através deles que as parametrizações de potência são definidas. Sua parametrização é bem simples o que facilita na busca dos dados. Esses blocos junto às máquinas definem os montantes de geração, quando a potência ativa é positiva ou consumo quando é negativa, e é por intermédio deles que o perfil de geração é montado. São identificados por manter fixas a potência ativa P e a tensão V .

6.2.11 – Bloco Slack Bus

O bloco Slack bus funciona como uma barra de folga, sempre que o sistema exigir uma potência para equilibrar o balanço de carga x geração, essa barra irá fornecer. Isso normalmente acontece para uma situação estática, por exemplo, quando rodamos o fluxo de potência. Para a simulação dinâmica, ele não tem efeito.

Sua parametrização é simples e ele deve ser posicionado em um ponto do sistema onde ele não possa afetar a distribuição das cargas x geração.

6.2.12 – Bloco de Frequência

Embora a frequência seja uma das principais grandezas elétricas utilizadas na análise de estudos de estabilidade, o parâmetro não está disponível automaticamente. Para isso é necessário a inserção dos blocos de medição, mas como o PSAT trabalha no domínio da frequência, esses valores podem não ser corretos pois o programa utiliza filtros com base nas variações dos ângulos das tensões na obtenção dos valores de frequência.

6.3 – Descrição Geral do Sistema

Embora o PSAT tenha compensadores síncronos em sua biblioteca, eles não foram utilizados pois durante as contingências, suas tensões permaneciam inalteradas, logo foi

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

necessário a sua substituição por máquinas síncronas. Seus parâmetros foram representados de acordo com as características e dados disponíveis.

A parametrização de todos os blocos do PSAT segue de acordo com a solicitação em cada etapa, onde alguns são solicitados em valores absolutos e outros em PU, por isso, é extremamente importante atentar-se a essas solicitações.

As parametrizações mais complicadas de preencher foram as dos geradores e seus respectivos reguladores, um dos dados obtidos através de literatura foi a inércia (H) de alguns geradores e para esses casos foi utilizada a seguinte equação:

$$H = \frac{K * \omega R^2 * RPM^2 * 10^{-6}}{KVA} \left[\frac{MWs}{MVA} \right] \quad (6.2)$$

Equação para calcular o H da máquina [8]

Onde, K = 0,231 constante

ωR^2 = Momento de inércia do rotor [polegada x pé ao quadrado]

RPM² = Velocidade mecânica em [rotações por minuto]

KVA = Potência Aparente da máquina

Para a utilização do banco de dados do ANAREDE, foi necessário escolher um período de carga e o mês de estudo. O sistema elétrico é dividido basicamente em três períodos de carga, chamados de patamares de carga. Esses períodos ou patamares dividem o dia, 24h, em quatro períodos, assim:

Período de carga Leve, das 00:00 às 07:00;

Período de carga Média, das 07:00 às 17:00,

Período de carga Pesada, das 17:00 às 22:00 e

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

Período de carga Leve, das 22:00 às 24:00.

Esses períodos se repetem e são contabilizados periodicamente, formando os casos mensais, que são disponibilizados pelo ONS. Para as simulações foi considerado o caso do mês de dezembro do ano de 2010 no patamar de carga média, ficando de fora a carga leve e a carga pesada. A carga leve não foi simulada, pois, a Instrução de Operação Normal – IO-ON.SE.3SP do ONS, recomenda que a operação das unidades geradoras reversíveis da Usina Elevatória de Pedreira seja apenas nos períodos de carga média e pesada, logo, como a usina não opera na carga leve, ele não foi simulado.

O período de carga pesado também não foi simulado, pois durante esse período, todas as máquinas geradoras, compensadores, banco de transformadores, capacitores e indutores e todos os equipamentos disponíveis ao sistema estão conectados, e normalmente a geração de potência ativa esta maximizada. Também durante o período de carga pesada ficam suspensas todas as intervenções de manutenção programadas e preventivas, o que reduz em muito as chances de ocorrência de desligamentos, curto-circuitos e outros eventos. Portanto, a carga pesada é um período onde o sistema elétrico está melhor preparado para o caso de uma contingência, em função da grande quantidade de máquinas e geração disponíveis.

O período de carga média acabou sendo o período mais indicado para o estudo pois tem as características opostas da carga pesada, muitas máquinas e equipamentos em manutenção e redução da potência ativa gerada e maior geração de potência reativa. Por esse motivo, as usinas foram simuladas com sua menor geração de potência ativa possível, menor despacho, ficando assim:

Usina Hidroelétrica de Henry Borden

- 19MW na Unidade Geradora 1;
- 15MW na Unidade Geradora 11;

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

Usina Termoelétrica de Piratininga

- 20MW na Unidade Geradora 1;
- 20MW na Unidade Geradora 2;
- 30MW na Unidade Geradora 3;
- 30MW na Unidade Geradora 4;

Usina Termoelétrica de Fernando Gasparian

- 30MW na Unidade Geradora 31;
- 30MW na Unidade Geradora 32;
- 30MW na Unidade Geradora 41;
- 30MW na Unidade Geradora 42;

Ainda para a área estudada, foram simuladas quatro configurações possíveis de se operar o sistema, onde, de acordo com a contingência e o local onde ocorreu, a configuração mais apropriada foi escolhida.

O caso 1 foi proposto porque é a configuração atual de operação, o caso 3 porque no estudo do fluxo de potência, ele foi o que apresentou os melhores perfis de tensão do sistema e na sequência, os casos 2 e 4 também foram simulados [18].

A seguir serão apresentados os diagramas dos quatro casos estudados.

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

6.3.1 – Caso 1

Linhas de transmissão Henry Borden - Pedreira circuitos nº 1 e 2, abertas na ETU Pedreira (barra 483) e fechadas na ETU Henry Borden (barra 481) de 88kV, Figura 6.1.

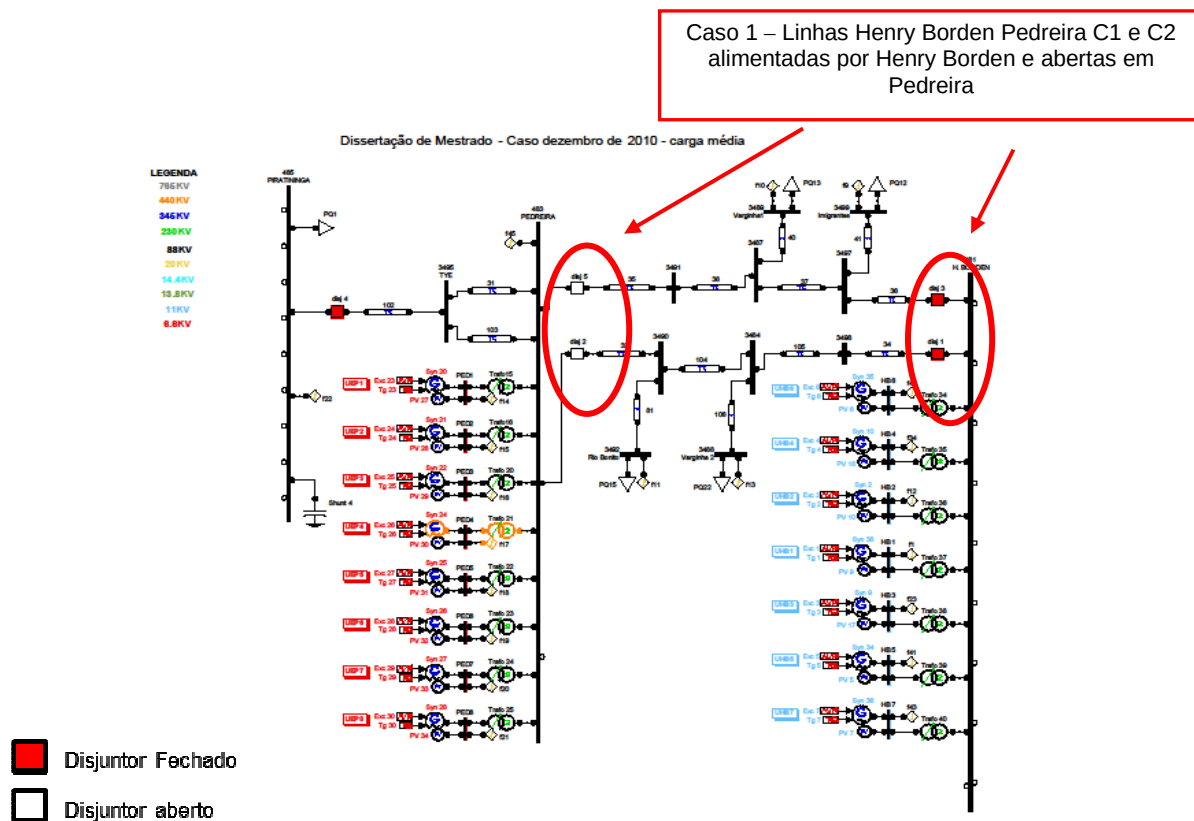


Figura 6.1 – Diagrama de operação das linhas HB-PE 1 e 2 para o caso 1.

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

6.3.2 – Caso 2

Neste caso temos as linhas Henry Borden Pedreira C1 e C2 de 88kV fechadas em Pedreira (barra 483) e fechadas em Henry Borden (barra 481). Para isso, o TYE deve ficar aberto na barra 485. Figura 6.2.

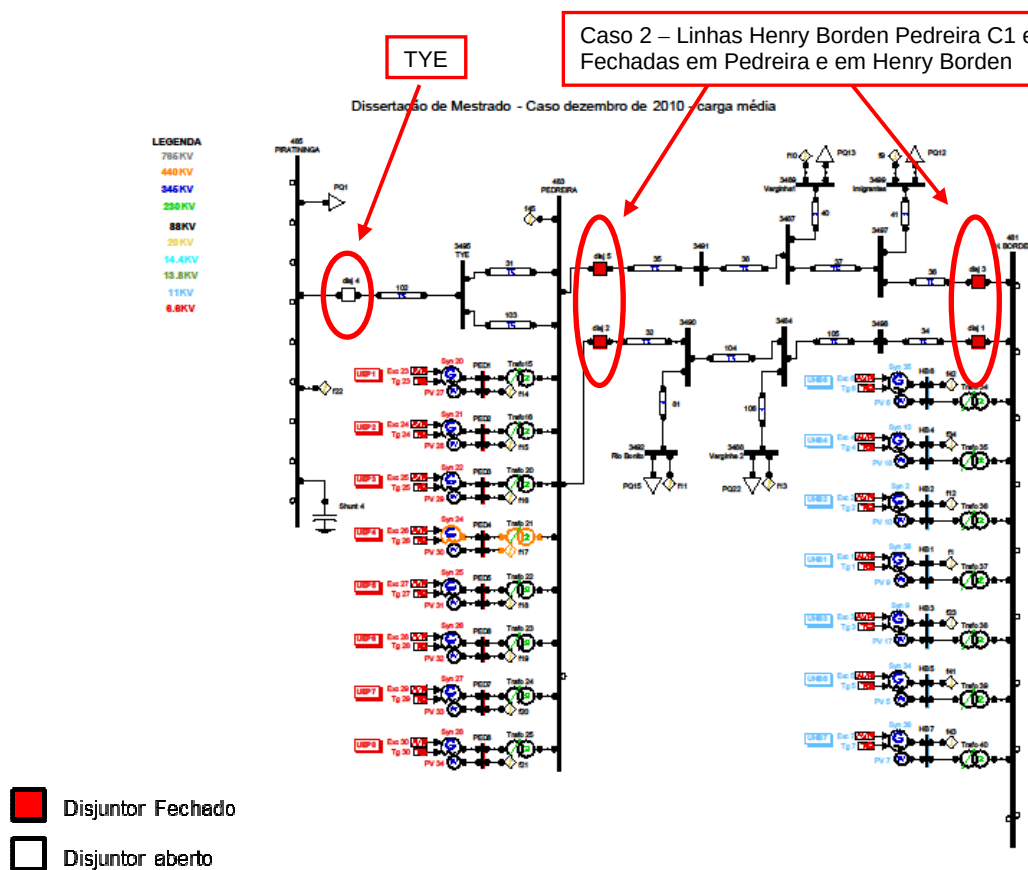


Figura 6.2 – Diagrama de operação das linhas HB-PE 1 e 2 para o caso 2.

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

6.3.3 – Caso 3

Aqui temos as linhas Henry Borden Pedreira C1 e C2 de 88kV fechadas em Pedreira (barra 483) e abertas em Henry Borden (barra 481). Figura 6.3.

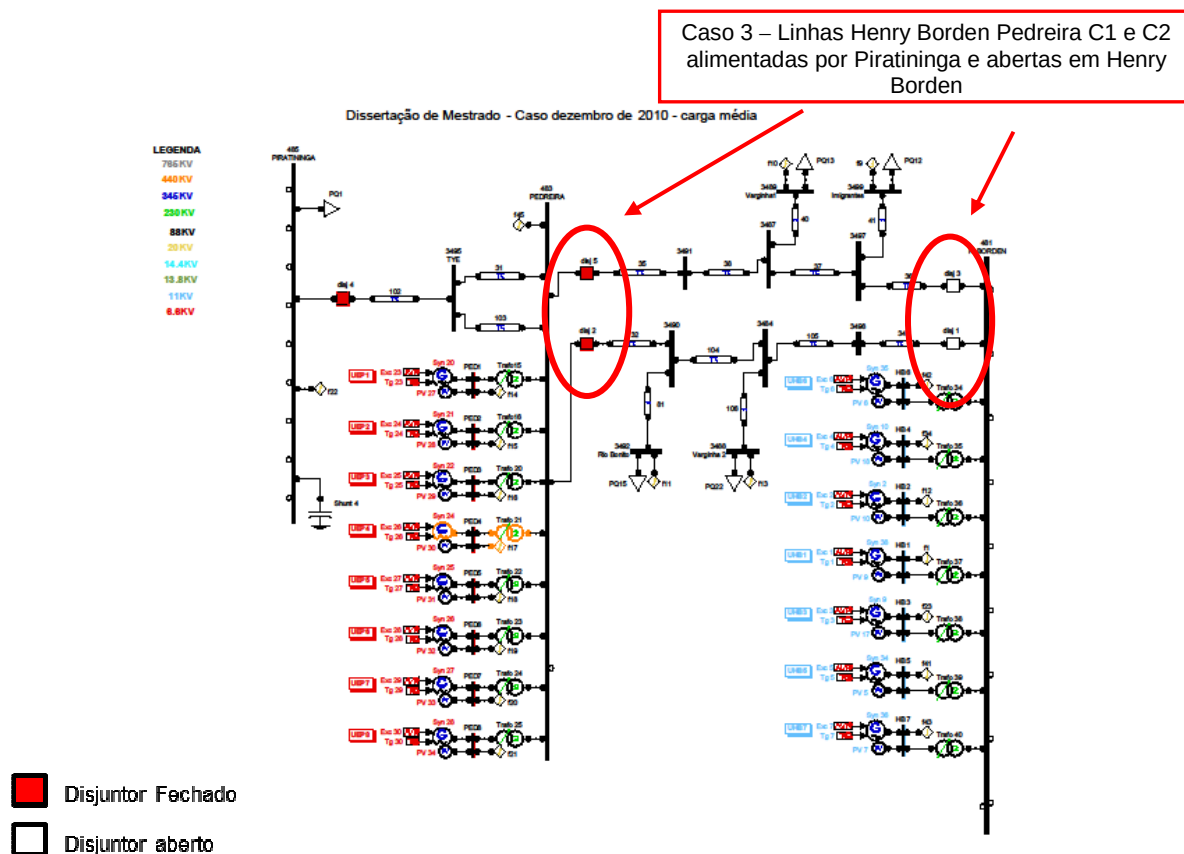


Figura 6.3 – Diagrama de operação das linhas HB-PE 1 e 2 para o caso 3.

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

6.3.4 – Caso 4

Nesta configuração teremos as linhas Henry Borden Pedreira C1 e C2 de 88kV fechadas em Pedreira (barra 483) e fechadas em Henry Borden (barra 481). Nesta configuração, o TYE fica fechado, mas as máquinas de Pedreira ficam divididas em duas, barra 483 Norte e barra 483 Sul, figura 6.4.

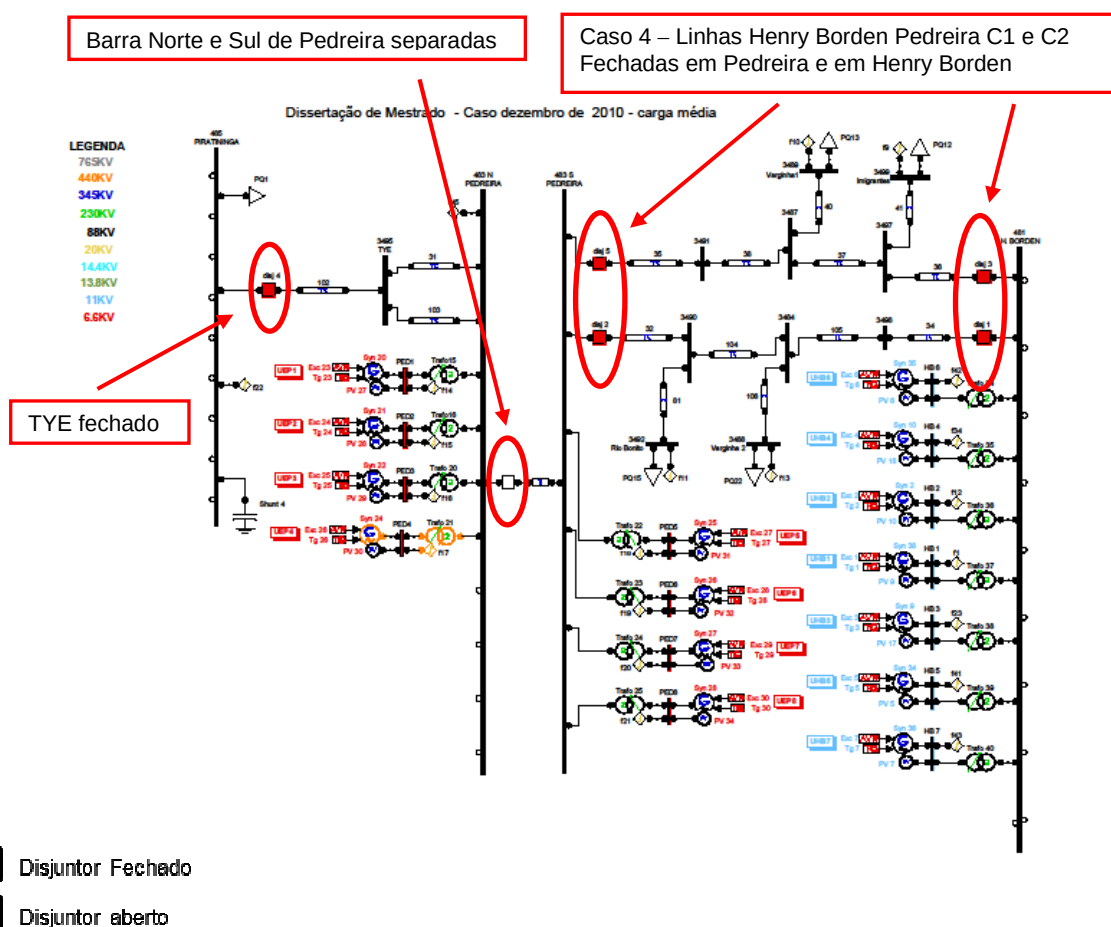


Figura 6.4 – Diagrama de operação das linhas HB-PE 1 e 2 para o caso 4.

Capítulo VI – Simulação Computacional do Sistema

Para as simulações foram rodados inicialmente os fluxos de potência e verificado as possíveis violações existentes, uma vez constatadas, os devidos ajustes eram realizados. Somente a partir dos casos convergidos e sem violações é que as simulações dinâmicas eram realizadas.

O programa foi parametrizado com a frequência de base igual a 60HZ e potência de 100 MVA.

Para os tempos as simulações tiveram uma duração total de 40 segundos, mas os primeiros 20 segundos foram desprezados para demonstrar a estabilidade operacional, pois, durante os testes, logo no início do fluxo dinâmico algumas máquinas oscilavam até encontrar o ponto de operação ideal, estado inicial do sistema. Então os primeiros 20 segundos de simulação foram deixados para que o sistema se acomodasse e todas as contingências foram aplicadas somente depois de transcorrido os 20 segundos iniciais. Assim os períodos analisados foram os 20 segundos restantes, e as oscilações iniciais não influenciaram.

O passo de integração utilizado foi de 0,01s, que trouxe bons resultados.

O capítulo VII – Análise dos resultados apresentará todos os dados, resultados e análises dos casos simulados. Serão apresentadas quais contingências foram simuladas e por que.

CAPÍTULO VII

RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

7.1 – Aspectos Gerais

Com o propósito de estudar os efeitos da potência reativa entregue pela Usina Elevatória de Pedreira, foram aplicadas algumas contingências no sistema em estudo, são elas:

- Perda de Linha de Transmissão;
- Perda de Banco de Capacitor;
- Perda de Geração;
- Perda de Carga;
- Curto-Circuito e
- Perda de Banco de Transformador.

A proposta de estudos era realizar ensaios para as cargas Leve, Média e Pesada para a referência de dezembro de 2010 (ONS), e nas 4 configurações abaixo.

- Caso 1 – LT HB-PE fechada em Henry Borden (481), abertas em Pedreira (483) e TYE fechado em Piratininga (485);
- Caso 2 – LT HB-PE fechada em Henry Borden (481) e em Pedreira (483) com o TYE aberto em Piratininga (485);
- Caso 3 – LT HB-PE fechada em Pedreira (483), aberta em Henry Borden (481) e TYE fechado em Piratininga (485) e;
- Caso 4 – LT HB-PE fechada em Henry Borden (481) e em Pedreira Sul (483) com as máquinas 5, 6, 7 e 8.

Capítulo VII – Resultados e Análise dos Resultados Obtidos

As unidades 1, 2 e 3 foram ligadas na barra Norte de Pedreira (483) e fechadas pelo TYE na barra (485) de Piratininga.

A unidade 4 da Usina Elevatória de Pedreira com uma capacidade de (-4,5MVAR à +5,0MVAR), foi mantida desligada durante todas as simulações. Essa máquina é dedicada ao bombeamento e não está autorizada a operar como compensador síncrono.

De acordo com as simulações, eis alguns resultados.

7.2 – Perda da LT HB – PE1 – caso 2

Neste estudo, a simulação feita consiste na perda da linha Henry Borden Pedreira C1 através da abertura e posterior fechamento do disjuntor 5 que fica junto a barra 483 de Pedreira. No caso 2, as linhas HB-PE ficam fechadas em suas extremidades, barra 483 e 481 com o TYE aberto na barra 485.

Para os compensadores síncronos, Ibiúna e T. Preto, que são os mais próximos, a perda da LT praticamente não causou oscilações. A máquina 1 de HB saiu de 5,15° graus (δ) de operação para 6,3° graus (δ), e as demais unidades externa e subterrânea, tiveram oscilações máximas de 0,4° graus (δ). A presença dos reativos de Pedreira contribuiu para atenuar essas oscilações. As unidades térmicas permaneceram inalteradas.

Para as unidades de Henry Borden, as variações com e sem Pedreira são muito próximas e não haveria desligamentos dessas unidades.

Já para as tensões das barras do entorno, a barra 483 de Pedreira é a que mais sofre, com um afundamento de até 0,88(pu), Figura 7.1.

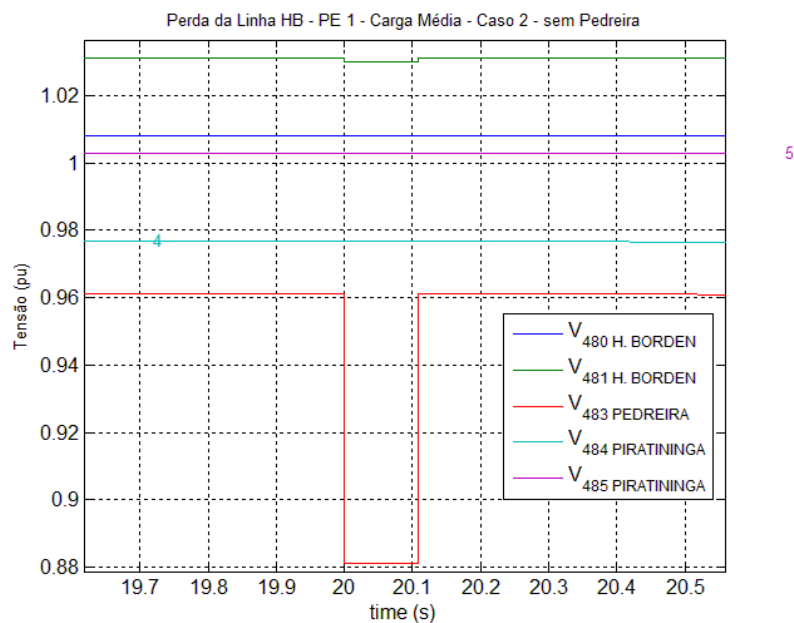


Figura 7.1 tensões nas barras do entorno sem o reativo de Pedreira.

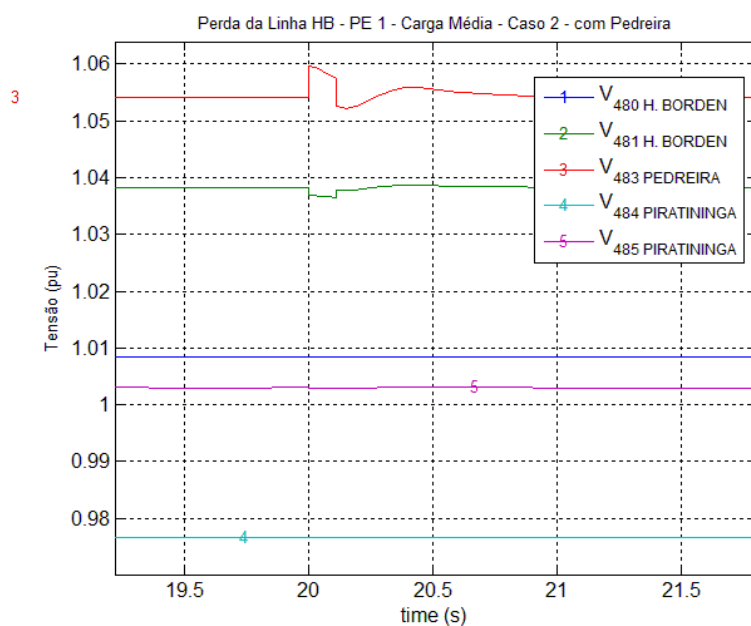


Figura 7.2 tensões nas barras do entorno com o reativo de Pedreira.

Capítulo VII – Resultados e Análise dos Resultados Obtidos

Já com os reativos de Pedreira, além da tensão inicial ser maior, 1,055(pu) contra 0,96(pu), quando há a perda da linha, a tensão da barra sobe para 1,06(pu), Figura 7.2.

Isso acontece porque os reativos de Pedreira que estavam alimentando as cargas da linha desligada, agora permaneceram na barra 483 de Pedreira, elevando a tensão, e logo que a linha é reestabelecida, retorna ao patamar normal de operação.

As cargas da linha Pedreira 2 também acompanham a mesma avaliação, saindo de valores iniciais da ordem de 0,96(pu) à 0,98(pu), para 1,04(pu) à 1,05(pu), com Pedreira, Figuras 7.3 e 7.4.

Para as máquinas de Henry Borden, os reativos de Pedreira contribuem para uma ligeira queda das suas tensões, de 0,9992(pu) para 0,9986(pu), mas mesmo esses valores não são suficientes para operar desligamentos dessas unidades.

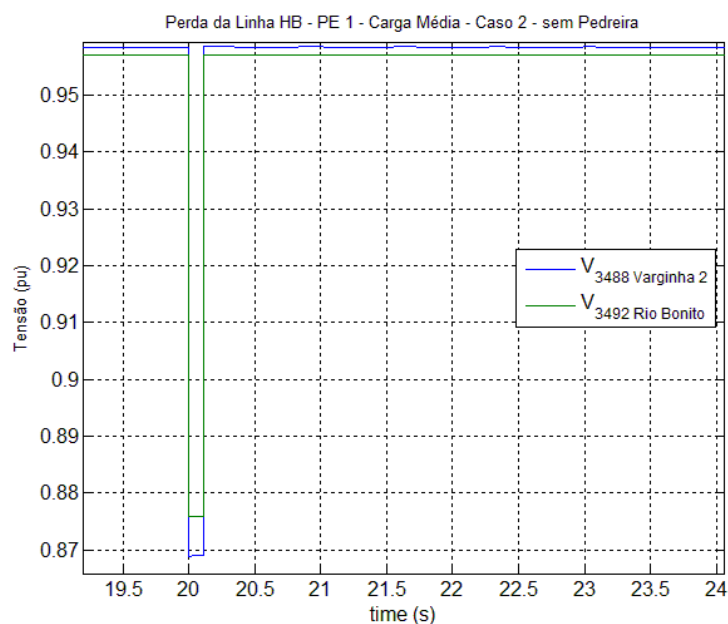


Figura 7.3 tensões nas cargas da linha HB-Pedreira C2 sem o reativo de Pedreira.

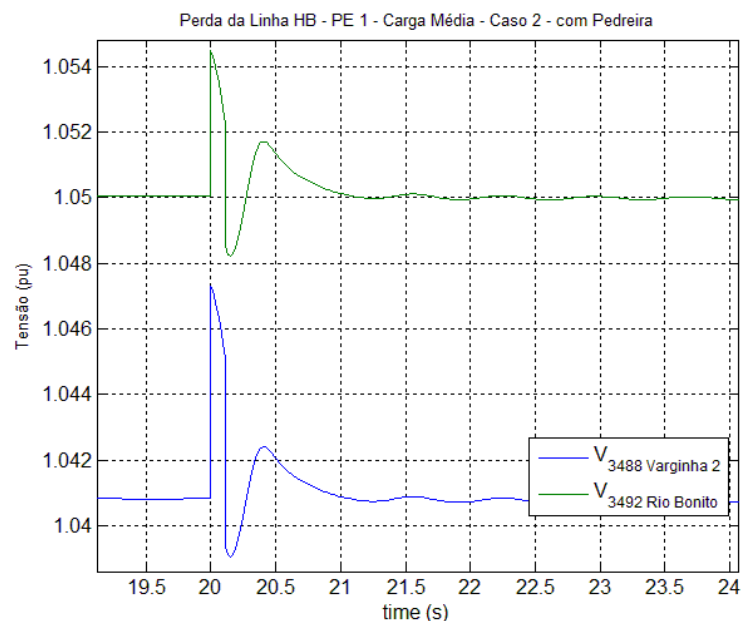


Figura 7.4 tensões nas cargas da linha HB-Pedreira C2 com o reativo de Pedreira.

7.3 – Perda da LT HB – PE1 – caso 4

Simulando também a perda da linha Henry Borden Pedreira C1 através da abertura e posterior fechamento do disjuntor 5 que fica junto a barra 483 de Pedreira. Agora Pedreira foi dividida em duas, barra 483 norte e 483 sul.

Para o caso 4, as linhas HB-PE ficam fechadas na barra 483 sul e 481 com as unidades 5, 6, 7 e 8. A barra 483 norte ficou ligada à barra 485 através do TYE e com as unidades 1, 2 e 3. A máquina 4 não gera reativos.

Para o caso 4 nos compensadores síncronos de Ibiúna e T. Preto, que são os mais próximos, a perda da LT praticamente não causou oscilações. A máquina 1 de HB saiu de 5,15° graus (δ) de operação para 5,9° graus (δ), e as demais unidades externa e subterrânea, tiveram oscilações máximas de 0,4° graus (δ).

A presença dos reativos de Pedreira contribuiu para atenuar essas oscilações.

As máquinas térmicas 1 e 2 tiveram os ângulos aumentados pois passaram a gerar

Capítulo VII – Resultados e Análise dos Resultados Obtidos

menos potência reativa indutiva. As unidades 41 e 42, também tiveram seus ângulos aumentados pois passaram a gerar mais potência reativa capacitiva, mas todos os valores estão dentro de patamares estáveis.

Observando as tensões das barras do entorno, a barra 483 sul de Pedreira é a que mais sofre com um afundamento de até 0,88(pu). Já com os reativos de Pedreira, além da tensão inicial ser maior, 0,96(pu) contra 1,022(pu), quando há a perda linha, a tensão da barra cai para 1,01(pu), Figura 7.5 e 7.6.

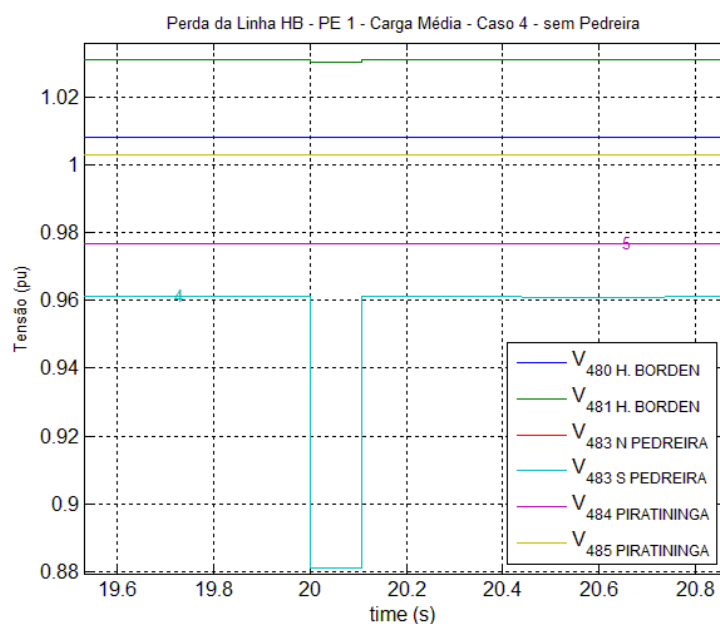


Figura 7.5 tensões nas barras do entorno sem o reativo de Pedreira.

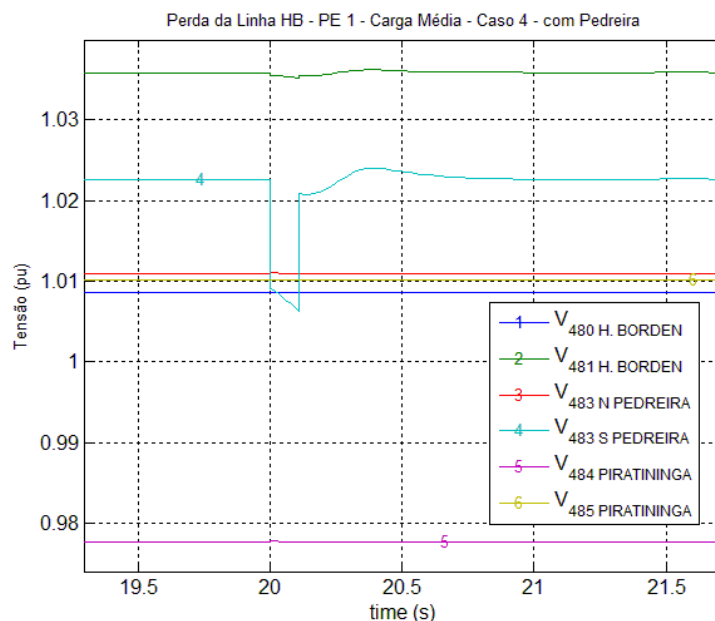


Figura 7.6 tensões nas barras do entorno com o reativo de Pedreira.

Isso acontece porque os reativos de Pedreira que estavam alimentando as cargas da linha desligada, agora permaneceram na barra sul de Pedreira, tentando elevar a tensão, logo que a linha é reestabelecida, a tensão retorna ao patamar normal de operação.

As cargas das linhas também acompanham a mesma avaliação, além da elevação da tensão inicial, durante o evento os afundamentos de tensão são menores. Também é possível observar que o retorno da tensão ao patamar operacional se dá de uma forma mais suave com a presença das potências reativas de Pedreira.

Para essas cargas, para o caso com os reativos de Pedreira, possivelmente, não haveria desligamentos, já para a simulação sem esses reativos, possivelmente haveria, Figuras 7.7 e 7.8.

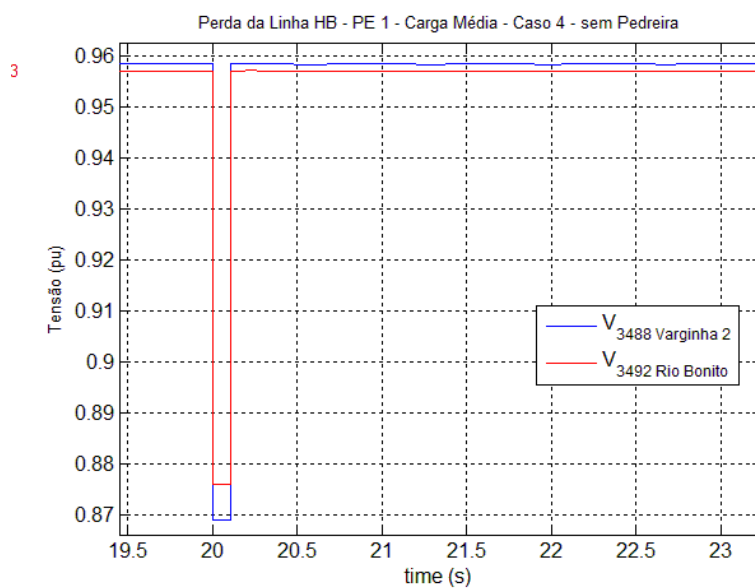


Figura 7.7 tensões nas cargas das linhas HB PE C2 sem o reativo de Pedreira.

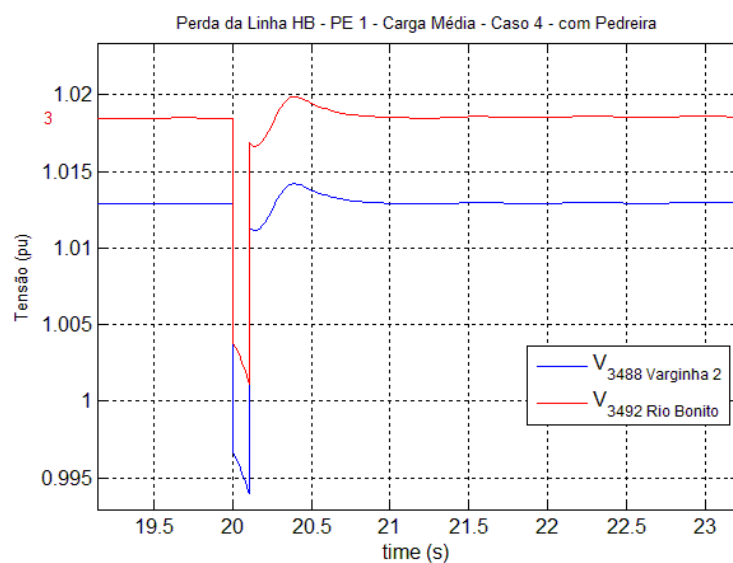


Figura 7.8 tensões nas cargas das linhas HB PE C2 com o reativo de Pedreira.

Para as máquinas de Henry Borden, os reativos de Pedreira contribuem para um melhor perfil na variação da potência ativa evidenciando também o amortecimento das máquinas, Figuras 7.9 e 7.10.

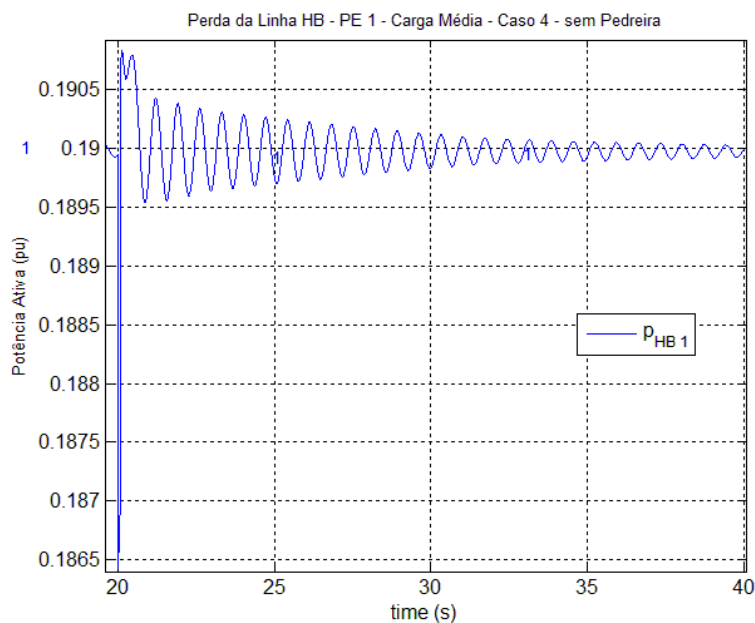


Figura 7.9 potência ativa da unidade 1 de Henry Borden sem o reativo de Pedreira.

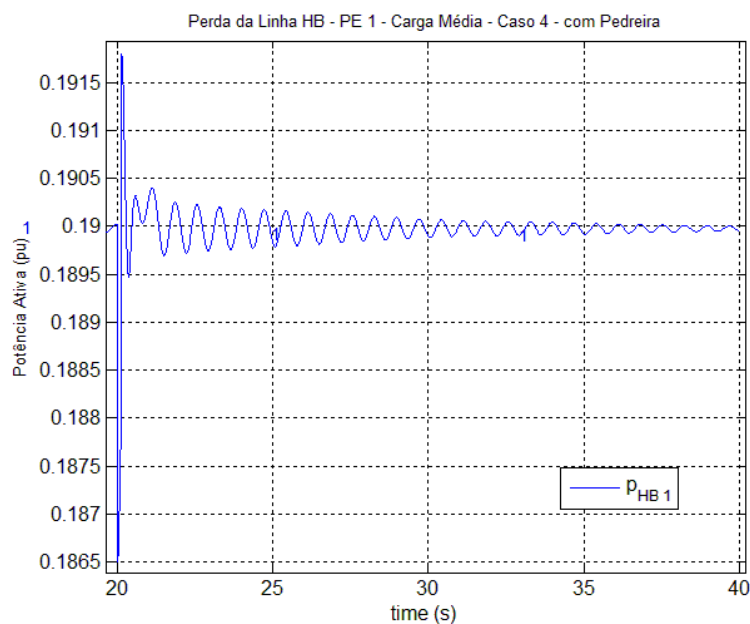


Figura 7.10 potência ativa da unidade 1 de Henry Borden com o reativo de Pedreira.

As máquinas de Henry Borden, também apresentaram melhores perfis para as variações das potências reativas.

7.4 – Perda do Banco de Capacitores da Barra 485 – caso 3

Este caso simulou a perda do banco de capacitores de 28,8MVAr que fica localizado junto a barra 485. Para isso, foi simulado um desligamento indevido, seguido de um religamento automático. O caso escolhido foi o 3, onde as linhas HB-PE ficam fechadas na barra 483, com o TYE fechado na barra 485 e abertas na barra 481.

Comparando os compensadores síncronos, Ibiúna T. Preto, E. Guaçu e Sto. Ângelo, a perda do banco de capacitores da barra 485 provocou oscilações de ângulo em torno de 0,1° graus (δ). As unidades 1 e 2 de Piratininga tiveram um aumento de 1,18° graus (δ) sobre os 0,54° graus (δ) iniciais de operação e Fernando Gasparian 41 e 42, um aumento de 2,77° graus (δ) sobre os 12,22° graus (δ) iniciais de operação.

Para as barras do entorno, e as cargas das linhas Henry Borden Pedreira 1 e 2, a presença dos reativos de Pedreira contribuíram para minimizar o afundamento de tensão durante o evento e também elevar a tensão inicial para valores acima de 1(pu).

Embora para essa contingência os resultados sejam bem discretos, eles existem e mostram que a presença das potências reativas das unidades de Pedreira contribuem de forma positiva.

7.5 – Perda do Gerador 31 de Fernando Gasparian – caso 3

Aqui foi considerado a perda do gerador 31 de Fernando Gasparian localizado na barra 484. Para isso, foi simulando um desligamento indevido do disjuntor da unidade sem o seu retorno, pois geradores não operam com sistemas de religamento automático.

O caso escolhido foi o 3, onde as linhas HB-PE ficam fechadas na barra 483 e abertas na 481 com o TYE fechado na barra 485.

Para essa configuração não foi observada nenhuma variação significativa no ângulo

Capítulo VII – Resultados e Análise dos Resultados Obtidos

(δ) das unidades de Henry Borden, pois, a unidade 31 de Fernando Gasparian está muito distante eletricamente da usina.

Para as unidades térmicas 1 e 2 de Piratininga, o ângulo (δ) ficou por volta de $0,55^\circ$, as unidades 41 e 42 de Fernando Gasparian, que também ficam na barra de 88kV, apresentaram ângulos em torno de $12,2^\circ$. Isso acontece porque as impedâncias das máquinas e dos transformadores são diferentes, assim como a relação de transformação, e isso implica em uma divisão diferente de reativos. Como a unidade 31 está no 230kV, a transformação do banco de Piratininga atenua esse balanço.

As unidades 3 e 4 de Piratininga e 32 de Fernando Gasparian, todas do barramento de 230kV, sofreram oscilações em seus ângulos em torno de $13,65^\circ$ e $17,55^\circ$ respectivamente.

Com a presença do reativo de Pedreira, as máquinas térmicas, conectadas a barra de 88kV tiveram seus ângulos aumentados. As unidades PI 1 e 2 que estavam gerando 30,53MVAR cada, passaram a gerar 50% menos, passando a fornecer 15,13MVAR e tendo seus ângulos alterados para $1,86^\circ$ graus (δ).

As unidades de FG 41 e 42 que estavam gerando 6,41MVAR, passaram a absorver potência reativa de -5,95MVAR, com um ângulo de $15,32^\circ$ graus (δ), passando de gerador indutivo para capacitivo.

Mesmo nessas condições as unidades permaneceram estabilizadas e dentro de valores aceitáveis. A perda da unidade térmica nº 31 em si, não provoca grandes modificações nos fluxos de reativo, tão pouco, perturbações significativas no sistema ou nas unidades.

As tensões das barras do entorno da Pedreira, 483 e 485, tiveram seu perfil de tensão elevado para valores acima de 1(pu), as demais permaneceram inalteradas, Figuras 7.11 e 7.12.

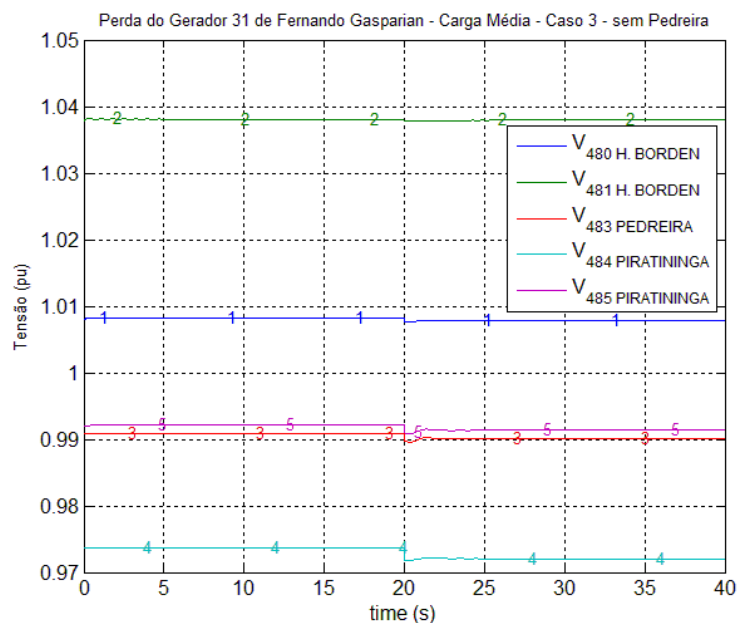


Figura 7.11 tensão das barras do entorno sem o reativo de Pedreira.

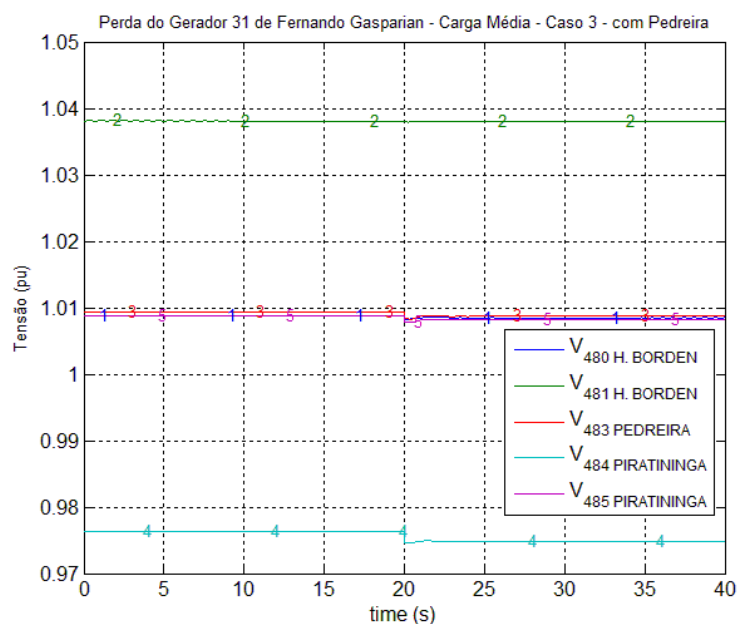


Figura 7.12 tensão das barras do entorno com o reativo de Pedreira.

Para as tensões nas cargas das linhas Henry Borden Pedreira 1 e 2 de 88kV, a tensão inicial ficou melhor com a geração da potência reativa de Pedreira, Figuras 7.13 e 7.14.

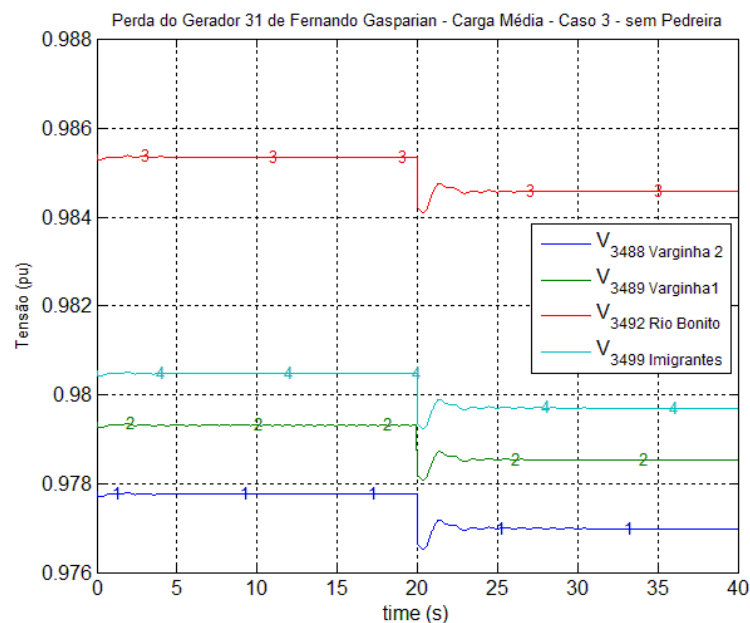


Figura 7.13 tensão das cargas das linhas HB PE sem o reativo de Pedreira.

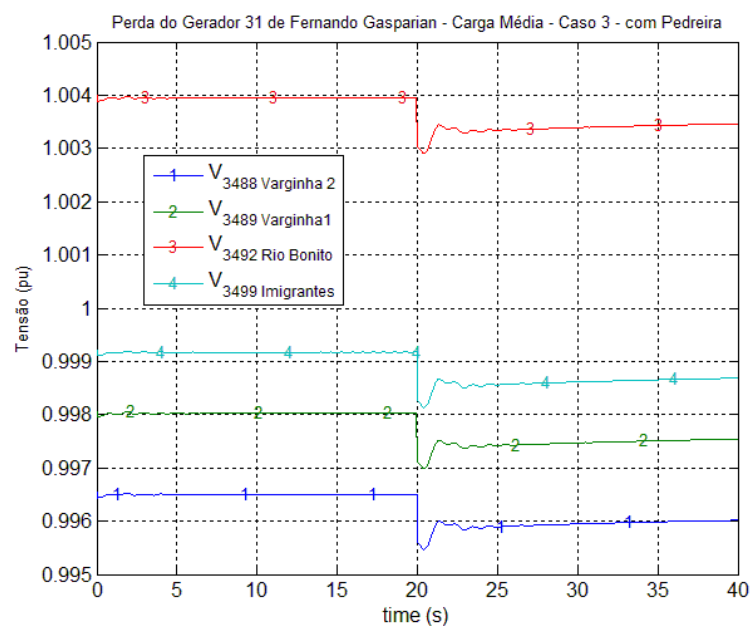


Figura 7.14 tensão das cargas das linhas HB PE com o reativo de Pedreira.

As unidades térmicas apresentaram uma atenuação nas tensões. Embora sutil, é importante destacar isso como mais um benefício dos reativos de Pedreira. Para as cargas das linhas Henry Borden Pedreira alimentadas por Piratininga, apenas as máquinas térmicas do

Capítulo VII – Resultados e Análise dos Resultados Obtidos

88kV tiveram maiores oscilações de ângulos de máquinas (δ) e fluxos de potência reativa, mas em todos os casos as variações foram sutis. A perda da unidade 31 de Fernando Gasparian, não provocou perturbação suficiente para deixar as máquinas ou o sistema instável, e a presença dos reativos de Pedreira deixou melhor o perfil de tensão das cargas e das barras do entorno.

7.6 – Perda do Gerador 1 de Henry Borden – caso 4

Neste teste, foi considerado a perda do gerador 1 de Henry Borden que fica conectado na barra 481. Foi simulado um desligamento indevido do disjuntor da unidade sem o seu retorno, pois esses disjuntores não operam com sistemas de religamento automático.

O caso escolhido foi o 4, onde as linhas HB-PE ficam fechadas na barra 483 sul e na 481, com as unidades 5, 6, 7 e 8 de Pedreira. A barra 483 norte ficou com as unidades 1, 2 e 3 e conectadas a barra 485 através do TYE.

Para os compensadores síncronos, Ibiúna, T. Preto, E. Guaçú e Sto. Ângelo, a perda do gerador 1 de HB causou oscilações em seus ângulos, mas nenhum tendeu a instabilidade.

As unidades 41 e 42 são as únicas que modificam seus estados iniciais de operação, passando de 17,28° graus (δ), para 18,74° graus (δ) em função da adição das 3 máquinas de Pedreira. Pode-se dizer que em termos de variação dos ângulos de máquina, a perda do gerador 1 de HB não acarreta grandes variações ou maiores problemas.

Os ângulos das máquinas de Henry Borden externa sofreram as oscilações com a perda da unidade geradora 1, mas graças aos reativos de Pedreira, essas oscilações são amortecidas e retornam ao patamar inicial, Figuras 7.15 e 7.16.

As unidades tiveram seus perfis de tensão melhorados com a presença dos reativos de Pedreira, mas as variações são de pouca intensidade, da ordem de 0,0025(pu).

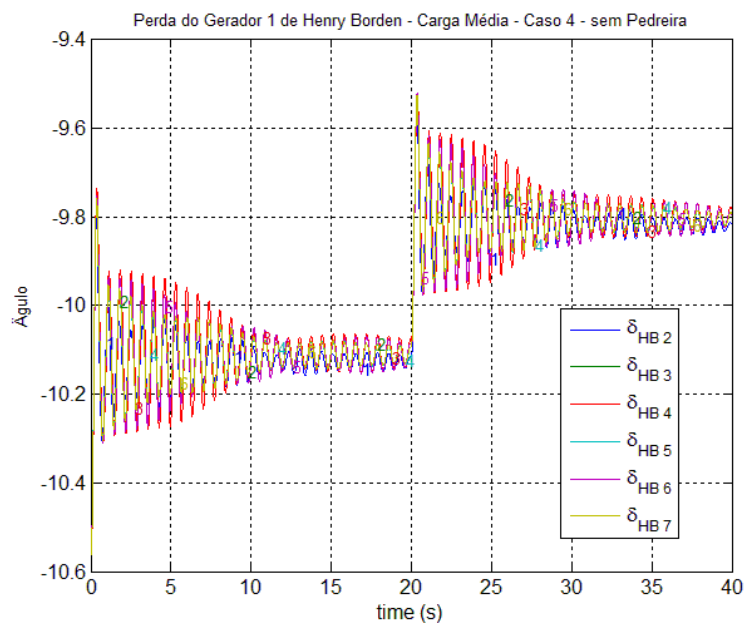


Figura 7.15 ângulo (δ) das unidades de H. Borden externa sem o reativo de Pedreira.

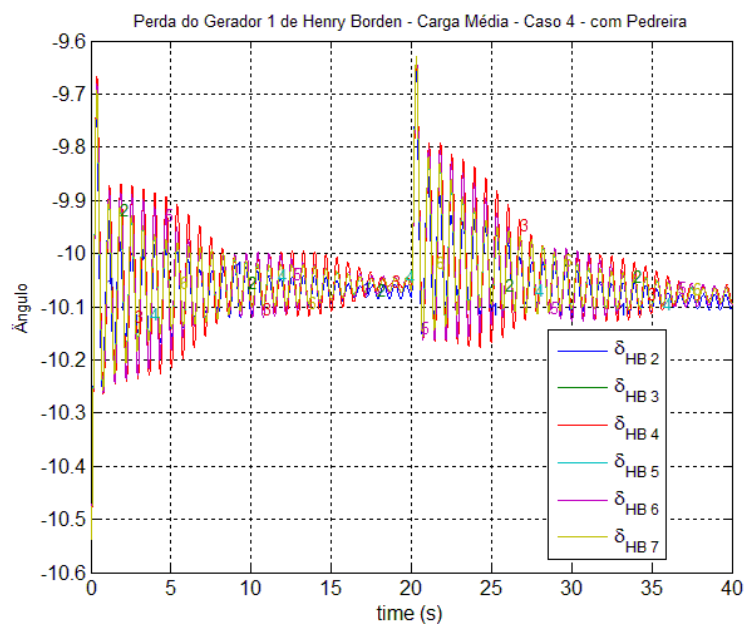


Figura 7.16 ângulo (δ) das unidades de H. Borden externa com o reativo de Pedreira.

A máquina 11 tem suas oscilações atenuadas também graças aos reativos de Pedreira, Figuras 7.17 e 7.18.

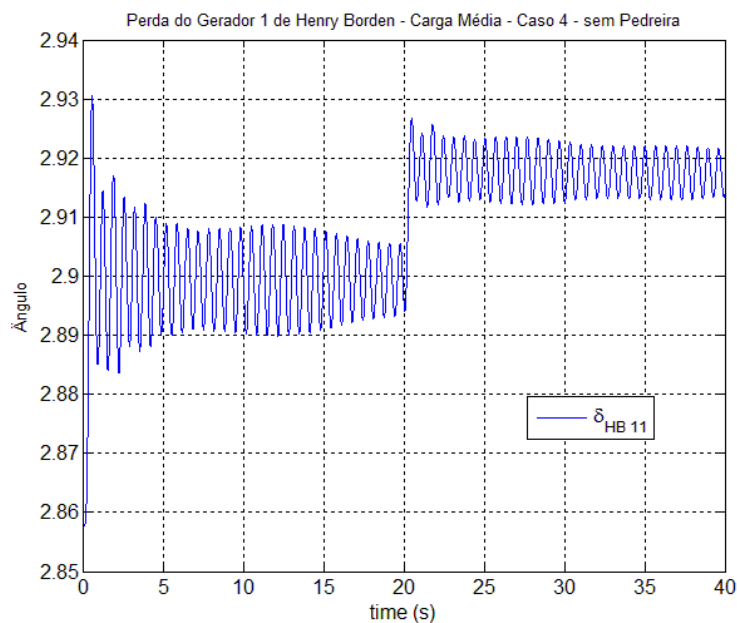


Figura 7.17 ângulo (δ) da unidade 11 de Henry Borden sem o reativo de Pedreira.

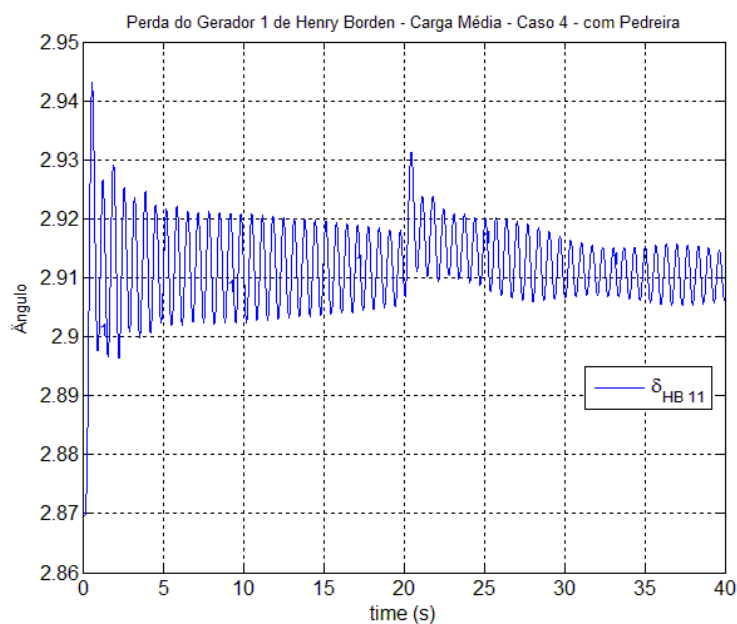


Figura 7.18 ângulo (δ) da unidade 11 de Henry Borden com o reativo de Pedreira.

As tensões nas barras do entorno tiveram uma melhora considerável tanto no valor inicial da tensão como durante a perturbação, Figuras 7.19 e 7.20.

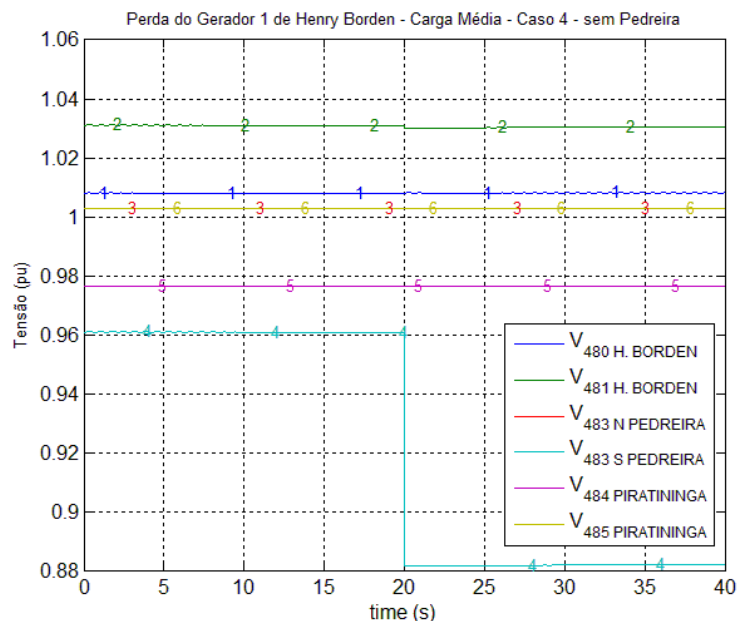


Figura 7.19 tensão das barras do entorno sem o reativo de Pedreira.

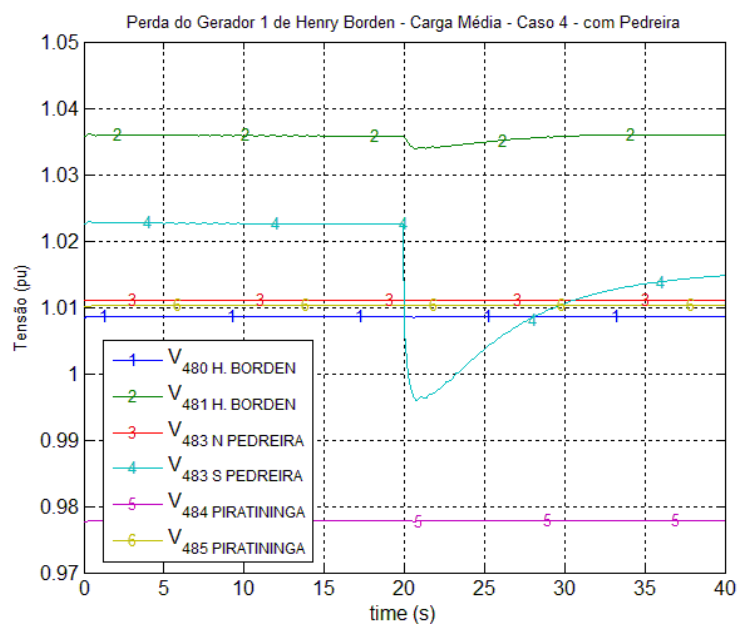


Figura 7.20 tensão das barras do entorno com o reativo de Pedreira.

Para as cargas da linha HB PE, os reativos de Pedreira reduziram o afundamento e auxiliaram na rápida recuperação desses patamares de tensão, Figuras 7.21 e 7.22.

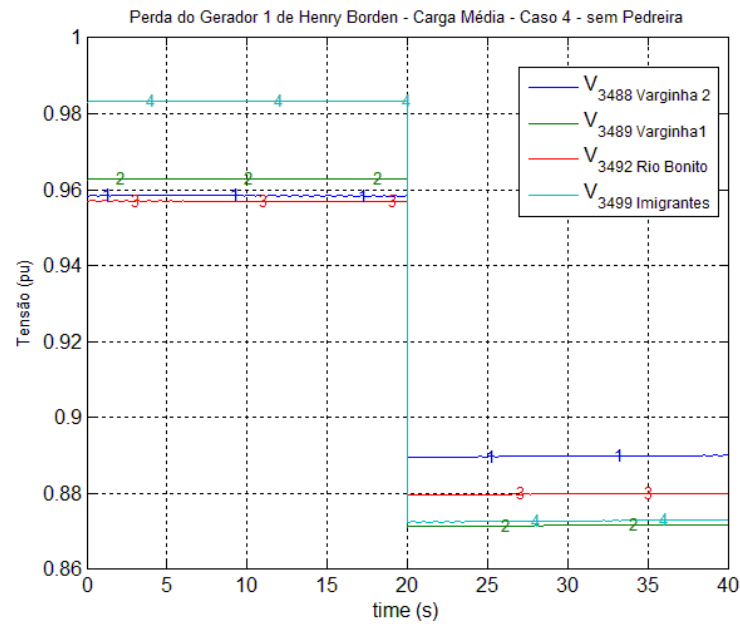


Figura 7.21 tensão das cargas do entorno sem o reativo de Pedreira.

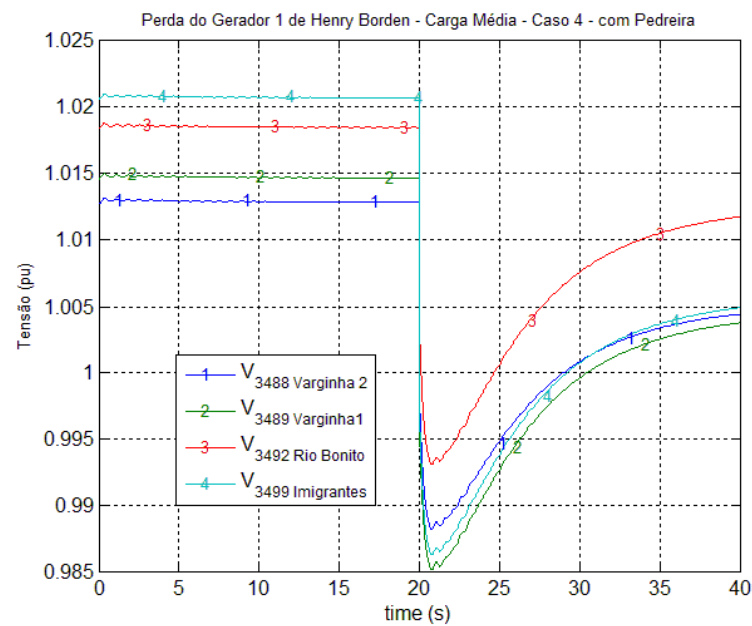


Figura 7.22 tensão das cargas do entorno com o reativo de Pedreira.

Capítulo VII – Resultados e Análise dos Resultados Obtidos

7.7 – Perda da Carga da Barra 485 – caso 3

Simulando agora a perda da carga da barra 485 para o caso 3, temos as linhas Henry Borden Pedreira fechadas na barra 483 e abertas na 481 e o disjuntor 4 do TYE fechando a barra 483 a barra 485. Foi simulado a abertura e posterior fechamento do disjuntor que alimenta essa carga.

Para as máquinas de Henry Borden que estavam gerando potência ativa, unidades 1 e 11 e todas as outras que estavam gerando potências reativas, os ângulos dessas máquinas permaneceram os mesmos com ou sem o reativo da Pedreira, pois estão muito distantes eletricamente.

Para as máquinas térmicas, as unidades ligadas a barra de 88kV, foram as mais afetadas. As unidades 1 e 2 de Piratininga, com um ângulo de $0,25^\circ$ (δ), geravam 63% da capacidade reativa, com o reativo de Pedreira, o ângulo foi para $1,19^\circ$ (δ), passando para 41%. As unidades 41 e 42 de Fernando Gasparian, passaram de $10,3^\circ$ para $12,7^\circ$ graus (δ), com respectivos 27,1% para 9,5% da potência reativa. Embora os ângulos das máquinas tenham aumentado, o valor final não foi grande o suficiente para concluir que as unidades poderiam ficar instáveis.

Para as unidades 1 e 2, esse aumento foi grande o suficiente para afastá-las do limite inferior, onde a máquina ficaria capacitiva, as demais unidades térmicas não apresentaram diferenças significativas.

Para as unidades térmicas, a presença do reativo de Pedreira modificou os valores de suas potências reativas geradas, Figuras 7.23 e 7.24.

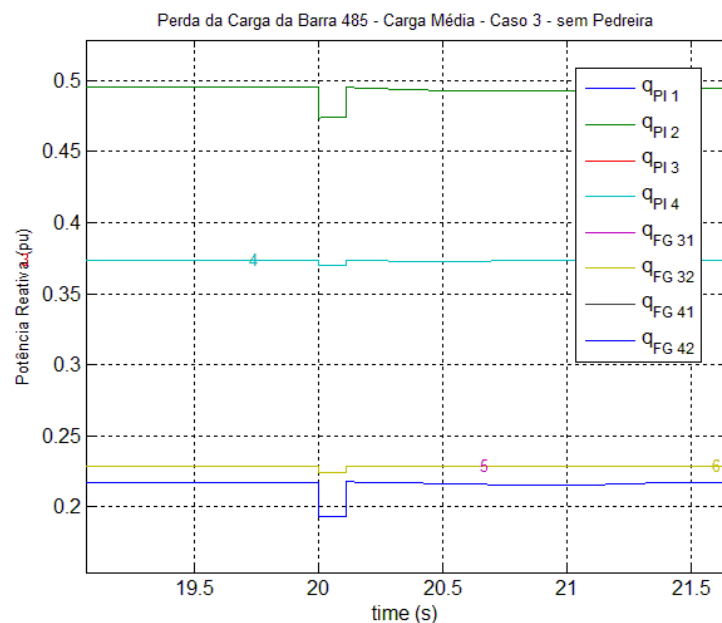


Figura 7.23 potências reativas das unidades térmicas sem o reativo de Pedreira.

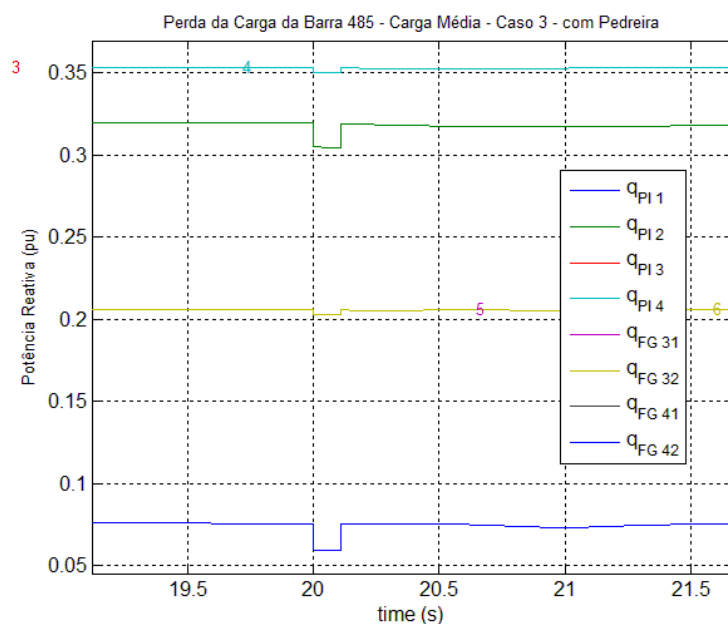


Figura 7.24 potências reativas das unidades térmicas com o reativo de Pedreira.

Para as tensões, as barras das cargas apresentam valores mais próximos de 1(pu) com a presença dos reativos de Pedreira.

Capítulo VII – Resultados e Análise dos Resultados Obtidos

Para as barras do entorno, os melhores perfis de tensão foram para a simulação com a presença do reativo de Pedreira, onde as barras 483 e 485 saíram de 0,97(pu) e foram praticamente para 0,99(pu) e a barra 484 de 0,970(pu) para 0,973(pu).

Para as cargas de Piratininga, as linhas interligadas que suprem essa demanda são Interlagos 345kV e Henry Borden 230kV, logo a perda dessa a carga provoca sobretensão. Para esse caso, a presença dos reativos de Pedreira contribui bem pouco, uma vez que o perfil de tensão é bom, mesmo assim durante a perturbação, os reativos de Pedreira ajudam a diminuir sobretensões.

Para as unidades térmicas, durante a perturbação houve uma elevação das tensões das unidades, mas de pouca intensidade. Para a Pedreira, a perda da carga da barra 485 fez as sobretensões chegarem ao máximo de 1,0015(pu) na unidade 8, valor que não implica em danos à máquina e os ângulos oscilaram variando em média de -9,3° até -8,9°, Figura 7.25.

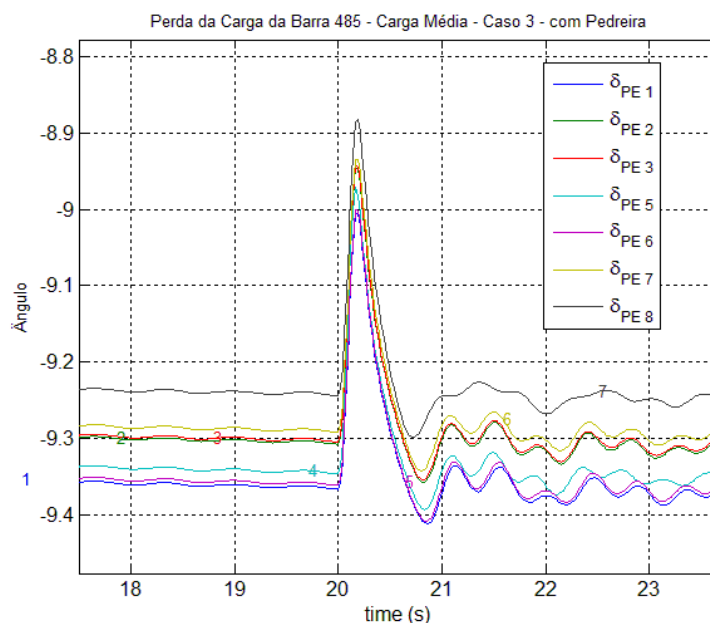


Figura 7.25 ângulo (δ) das unidades de Pedreira.

7.8 – Perda da Carga da Barra 3488 – caso 3

Simulando agora a perda da carga da barra 3488, Varginha 2, para o caso 3, temos as linhas Henry Borden Pedreira fechadas na barra 483 e abertas na 481 e o TYE fechando a barra 483 a barra 485.

Para as máquinas 1 e 11 de Henry Borden que estavam gerando potência ativa e todas as outras que estavam gerando potências reativas, os ângulos dessas máquinas tiveram oscilações similares sem grandes variações, foram mantidos praticamente os mesmos 8,4° graus (δ) para a máquina 1 e 2,7° graus (δ) para a máquina 11.

As máquinas térmicas de 88kV foram as que apresentaram maiores variações. A presença dos reativos de Pedreira modificou o ângulo inicial das unidades 1 e 2 de Piratininga de 0,5541°, para 1,35° graus (δ) e as unidades 41 e 42 de Fernando Gasparian, de 12,22° para 14,07° graus (δ).

Embora os ângulos das máquinas tenham aumentado, e as variações tenham apresentado estabilidade, houve uma inversão do ângulo dessas máquinas, passando de gerador indutivo para capacitivo. Para as máquinas térmicas poderia haver a operação do relé de sequência negativa e desligamento da máquina.

As tensões das cargas apresentam valores mais próximos de 1(pu) com a presença dos reativos de Pedreira, e após as oscilações, retornaram a esses valores. As barras do entorno, apresentaram melhores perfis de tensão para a simulação com a presença do reativo de Pedreira, Figuras 7.26 e 7.27.

As tensões das unidades de Piratininga e Fernando Gasparian 88kV e 230kV apresentaram diferenças pouco expressivas.

Para perda da carga na barra 3488, os reativos de Pedreira colaboram bem pouco.

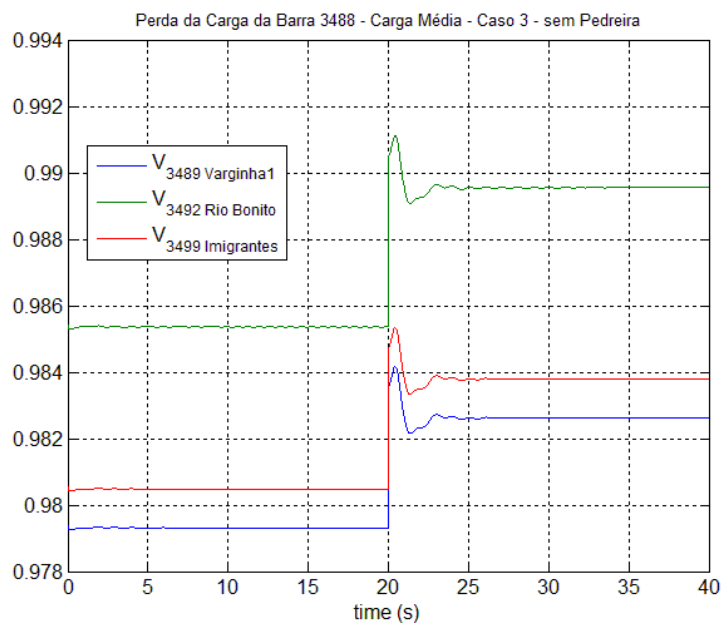


Figura 7.26 tensões nas barras do entorno, sem o reativo de Pedreira.

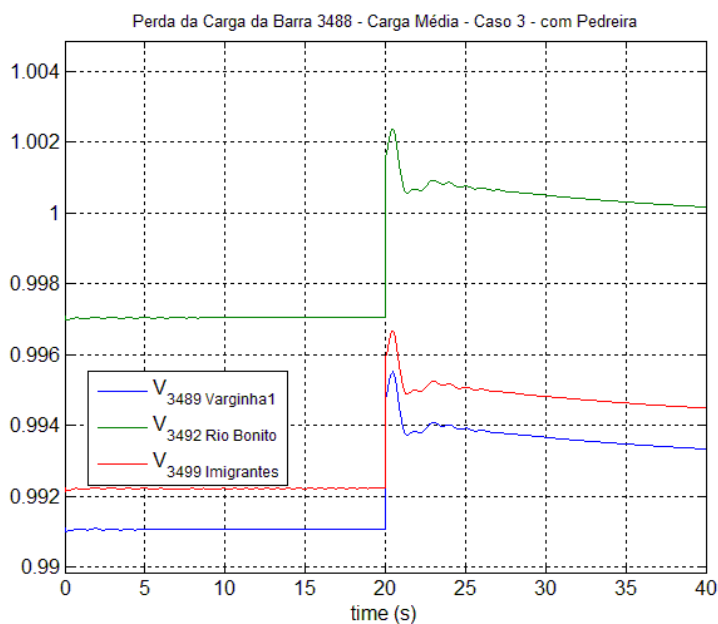


Figura 7.27 tensões nas barras do entorno, com o reativo de Pedreira.

7.9 – Curto-Circuito na Barra 483 – caso 3

Agora o estudo propõe um curto-circuito trifásico na barra 483 para a configuração do caso 3. Nesta simulação temos as linhas Henry Borden Pedreira fechadas na barra 483 e abertas na 481 e o TYE fechando a barra 483 a barra 485. Aqui o curto-circuito aplicado e removido em 108ms, que é o tempo total para a abertura de um disjuntor.

Para os compensadores síncronos, Ibiúna, T. Preto, E. Guaçú e Sto. Ângelo, que estão próximos, o curto-circuito na barra 483 provocou oscilações nos ângulos (δ) das máquinas, mas todas elas, após a perturbação, retornaram a operação, sendo seu comportamento idêntico com ou sem os reativos de Pedreira.

Para as unidades 1 e 11 de Henry Borden, as variações dos ângulos criados pelo curto-circuito não foram tão extensas a ponto das máquinas perderem o sincronismo, a unidade 1 teve uma variação de oscilação em torno de $0,15^\circ$ graus (δ) para mais e para menos, enquanto que a máquina 11 apresentou uma variação de aproximadamente $0,6^\circ$ graus (δ). Para o mesmo caso, a presença dos reativos de Pedreira surte uma leve atenuação nessa variação.

Para as demais unidades, as variações ficaram em torno de 1° graus (δ), o que não é suficiente para provocar perda de estabilidade para máquinas ou para o sistema e os reativos gerados em Pedreira não surtem efeitos.

Para as unidades térmicas, o curto-circuito provoca uma variação brusca dos ângulos (δ) dessas máquinas, neste, ocorreu uma inversão das unidades 1 e 2 de Piratininga, pois seus ângulos (δ), que eram positivos, passaram temporariamente a negativos, passando de geradores indutivos à capacitivos.

A presença dos reativos de Pedreira faz as máquinas térmicas gerarem menos potência reativa e isso eleva seus ângulos de máquina, afastando-os do zero, mas mesmo isso não é suficiente para impedir a inversão, Figuras 7.28 e 7.29.

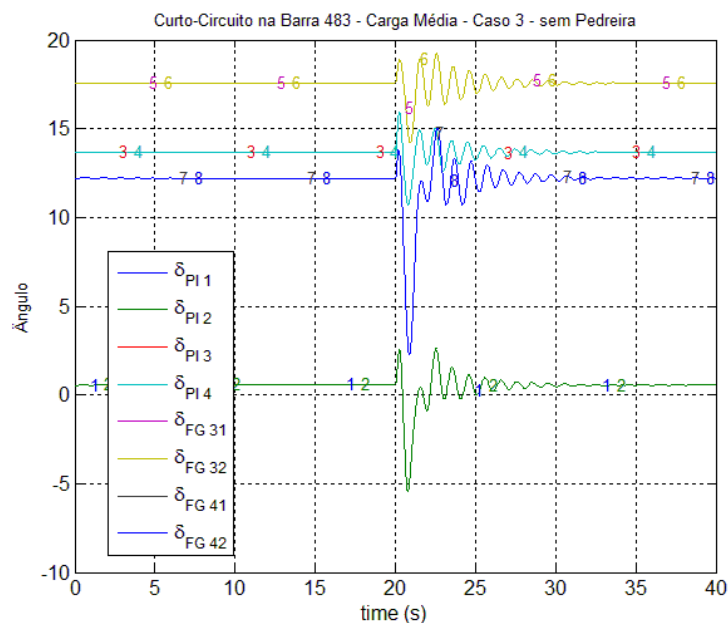


Figura 7.28 ângulo (δ) das unidades térmicas sem o reativo de Pedreira.

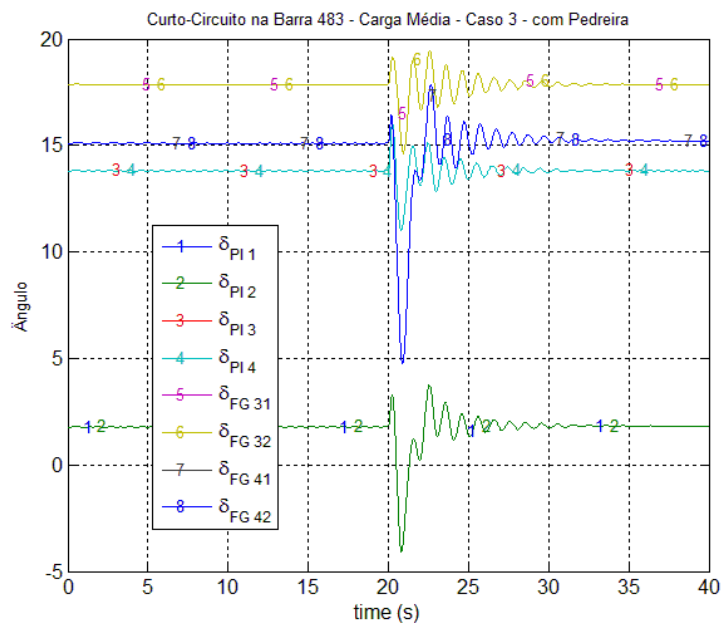


Figura 7.29 ângulo (δ) das unidades térmicas com o reativo de Pedreira.

As unidades térmicas 41 e 42 de Fernando Gasparian que no primeiro caso estavam fornecendo potência reativa, com a presença dos reativos de Pedreira, passaram a consumir, tornando-se geradores capacitivos. Durante o curto-circuito, suas potências reativas ficaram

variando próximas de zero, Figuras 7.30 e 7.31.

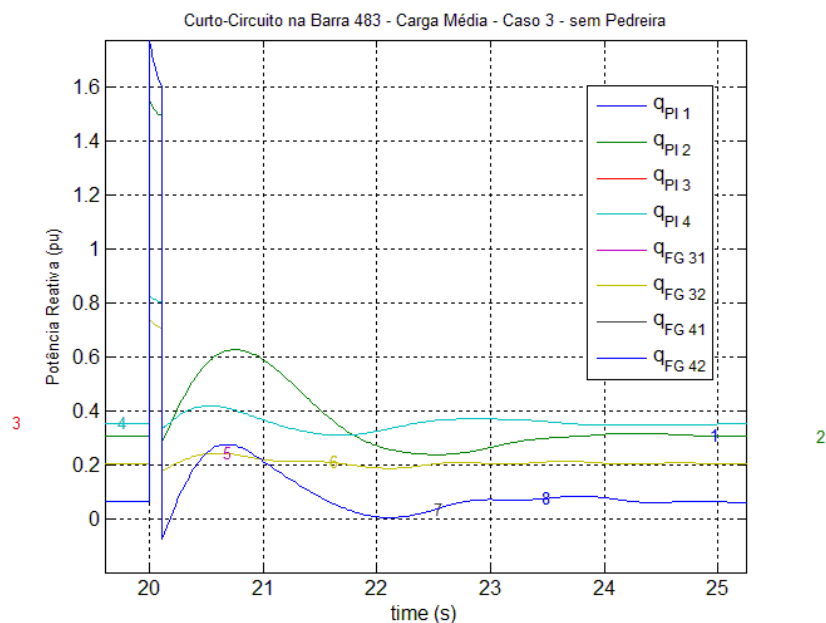


Figura 7.30 potência reativa das máquinas térmicas sem o reativo de Pedreira.

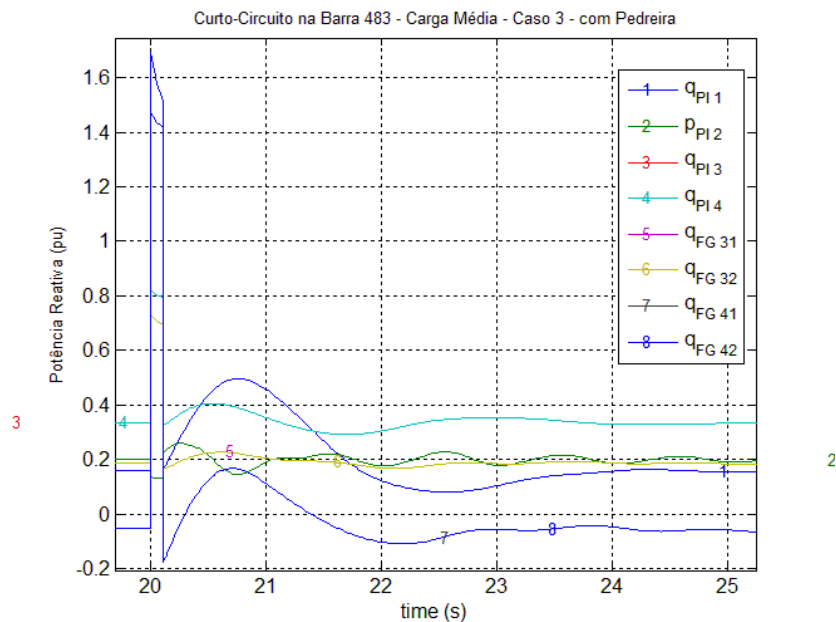


Figura 7.31 potência reativa das máquinas térmicas com o reativo de Pedreira.

Para as tensões das cargas das linhas Henry Borden Pedreira C1 e C2, o afundamento de tensão não é diferente com os reativos de Pedreira, e são aproximadamente da ordem de

0,048(pu), o que certamente desligariam alguns sistemas, Figura 7.32.

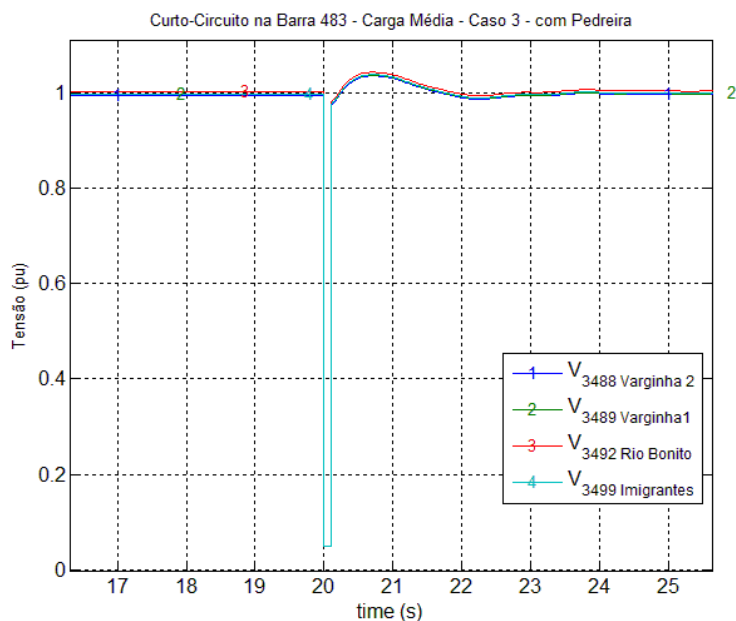


Figura 7.32 tensões nas cargas das linhas HB PE com o reativo de Pedreira.

Para as barras do entorno, as tensões tiveram afundamentos diferentes, e pode-se perceber, que quanto mais distante do evento, maior a atenuação, Figura 7.33.

- Barra 481, 1,026(pu);
- Barra 480, 0,945(pu);
- Barra 484, 0,805(pu);
- Barra 485, 0,1095(pu) e
- Barra 483, 0,0492(pu).

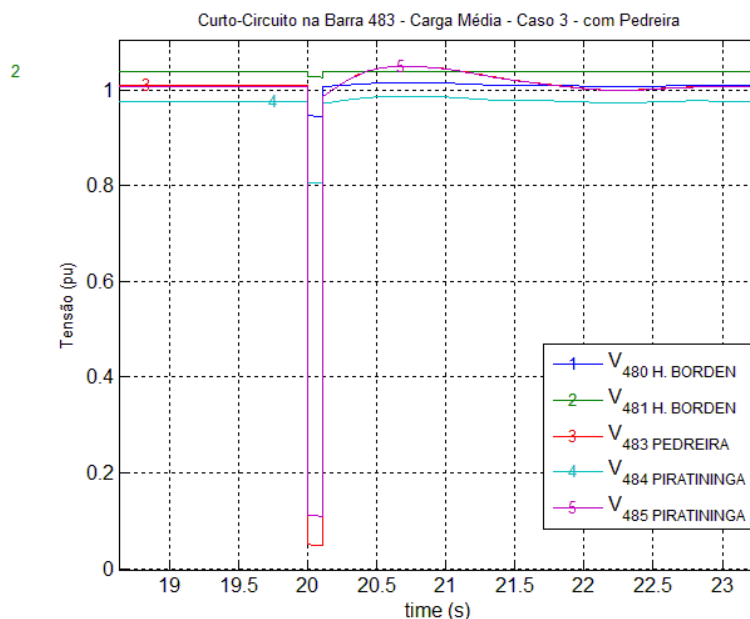


Figura 7.33 tensões nas barras do entorno com o reativo de Pedreira.

Para as unidades hidráulicas de Henry Borden, o afundamento de tensão provocado pelo curto-circuito não apresenta praticamente nenhuma diferença com ou sem os reativos de Pedreira. A máquina que teve o maior afundamento de tensão, foi a máquina 2 de 11kV com 10,55kV e a máquina 8 de 11kV com 10,44kV. Para as unidades térmicas os maiores afundamentos de tensão, foram nas máquinas 1 e 2 de 13,8kV com 6,26kV e a máquina 32 de 13,8kV com 12,53kV.

Como o curto-circuito foi aplicado na própria barra da usina de Pedreira (483), as unidades 2, 3 e 5 apresentaram os maiores afundamentos de tensão, de 6,6kV para 0,61kV, e os ângulos de máquina, embora não tenham invertido, variaram bruscamente. Para essas unidades sua única proteção contra efeitos tão extremos é ser desconectada.

Em termos gerais o que se pode perceber com relação aos reativos gerados por Pedreira, é que em eventos como este, sua contribuição é bem menor se comparado com outras contingências.

7.10 – Perda do TR1 de Piratininga – caso 3

O TR-1 é um dos quatro transformadores de 100MVA que compõe o banco de Piratininga 88/230kV. Para a perda do transformador o caso 3 foi escolhido pois o sistema fica na pior situação que é estar sem um dos transformadores que compõe o banco e ainda estar alimentando as cargas das linhas HB-PE.

Nesta simulação as linhas Henry Borden Pedreira ficam fechadas na barra 483 e abertas na 481 e o TYE fechando a barra 483 à barra 485.

Nesta simulação não foi observado sobrecargas nos outros transformadores, pois há geração na barra de 88kV da Piratininga, além disso, as unidades térmicas 41 e 42 do 88kV elevaram suas gerações de energia reativa, compensando os reativos faltantes. Logo as simulações com ou sem as potências reativas de Pedreira não apresentam oscilações importantes do ponto de vista de estabilidade.

Tentando ainda explorar mais essa contingência, foi simulado novamente a perda do TR-1 mas desta vez o TR-3 já estava desligado, situação de uma manutenção, por exemplo.

Nesta situação, foram observados sobrecargas de 26% nos transformadores restantes, que não teriam condições de suportar a carga presente. Com a inserção de 87,7MVAR da usina de Pedreira, a sobrecarga do banco caiu para 23%, o que não é suficiente para eliminar a sobrecarga.

Outro ponto observado foi a inversão das potências reativas das unidades 41 e 42 de Fernando Gasparian, passando de gerador indutivo para gerador capacitivo. Na prática, se esta situação permanecesse, seria necessária a elevação de geração nas usinas térmicas da barra de 88kV ou o corte ou transferência de parte dessa carga, permitindo alívio do banco de Piratininga.

As máquinas que mais são afetadas são as unidades 1 e 2 de Piratininga e 41 e 42 de

Capítulo VII – Resultados e Análise dos Resultados Obtidos

Fernando Gasparian pois estão na barra de 88kV, mas mesmo elas tem suas oscilações minimizadas.

Em termos gerais, os reativos de Pedreira contribuem para a manutenção dos níveis médios operacionais. Eventos como a perda de máquinas geradoras, como o caso da máquina 1 de Henry Borden, para o caso 4 analisado tem grandes variações para máquinas e para o sistema e mostra os impactos e performance deste conjunto durante o evento, caso também identificado para a perda do gerador 31.

As perdas de cargas também mostram suas influências na perturbação dos valores nominais de operação de máquinas e dos sistemas, mas de forma mais branda assim como algumas simulações de perdas de linhas.

A perda do banco de capacitores não trouxe grandes impactos para máquinas e para o sistema, mostrando que algumas contingências são até discretas para máquinas e sistemas.

Certamente este não é o caso para eventos de curto-circuito, que normalmente extrapolam valores nominais. Para essas simulações, nem mesmo um grande bloco de energia reativa é capaz atenuar essas variações.

Em termos gerais, os 3 casos simulados trouxeram os benefícios da elevação da tensão inicial e atenuação dos efeitos desencadeados durante e após as contingências, mostrando que o sistema e as máquinas respondem bem durante as perturbações.

O próximo capítulo, VIII, apresentará as conclusões finais e as propostas para futuros trabalhos.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS

8.1 – Conclusões

Este trabalho tem por objetivo fazer a análise da estabilidade de grandes geradores em um grande sistema elétrico de potência através de simulações computacionais verificando seu comportamento em contingências pré-estabelecidas. Esses eventos foram convertidos em casos estudados que mostraram o comportamento do sistema e de máquinas antes, durante e depois dos eventos.

As simulações mostraram que para a maior parte das contingências aplicadas, os melhores perfis de tensão foram para os casos com a presença das potências reativas de Pedreira, o que mostra sua importância na manutenção da tensão. Outro ponto observado foi com relação a extensão desses reativos.

Neste caso as potências reativas geradas em Pedreira tem grandes influências nas barras do entorno desta usina, que são as linhas Henry Borden Pedreira circuitos 1 e 2, barra 485 Piratininga, barra 483 Pedreira e barra 481 de Henry Borden, todas de 88kV. A barra 484 Piratininga de 230kV, também recebe essa influência mas em menor escala.

É preciso observar que a intensidade desses efeitos depende da configuração em que o sistema se encontra.

Das várias contingências estudadas, algumas serviram para mostrar seus impactos no sistema e nas máquinas, mas outras para evidenciar sua pouca ou nenhuma influência, como no caso da perda do banco de transformadores.

Em geral, a perda do banco de transformadores implica em redução da capacidade de

Capítulo VIII – Conclusão e Proposta para Futuros Trabalhos

transmissão de potência ativa e reativa, mas somente se o banco não tiver folga. Para os bancos de Piratininga 88/230kV, no caso 3, a perda de um dos 4 transformadores que compõe o banco, não surte impactos relevantes, e isso se deve ao fato da barra 485 de 88kV de Piratininga possuir geração de potência ativa.

Em termos práticos, a elevação de geração em uma barra próxima das cargas resolve o problema. Outro ponto é que caso seja necessário, os transformadores que permaneceram ligados podem assumir uma parcela da carga do outro que foi desligado, assim, mesmo que em sobrecarga, o fornecimento não seria prejudicado. Como a simulação da perda de um transformador não trouxe nenhum problema, foi simulada a perda de dois transformadores. Neste caso, os transformadores restantes assumiram a carga e entraram em uma sobrecarga de 26%. Utilizando os reativos de Pedreira, essa sobrecarga reduziu para 23%.

Embora não seja suficiente para aliviar as sobrecargas dos transformadores, há pelo menos a evidência de que os reativos de Pedreira contribuem para reduzir as sobrecargas nos bancos de Piratininga. Em outros casos, a perda de uma linha de transmissão além de mudar a topologia do sistema, normalmente implica em remanejamento de cargas. Essa movimentação de cargas provoca uma redistribuição da geração o que faz com que o sistema encontre um novo ponto de operação. Somado a isso, as máquinas também são obrigadas a mudarem seus pontos de operação. Em geral, a perda da linha implica na perda de carga e para a máquina isso provoca uma rejeição de carga, que pode, dependendo do impacto, tamanho da carga e outras condições, fazer a máquina oscilar até encontrar um novo ponto de operação, ou até perder a estabilidade.

Linhas de transmissão operam com um sistema de religamento automático, que liga novamente a linha em casos de desligamentos involuntários trazendo de volta a carga que havia sido desligada.

Capítulo VIII – Conclusão e Proposta para Futuros Trabalhos

Em estudos de contingências com perdas de linhas de transmissão, o retorno da linha é a pior situação, pois máquinas e sistema que ainda tentam encontrar um novo ponto de operação sofrem novas perturbações com o retorno da linha.

Essa situação normalmente provoca grandes afundamentos de tensão, fazendo o sistema oscilar, é uma perturbação sobre outra, o que pode fazer o sistema e as máquinas demorarem mais para encontrar o novo ponto de operação, ou provocar seus desligamentos.

Para as máquinas, a inserção de um grande bloco de carga tem a tendência de solicitar repentinamente um aumento da potência ativa, o que pode provocar o desligamento dessas unidades.

Para este estudo, a perda da linha de transmissão Henry Borden Pedreira 1 teve o pior comportamento para o caso 2, sem a ETU Pedreira, pois com essa configuração, a manutenção dos níveis de tensão é feita somente por Henry Borden, que tendeu a afundar.

Com a inserção dos reativos de Pedreira, foi observado que além da tensão inicial do barramento ser maior que 1(pu), durante o evento da perda da linha a tensão não afunda tanto. Isso acontece porque com a geração de potência reativa na barra 483 (Pedreira), durante a perda da linha há uma sobra de potência reativa elevando a tensão o que acontece também com as cargas do entorno.

Similarmente ao caso 2, o caso 4 mostra uma tendência de atenuar os afundamentos de tensão, mas como nesta configuração a quantidade de máquinas ligadas nas linhas Henry Borden Pedreira é menor, o afundamento da tensão durante o evento é inevitável.

Vale lembrar que esse afundamento é de menor intensidade graças aos reativos da Pedreira, fora isso, a tensão inicial também fica acima de 1(pu).

Para o caso 3, os reativos de Pedreira contribuem tanto para aumentar a tensão inicial das barras quanto para reduzir o afundamento durante o evento. As barras 483 e 485 tem a

Capítulo VIII – Conclusão e Proposta para Futuros Trabalhos

manutenção de suas tensões preservadas, e é possível perceber até uma elevação da tensão na barra 484.

O caso 1 tem uma configuração que mantém Pedreira isolada do evento, logo, não há interesse nesta simulação.

Para o caso da perda de uma das linhas Henry Borden Pedreira, o caso 2 com os reativos de Pedreira traria melhores resultados em termos de respostas dinâmicas para o sistema e consequente estabilidade de máquinas.

Para a perda da carga da barra 485, o caso 3 foi o mais indicado pois coloca todas as cargas das linhas Henry Borden Pedreira para serem alimentadas por Piratininga.

Como na barra dessa carga há uma geração firme, que é a geração das unidades térmicas de 88kV, os problemas com a perda dessa carga são minimizados. Como essa barra recebe suporte do sistema de 230kV de Henry Borden (LT HB-PI), barra 480 e pelo sistema de 345kV (Interlagos), barra 488, o sistema torna-se bem forte, restando as barras de 88kV, contribuírem para a manutenção dos níveis de tensão e dar suporte de potência ativa e reativa.

Para a perda da carga da barra 3488 (Varginha 2), para o caso 3 com os reativos de Pedreira é possível observar que há uma considerável melhora nas tensões das barras do entorno. Isso que mostra que em maior ou menor intensidade, esses reativos contribuem para a manutenção desses níveis de tensão.

Já as cargas tem um comportamento melhor apresentando atenuações nos afundamentos de tensão para os casos com os reativos de Pedreira. Para as unidades de Henry Borden, seus reativos tem aparentemente atenuação de amplitude para os casos 2 e 3 com Pedreira, nos demais, não há relevância comprovada.

Para as unidades térmicas, a inclusão dos reativos de Pedreira faz com que as unidades do 88kV passem a gerar menos potência reativa. Para os casos mais extremos, em

Capítulo VIII – Conclusão e Proposta para Futuros Trabalhos

particular as UG's 41 e 42 da Usina de Fernando Gasparian, as máquinas passaram de geradores capacitivos para indutivos.

Para o caso 3, as máquinas térmicas do 88kV que geravam potências reativas próximas de zero, no momento da perda da carga e logo após, passaram a ser geradores indutivos. Na maioria dos casos onde há inversão da potência reativa capacitiva para indutiva, poderia haver o desligamento das unidades pela operação do relé INC (sequência negativa).

Com os reativos de Pedreira todas essas oscilações são atenuadas, ficando evidente mais uma vez os benefícios da presença dos reativos de Pedreira.

Para o curto circuito na barra 483, o caso 3 foi o pior e o caso 2, melhor.

No caso 2, todas as unidades de Pedreira estão conectadas com Henry Borden através das linhas Henry Borden Pedreira e durante o curto-circuito, as máquinas de Henry Borden da seção externa, auxiliadas por esses reativos parecem ter um comportamento melhor.

Para as máquinas térmicas, um curto-circuito na barra 483 tem piores resultados para o caso 3, pois todas as máquinas térmicas estão ligadas diretamente a barra que recebe o curto-circuito. Inicialmente os valores dos ângulos das máquinas térmicas do 88kV são um pouco maiores, como consequência da diminuição da geração de potência reativa e os valores iniciais de tensão também são mais próximos de 1(pu), mas durante o evento, as oscilações são similares ao caso sem Pedreira.

Com o objetivo de observar a dinâmica das cargas e do sistema através da inserção da potência reativa de Pedreira, simular o caso 1 não apresentou grandes resultados, pois as principais cargas deste estudo ficavam isoladas da Usina elevatória de Pedreira, (cargas das LT's HB-PE 1 e 2 de 88kV), logo, o caso 1 não foi estudado.

Também foi observado que as contingências ocorridas nas barras de Henry Borden e aos seus arredores, praticamente não são afetadas pelos reativos gerados em Pedreira. Outro

Capítulo VIII – Conclusão e Proposta para Futuros Trabalhos

ponto importante é que as cargas das linhas de Henry Borden Pedreira C1 e C2 de 88kV, quando alimentadas por Piratininga, precisam de geração térmica, que nem sempre esta disponível. Por esses motivos, o caso 3 foi o mais indicado para os estudos.

Uma das observações mais importantes que ficou evidenciada neste estudo foi que o comportamento do sistema e das máquinas pode ser influenciado basicamente por três pontos.

Em primeiro lugar a topologia do sistema, pois mudanças nessas configurações podem colocar sistemas e máquinas em situações mais desfavoráveis.

Em segundo lugar, são os eventos ocorridos no sistema, pois um evento como um curto-circuito tem características e comportamentos diferentes de, por exemplo, a perda de uma carga ou linha de transmissão. E em terceiro lugar, o ponto onde o evento se deu. Para cada local onde o evento acontece, seus efeitos são diferentes e os resultados também.

Embora não tenha sido mostrado aqui, outras simulações também foram realizadas agregando mais informações sobre o funcionamento deste sistema.

Como exemplo, foram simuladas a perda de grandes cargas no sistema de 345kV, onde, através da análise dos resultados dos fluxos de potência reativa, se verificou que os reativos de Pedreira não exerciam influência nesta área. Isso foi importante pois mostrou que os reativos de Pedreira somente tem influencia nas barras ao seu redor, ficando limitada ao sistema de 88kV. Também foram simuladas situações com déficit de geração térmica na barra de 88kV, e de uma forma geral, foi possível observar que em determinadas situações, nem mesmo os reativos de Pedreira são capazes de manter os níveis de tensão dessas barras.

Também foi possível verificar que a ausência de geração térmica faz com que as cargas do 88kV, principalmente da barra 485, se tornaram muito dependentes do sistema de 230kV e 345kV de Interlagos, e conseqüentemente do sistema de transformação 230/88kV de Piratininga. Isso indica que para a operação desse sistema, uma geração térmica mínima é

Capítulo VIII – Conclusão e Proposta para Futuros Trabalhos

necessária.

Também foi possível observar uma melhora na qualidade da tensão, atendendo os critérios estabelecidos pela ANEEL através do módulo 8 do PRODIST – Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional que determinam os parâmetros e valores de referência relativos a conformidade da tensão. O atendimento ao procedimento mostra que a energia elétrica fornecida e os serviços disponibilizados aos consumidores são adequados. Todos esses e outros resultados encontrados fornecem também subsídios para aumentar a confiabilidade do sistema elétrico, que na definição sistêmica, “é a capacidade do sistema de realizar e manter seu funcionamento em circunstâncias de rotina e em circunstâncias hostis e inesperadas”. Essa confiabilidade é baseada principalmente no valor dos custos para a concessionária e no valor dos benefícios oferecidos aos consumidores.

De todas as simulações e casos estudados, é possível concluir que a operação deste sistema com o auxílio da potência reativa fornecida pela Usina Elevatória de Pedreira é viável e traz benefícios para o perfil de tensão do sistema de 88kV. Foi observado também, embora não tenha sido estudado, uma melhora nas respostas dos transitórios eletromecânicos das máquinas de Henry Borden e Piratininga, que pode indicar mais uma contribuição dessa Usina ao sistema elétrico.

8.2 – Propostas para Futuros Trabalhos

Durante o estudo deste sistema, situações diversas foram exploradas e através dos resultados e conclusões, novas idéias e até algumas dúvidas foram surgindo. Com o intuito de não deixar nada para trás, alguns desses se enquadraram melhor como propostas para futuros trabalhos, que são;

1. Análise quantitativa da inércia das máquinas de Pedreira

A inserção de máquinas em pedreira como proposta do trabalho, traz como benefício adicional uma contribuição inercial ao SIN, ajudando o sistema em eventuais perturbações dinâmicas contribuindo para a segurança (mantendo a integridade do sistema). Como este trabalho não objetivou a análise quantitativa, fica como proposta para futuros trabalhos um estudo dessa contribuição inercial.

2. Modelo ideal de regulação para as máquinas de Pedreira

Como as unidades da Usina Elevatória de Pedreira possuem como reguladores de velocidade apenas um distribuidor e para a regulação de tensão, um reostato, fica como proposta, o estudo de modelos apropriados de regulação para essas máquinas considerando inclusive a instalação de estabilizadores (PSS), ou seja, uma modernização dos controladores (RT e RV) e instalação de excitação estática.

3. Modelo ideal de regulação para as máquinas de Henry Borden seção externa

Como as máquinas da Usina externa de Henry Borden possuem ainda um sistema obsoleto de regulação, fica também como proposta o estudo de um modelo apropriado para as UG's desta usina considerando inclusive a instalação de estabilizadores (PSS), ou seja, uma modernização dos controladores (RT e RV) e instalação de excitação estática.

Bibliografia

BIBLIOGRAFIA

- [1] - A Energia Elétrica no Brasil: da Primeira Lâmpada à Eletrobrás. Editora Biblioteca do Exército, 1978, Biblioteca do Exército – Palácio Duque de Caxias – Rio de Janeiro.
- [2] - E.W. KIMBARK, Power System Stability, Vol.1, John Wiley & Sons, Nova Iorque 1948.
- [3] - E.W. KIMBARK, Power System Stability, Vol.2, John Wiley & Sons, Nova Iorque 1950.
- [4] - E.W. KIMBARK, Power System Stability, Vol.3, John Wiley & Sons, Nova Iorque 1995.
- [5] - FITZGERALD, AE.; KINGSLEY, CHARLES JR.; KUSKO, ALEXANDER. Máquinas Elétricas. Editora McGraw Hill, São Paulo 1975.
- [6] - FOUAD, A. A. & ANDERSON P. M. Power System Control and Stability. Universidade do Estado do Iowa, Ames 1977.
- [7] - FILHO, XISTO VIEIRA, Operação de Sistemas de Potência com Controle Automático de Geração. Editora Campus LTDA, Rio de Janeiro, 1984.
- [8] - KNOWLTON, A. E. Standard Handbook for Electrical Engineers - McGraw-Hill, London, 1949.
- [9] - KOSOW, IRVING I. Máquinas Elétricas e Transformadores. Rio de Janeiro: Editora Globo, 5º ed. 1972.
- [10] - KUNDUR, P., Power System Stability and Control, EPRI - McGraw-Hill, 1993.
- [11] - MILLER, T.J.E.. Reactive Power Control in Electric Systems. John Wiley & Sons, 1982.
- [12] - MILANO, F., Power System Modelling and Scripting, Springer Verlag, London 2010, DOI: 10.1007/978-3-642-13669-6.

Bibliografia

- [13] - STEVENSON, WILLIAN D.JR. Elementos de Análise de Sistemas de Potência. São Paulo: Editora Mcgraw Hill, 2º ed. Em português, 1986.
- [14] - TAYLOR, C.W. Power System Voltage Stability, McGraw-Hill, 1994.
- [15] - WEEDY, B. M. Sistemas Elétricos de Potência. Editora Polígono. São Paulo, 1973.
- [16] - GUIMARÃES, CARLOS HENRIQUE COSTA. Simulação Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência Considerando os Fenômenos de Longa Duração, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, dezembro de 2003.
- [17] - MATA, CLAYTON GUIMARÃES. Uma Contribuição na Análise da Estabilidade Transitória dos Sistemas Elétricos de Distribuição na Presença de Geração Distribuída, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, agosto de 2005.
- [18] - RAGNEV, WALTER. Estudo de Potência Reativa, Tensão, Contingência e Perdas em Empresas de Energia Elétrica Localizadas na Grande São Paulo. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, junho de 2005.
- [19] - RICARDO, DANIEL B. Estudo do Balanço de Potência Reativa e sua Influência na Tensão do Sistema. Trabalho de Iniciação Científica, Universidade Federal de Uberlândia 2005.
- [20] - SILVEIRA, CRISTIANO DA SILVA. Estudo de Máximo Carregamento em Sistema de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2003.
- [21] - SILVA, AGUINALDO S. & COSTA, ANTÔNIO J. A. S. Controle e Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência. Artigo, Florianópolis, agosto de 2000.
- [22] - SILVA, LEILTON SANTOS. Modificação Técnica e Conceitual no Sistema de Segurança dos Geradores e Condutos Forçados nº 1 e 2 da Usina Henry Borden. Dissertação de Mestrado, Universidade de Taubaté, 2008.

Bibliografia

- [23] - FILHO, JOSÉ M. Aspectos Práticos e Teóricos na Análise de Estabilidade de Tensão. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2006.
- [24] - EMAE. – Relatório de Ensaios nas Unidades Reversíveis da Usina Elevatória de Pedreira, propriedade da Usina Elevatória de Pedreira da EMAE.
- [25] - EMAE, Manual de funcionamento e manutenção do regulador de tensão “BJ30” da Usina de Henry Borden, outubro de 1946, propriedade da Usina de Henry Borden da EMAE.
- [26] - EMAE, Manual de Manutenção das Unidades Térmicas da Piratininga, abril de 1964, propriedade da Usina de Henry Borden da EMAE.
- [27] - EMAE, Manual de Operação das Usinas e Estruturas, 2005, propriedade do COS – Centro de Operações do Sistema da EMAE.
- [28] - EMAE, Manual de Operação e Manutenção do Sistema de Regulação de Velocidade da Usina de Henry Borden seção Subterrânea, setembro de 1998, propriedade da Usina de Henry Borden da EMAE.
- [29] - EMAE, Relatório do Consumo de Água para as Unidades Geradoras de Henry Borden, março de 2004, propriedade da Usina de Henry Borden da EMAE.
- [30] - EMAE, Relatório sobre o Desempenho dos Sistemas de Regulação de Tensão e Velocidade das Unidades Geradoras da Usina de Henry Borden, maio de 2000, propriedade da Usina de Henry Borden da EMAE.
- [31] - EMAE, ONS. Instrução de Operação – IO-ON.SE.3SP- Instrução de Operação Normal da Área 345/230 kV de São Paulo. rev.42 Operação das Unidades da ETU Pedreira como Compensador Síncrono. São Paulo, propriedade do COS – Centro de Operações do Sistema da EMAE de 28/02/2012.

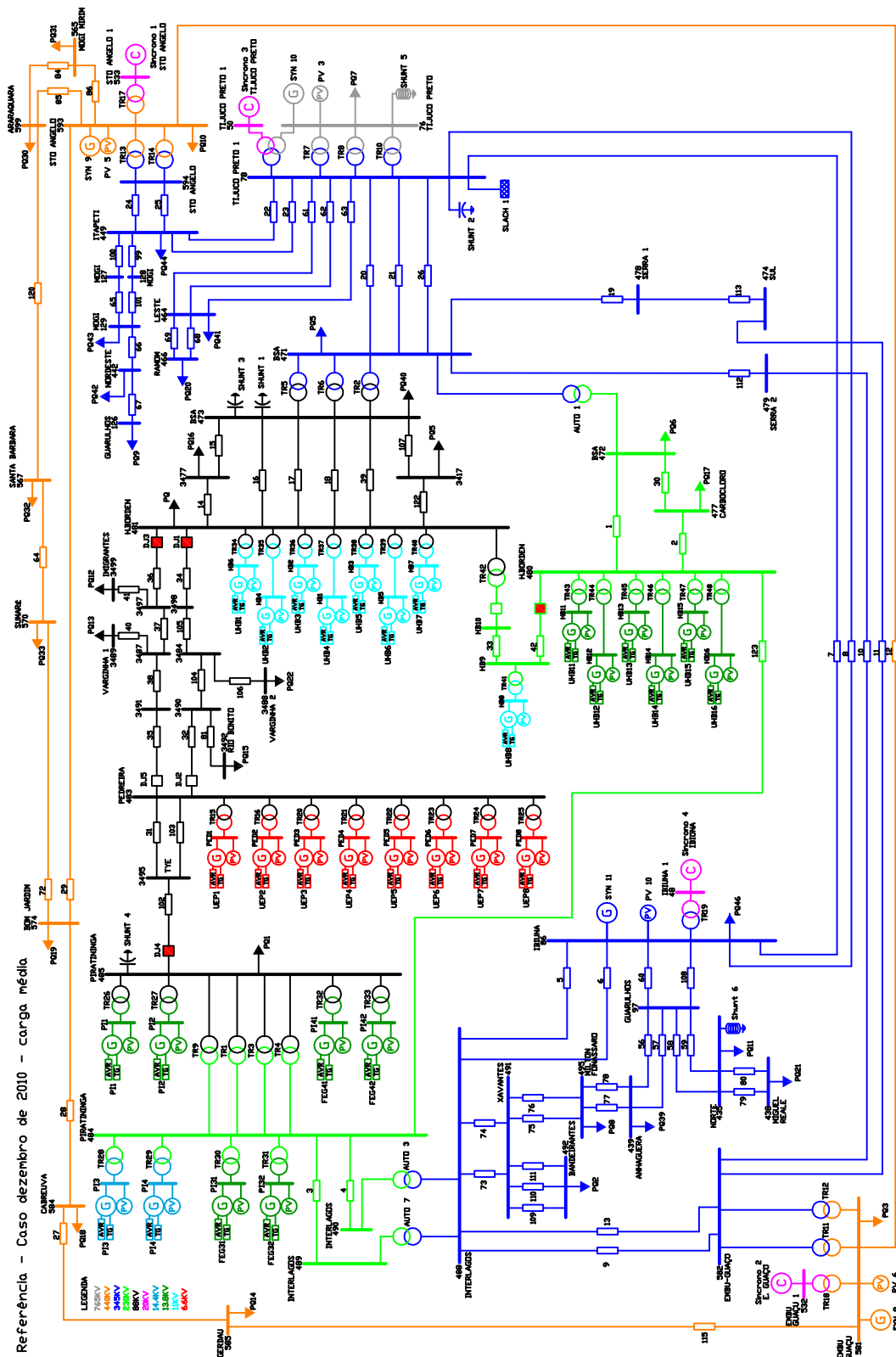
Bibliografia

- [32] - EMAE, IEO 001 - Instrução Específica de Operação da Usina Hidroelétrica Henry Borden, propriedade do COS – Centro de Operações do Sistema da EMAE de 28/05/1999.
- [33] - EMAE, IEO 002 - Instrução Específica de Operação da Usina Termoelétrica Piratininga, propriedade do COS – Centro de Operações do Sistema da EMAE de 12/01/2005.
- [34] - EMAE, IEO 005 - Instrução Específica de Operação da Usina Termoelétrica Nova Piratininga (Fernando Gasparian), propriedade do COS – Centro de Operações do Sistema da EMAE de 04/03/2005.
- [35] - EMAE, MPO – Manual de Procedimentos da Operação do ONS – Módulo 10, propriedade do COS – Centro de Operações do Sistema da EMAE de 05/08/2009.
- [36] - Manual do programa ANAREDE – Programa de Análise de Redes, CEPEL, agosto de 2004.
- [37] - Manual do programa PSAT, MILANO, F.; PSAT 2.1.6 (MatLab/Power System Analysis Toolbox), Universidade de Waterloo, Canadá, 2004.
- [38] - RELATÓRIO, Empresa CTEEP, Dados Técnicos e Características dos Compensadores Síncronos, São Paulo, 2010, propriedade da CTEEP.
- [39] - 421.1-1986 – IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machine, junho de 1985. revisão do IEEE Std. 421.1-1986.
- [40] - 1110-2002 - IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses, IEEE PES, novembro de 2003, revisão do IEEE Std. 1110-1191.
- [41] - 421.5-1992 – IEEE Recommendes Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, outubro de 2005, revisão do IEEE Std. 421.5-1992.

Bibliografia

- [42] - ONS. Nota Técnica 153/2007 – Ressarcimento à EMAE pela operação da Usina Elevatória de Pedreira na compensação de potência Reativa, março de 2008.
- [43] - ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Disponível em <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em 03 de março de 2012.
- [44] - ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8_rev.4. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em 08 de maio de 2012.

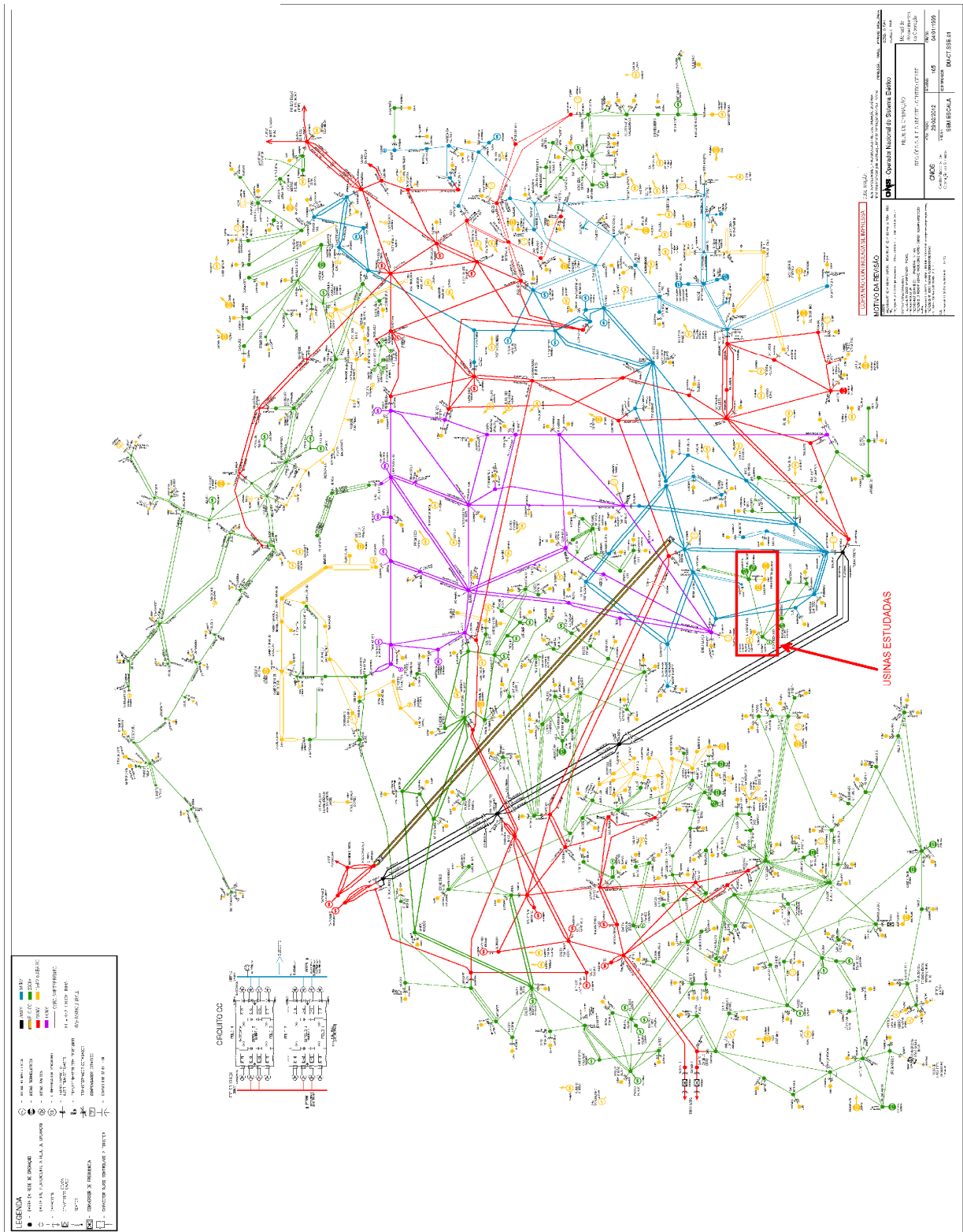
ANEXO A – DIAGRAMA ELÉTRICO DA REGIÃO ESTUDADA



Fonte: Obtido através do programa *PSAT*, referencia bibliográfica [12]

Figura A1 – Diagrama elétrico utilizado no modelo de simulação

ANEXO A



Fonte: Obtido através do site: <<http://www.ons.org.br>>, referencia bibliográfica [43]

Figura A2 – Posição da área de estudo na rede de operação regiões Sul e Sudeste



146

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico de São Paulo**

ANEXO B

ANEXO B – LINHAS DO SISTEMA ELÉTRICO

Nome	Tensão (kV)	Impedância (z)	Capacidade (MVA)	
			Normal	Emerg.
Henry Borden - AGA	88	$Z = 0,41 + j 1,53$ $B = 0,088$	137	137
AGA - Baixada	88	$Z = 0,37 + j 1,26$ $B = 0,079$	137	137
Henry Borden - Baixada Santista	88	$Z = 0,73 + j 2,84$ $B = 0,161$	138	138
Henry Borden - Baixada Santista	88	$Z = 0,46 + j 2,43$ $B = 0,162$	138	138
Henry Borden - Baixada Santista	88	$Z = 0,73 + j 2,84$ $B = 0,161$	138	138
Pedreira – Piratininga (TYE)	88	$Z = 0,02 + j 0,10$ $B = 0$	137	137
H. Borden – Pedreira C1	88	$Z = 0,24 + j 0,131$ $B = 0$	137	137
Henry Borden - Pedreira	88	$Z = 2,57 + j 14,19$ $B = 0$	137	137
H. Borden – Pedreira C1 - 3491	88	$Z = 0,24 + j 1,31$ $B = 0$	137	137
Henry Borden - Pedreira	88	$Z = 2,57 + j 14,19$ $B = 0$	137	137
Henry Borden - Pedreira	88	$Z = 1,12 + j 6,17$ $B = 0$	137	137
H. Borden – Pedreira C1 - 3487	88	$Z = 0,55 + j 3,04$ $B = 0$	137	137
Henry Borden - Baixada Santista	88	$Z = 0,046 + j 2,43$ $B = 0,162$	138	138
Henry Borden - Pedreira - Varginha 1	88	$Z = 1,09 + j 2,76$ $B = 0$	81	81
Henry Borden - Pedreira - Imigrantes	88	$Z = 0,06 + j 0,15$ $B = 0$	81	81
Henry Borden - Pedreira - Rio Bonito	88	$Z = 0,66 + j 0,166$ $B = 0$	81	81
Piratininga – Pedreira (TYE)	88	$Z = 0,03 + j 0,16$ $B = 0$	234	234
Pedreira – Piratininga (TYE)	88	$Z = 0,02 + j 0,10$ $B = 0$	137	137
Henry Borden - Pedreira	88	$Z = 0,55 + j 3,04$ $B = 0$	137	137
Henry Borden - Pedreira	88	$Z = 1,12 + j 6,17$ $B = 0$	137	137
Henry Borden - Pedreira - Varginha 2	88	$Z = 1,09 + j 2,76$ $B = 0$	81	81
Refinaria - Baixada Santista	88	$Z = 0,27 + j 1,49$ $B = 0,114$	138	138
Henry Borden - Refinaria	88	$Z = 0,19 + j 0,94$ $B = 0,049$	138	138

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico de São Paulo**

ANEXO B

Nome	Tensão (kV)	Impedância (z)	Capacidade (MVA)	
			Normal	Emerg.
Henry Borden – Baixada C1	230	$Z = 0,05 + j 0,43$ $B = 1,318$	637	637
H. Borden – Carbocloro	230	$Z = 0,04 + j 0,33$ $B = 0,997$	608	637
Piratininga – Interlagos C1	230	$Z = 0,01 + j 0,09$ $B = 0,410$	383	478
Piratininga – Interlagos C2	230	$Z = 0,01 + j 0,09$ $B = 0,410$	383	478
Carbocloro - Baixada	230	$Z = 0,01 + j 0,1$ $B = 0,321$	608	608
Anel de 230KV em Henry Borden	230	$Z = 0,05 + j 0,43$ $B = 1,318$	608	608
Anel de 230KV em Henry Borden	230	$Z = 0,05 + j 0,43$ $B = 1,318$	608	608
Henry Borden – Piratininga	230	$Z = 0,61 + j 3,01$ $B = 5,54$	311	311

Nome	Tensão (kV)	Impedância (z)	Capacidade (MVA)	
			Normal	Emerg.
Ibiúna – Interlagos C1	345	$Z = 0,08 + j 1,29$ $B = 38,341$	2020	2390
Ibiúna – Interlagos C2	345	$Z = 0,08 + j 1,29$ $B = 38,341$	2020	2390
Ibiúna – Tijuco Preto C1	345	$Z = 0,19 + j 2,60$ $B = 66,190$	1280	1613
Ibiúna – Tijuco Preto C2	345	$Z = 0,19 + j 2,60$ $B = 66,190$	1280	1613
Interlagos – Embu-Guaçu C1	345	$Z = 0,07 + j 0,70$ $B = 12,166$	895	895
Embu-Guaçu – Serra 2	345	$Z = 0,16 + j 1,31$ $B = 22,768$	896	896
Embu-Guaçu – Sul	345	$Z = 0,61 + j 3,01$ $B = 5,54$	895	895
Interlagos – Embu-Guaçu C2	345	$Z = 0,07 + j 0,70$ $B = 12,166$	896	896
Baixada Santista - Serra 1	345	$Z = 0,02 + j 0,22$ $B = 3,38$	912	912
Baixada – Tijuco Preto C1	345	$Z = 0,08 + j 0,78$ $B = 14,88$	1184	1184
Baixada – Tijuco Preto C2	345	$Z = 0,08 + j 0,78$ $B = 14,88$	1184	1184
T. Preto – Itapeti C1	345	$Z = 0,07 + j 0,66$ $B = 12,845$	1184	1184
T. Preto – Itapeti C2	345	$Z = 0,07 + j 0,66$ $B = 12,845$	1184	1184
Itapeti – S. Ângelo C1	345	$Z = 0,04 + j 0,41$ $B = 7,15$	896	896
Itapeti – S. Ângelo C2	345	$Z = 0,04 + j 0,41$ $B = 7,15$	896	896
Baixada – Tijuco Preto C3	345	$Z = 0,08 + j 0,87$ $B = 13,54$	912	912

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico de São Paulo**

ANEXO B

Nome	Tensão (kV)	Impedância (z)	Capacidade (MVA)	
			Normal	Emerg.
Anhanguera - Guarulhos C1	345	$Z = 0,04 + j 0,62$ $B = 17,25$	2390	2390
Anhanguera - Guarulhos C2	345	$Z = 0,04 + j 0,62$ $B = 17,25$	2390	2390
Guarulhos 2 – Norte C1	345	$Z = 0,01 + j 0,13$ $B = 3,589$	1793	1793
Guarulhos 2 – Norte C2	345	$Z = 0,01 + j 0,13$ $B = 3,589$	1793	1793
Guarulhos 2 – Ibiúna	345	$Z = 0,11 + j 1,83$ $B = 51,18$	1707	1707
Tijuco Preto – Leste C1	345	$Z = 0,1 + j 0,95$ $B = 17,073$	912	912
Tijuco Preto – Leste C2	345	$Z = 0,1 + j 0,94$ $B = 17,073$	912	912
Tijuco Preto – Leste C3	345	$Z = 0,1 + j 0,99$ $B = 17,073$	912	912
Mogi – 127	345	$Z = 0 + j 0,76$ $B = 0$	912	912
Nordeste - Mogi	345	$Z = 0,09 + j 0,84$ $B = 13,379$	717	717
Guarulhos - Nordeste	345	$Z = 0,12 + j 1,17$ $B = 18,479$	776	776
Leste - Ramon	345	$Z = 0,01 + j 0,15$ $B = 4,127$	1195	1195
Leste - Ramon	345	$Z = 0,01 + j 0,15$ $B = 4,127$	1195	1195
Interlagos – Xavantes C1	345	$Z = 0,01 + j 0,2$ $B = 5,502$	2390	2390
Interlagos – Xavantes C2	345	$Z = 0,01 + j 0,2$ $B = 5,502$	2390	2390
Xavantes – Milton Fonassaro C1	345	$Z = 0,02 + j 0,64$ $B = 8,941$	1195	1195
Xavantes – Milton Fonassaro C1	345	$Z = 0,02 + j 0,64$ $B = 8,941$	1195	1195
Milton Fonassaro – Anhanguera C1	345	$Z = 0,01 + j 0,23$ $B = 3,61$	1793	1793
Milton Fonassaro – Anhanguera C2	345	$Z = 0,01 + j 0,23$ $B = 3,61$	1793	1793
Norte – Miguel Reale C1	345	$Z = 0,05 + j 3,31$ $B = 162,48$	400	400
Norte – Miguel Reale C2	345	$Z = 0,05 + j 3,31$ $B = 162,48$	400	400
Mogi – 128 - Itapeti	345	$Z = 0,02 + j 0,16$ $B = 2,661$	912	912
Mogi – 127 - Itapeti	345	$Z = 0 + j 0,02$ $B = 2,661$	912	912
Mogi – 128	345	$Z = 0 + j 0,76$ $B = 0$	912	912
Guarulhos 2 – Ibiúna	345	$Z = 0,11 + j 1,83$ $B = 51,18$	1707	1707
Xavantes – Bandeirantes C1	345	$Z = 0,01 + j 0,18$ $B = 116,84$	500	500
Xavantes – Bandeirantes C2	345	$Z = 0,01 + j 0,18$ $B = 116,84$	500	500
Xavantes – Bandeirantes C3	345	$Z = 0,01 + j 0,18$ $B = 116,84$	500	500
Baixada Santista - Serra 2	345	$Z = 0,02 + j 0,22$ $B = 3,38$	912	912
Serra 1 - Sul	345	$Z = 0,06 + j 0,56$ $B = 8,12$	912	912

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico de São Paulo**

ANEXO B

Nome	Tensão (kV)	Impedância (z)	Capacidade (MVA)	
			Normal	Emerg.
Embu-Guaçu – Santo Ângelo	440	$Z = 0,61 + j 3,01$ $B = 5,54$	1522	1522
Cabreúva - Gerdau	440	$Z = 0,02 + j 0,3$ $B = 18,10$	1524	1524
Bom Jardim – Cabreúva	440	$Z = 0,03 + j 0,38$ $B = 23,71$	1524	1524
Bom Jardim – S. Ângelo	440	$Z = 0,015 + j 1,98$ $B = 118,81$	1524	1524
Santa Barbara - Sumaré	440	$Z = 0,03 + j 0,34$ $B = 19,21$	1524	1524
Sumaré – Bom Jardim	440	$Z = 0,06 + j 0,8$ $B = 45,81$	1524	1524
Mogi Mirim - Araraquara	440	$Z = 0,21 + j 2,65$ $B = 170,71$	1524	1524
Santo Ângelo - Araraquara	440	$Z = 0,38 + j 4,7$ $B = 303,36$	1524	1524
Santo Ângelo – Mogi Mirim	440	$Z = 0,23 + j 2,88$ $B = 185,57$	1524	1524
Gerdau – Embu Guaçu	440	$Z = 0,07 + j 0,92$ $B = 55,40$	1524	1524
Santa Barbara - Araraquara	440	$Z = 0,18 + j 2,38$ $B = 134,8$	1524	1524

Fonte: Obtido através do programa ANAREDE, referencia bibliográfica [36]

Tabela B1 – Valores dos parâmetros das linhas constantes neste trabalho.

Os dados das linhas foram obtidos do programa Anarede do ONS, (base 100MVA e 138kV).

Dados atualizados referência dezembro de 2010, carga média.

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico de São Paulo**

ANEXO B

ANEXO B – TRANSFORMADORES DO SISTEMA ELÉTRICO

Transformadores do Sistema	BARRAS	POTÊNCIA NOMINAL (MVA)	TENSÃO (KV)	TAP'S (PU)	REATÂNCIA %	CAPACIDADE EMERGÊNCIA (MVA)
Transformador	473 - 471	400	88/345	1,00/0,975	5,63	400
Transformador	473 - 471	400	88/345	1,00/0,975	5,58	400
Transformador	473 - 471	400	88/345	1,00/1,008	5,63	400
Transformador	484 - 485	100	230/88	0,939/1,00	16,13	100
Transformador	484 - 485	100	230/88	0,939/1,00	16,25	100
Transformador	484 - 485	100	230/88	0,939/1,00	15,99	100
Transformador	484 - 485	100	230/88	0,939/1,00	16,08	100
Auto Transformador	490 - 488	500	230/345	-----	1,59	500
Auto Transformador	489 - 488	500	230/345	-----	1,59	500
Transformador	86 - 48	1050	345/20	1,013/1,00	0,71	1050
Auto Transformador	471 - 472	500	345/230	-----	1,59	500
Transformador	78 - 76	150	345/765	1,00/1,051	0,89	150
Transformador	78 - 76	1500	345/765	1,00/1,051	0,9	1500
Transformador	78 - 76	1500	345/765	1,00/1,051	0,9	1500
Transformador	78 - 50	1500	345/20/765	-----	2,48/1,03/3,51	1500
Transformador	593 - 533	250	440/20	1,00/1,00	3,76	250
Transformador	581 - 532	250	440/20	1,00/1,00	3,76	250
Transformador	581 - 582	750	440/345	1,00/0,939	0,72	750
Transformador	581 - 582	750	440/345	1,00/0,939	0,72	750
Transformador	593 - 594	750	440/345	1,00/0,939	0,72	750
Transformador	593 - 594	750	440/345	1,00/0,939	0,71	750

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico de São Paulo**

ANEXO B

Transformadores de Pedreira	BARRAS	POTÊNCIA NOMINAL (MVA)	TENSÃO (KV)	TAP'S (PU)	REATÂNCIA %	CAPACIDADE EMERGÊNCIA (MVA)
Transformador	PED1 - 483	20	6,6/88	1,00/1,037	13,29	20
Transformador	PED2 - 483	20	6,6/88	1,00/1,033	9,43	20
Transformador	PED3 - 483	20	6,6/88	1,00/1,033	9,53	20
Transformador	PED4 - 483	20	6,6/88	1,00/1,00	9,43	20
Transformador	PED5 - 483	20	6,6/88	1,00/1,032	9,5	20
Transformador	PED6 - 483	20	6,6/88	1,00/1,037	13,5	20
Transformador	PED7 - 483	20	6,6/88	1,00/1,037	13,45	20
Transformador	PED8 - 483	30	6,6/88	1,00/1,04	13,3	30

Transformadores de Piratininga	BARRAS	POTÊNCIA NOMINAL (MVA)	TENSÃO (KV)	TAP'S (PU)	REATÂNCIA %	CAPACIDADE EMERGÊNCIA (MVA)
Transformador	PI1 - 485	120	13,8/88	1,00/1,025	11,1	120
Transformador	PI2 - 485	120	13,8/88	1,00/1,025	11,1	120
Transformador	PI3 - 484	142,5	14,4/230	1,00/1,025	15,2	142,5
Transformador	PI4 - 484	142,5	14,4/230	1,00/1,025	15,2	142,5

Transformadores de Fernando Gasparian	BARRAS	POTÊNCIA NOMINAL (MVA)	TENSÃO (KV)	TAP'S (PU)	REATÂNCIA %	CAPACIDADE EMERGÊNCIA (MVA)
Transformador	FG31 - 484	140	13,8/230	1,00/1,00	13,18	140
Transformador	FG32 - 484	140	13,8/230	1,00/1,00	13,18	140
Transformador	FG41 - 485	140	13,8/88	1,00/1,00	13,5	140
Transformador	FG42 - 485	140	13,8/88	1,00/1,00	13,5	140

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico de São Paulo**

ANEXO B

Transformadores de Henry Borden	BARRAS	POTÊNCIA NOMINAL (MVA)	TENSÃO (KV)	TAP'S (PU)	REATÂNCIA %	CAPACIDADE EMERGÊNCIA (MVA)
Transformador	HB1 - 481	49,5	11/88	1,00/1,050	13,1	49,5
Transformador	HB2 - 481	49,5	11/88	1,00/1,050	13,1	49,5
Transformador	HB3 - 481	60	11/88	1,00/1,050	8,61	60
Transformador	HB4 - 481	60	11/88	1,00/1,050	8,68	60
Transformador	HB5 - 481	66	11/88	1,00/1,050	8,61	66
Transformador	HB6 - 481	60	11/88	1,00/1,050	8,61	60
Transformador	HB7 - 481	60	11/88	1,00/1,050	8,73	60
Transformador	HB8 - HB9	75	11/230	1,00/1,050	11,6	75
Transformador	HB11 - 480	75	13,8/230	1,00/1,050	11,8	75
Transformador	HB12 - 480	75	13,8/230	1,00/1,050	11,8	75
Transformador	HB13 - 480	75	13,8/230	1,00/1,050	11,8	75
Transformador	HB14 - 480	75	13,8/230	1,00/1,050	11,8	75
Transformador	HB15 - 480	75	13,8/230	1,00/1,050	11,8	75
Transformador	HB16 - 480	75	13,8/230	1,00/1,050	11,8	75

Transformador do Banco 231 Henry Borden	BARRAS	POTÊNCIA NOMINAL (MVA)	TENSÃO (KV)	TAP'S (PU)	REATÂNCIA %	CAPACIDADE EMERGÊNCIA (MVA)
Transformador	HB10 - 481	75	230/88	1,025/1,00	11,6	75

Fonte: Obtido através do programa ANAREDE, referencia bibliográfica [36]

Tabela B2 – Características dos transformadores do sistema.

Dados obtidos do programa Anarede do ONS, (base 100MVA e 138kV). Referência dezembro de 2010 carga média. O tap usual varia conforme a característica da carga (leve, média e pesada) e com o período do ano.

ANEXO B – COMPENSADORES SÍNCRONOS DO SISTEMA ELÉTRICO

COMPENSADORES SÍNCRONOS				
PARÂMETROS	(86) Ibiúna	(78) T. Preto	(593) Sto Angelo	(581) E. Guaçu
MVa	300,00	300,00	250,00	250,00
x_d	170,00	170,00	181,00	181,00
x'_d	37,00	37,00	37,60	37,60
x''_d	22,00	25,00	24,30	24,30
x_q	100,00	100,00	119,00	119,00
x'_q	0,568*	0,568*	0,568*	0,568*
x''_q	0,143*	0,143*	0,143*	0,143*
x_l	15,40	17,50	10,00	10,00
T'_d	9,00	9,00	11,50	11,50
T''_d	0,06	0,06	0,04	0,12
T'_q	0,20	0,20	0,11	0,15
H	1,60	1,60	2,34	2,34
* FOUAD, A. A. & ANDERSON P. M. Power System Control and Stability. Universidade do Estado do Iowa, 1977.				

Fonte: Obtido através do programa ANAREDE, referencia bibliográfica [36]

Tabela B3 – Características dos compensadores síncronos do sistema.

Dados obtidos do programa Anarede do ONS, (base 100MVA e 138kV). Referência dezembro de 2010 carga média.

ANEXO B – UNIDADES GERADORAS DA USINA DE HENRY BORDEN

UNIDADES GERADORAS DE HENRY BORDEN - EXTERNA							
Unidade	Fabricante	Potência	Tensão	Fator de Potência	Xd	X'd	X''d
1	GECO	47MVA	11kV	0,85	140%	55%	35,01%
2	GECO	33MVA	11kV	0,85	100%	30%	24,59%
3	GECO	72MVA	11kV	0,85	91,10%	40,80%	20,02%
4	GECO	76MVA	11kV	0,85	151%	45%	27,85%
5	GECO	72MVA	11kV	0,85	91,10%	40,80%	20,02%
6	GECO	76MVA	11kV	0,85	150%	43%	27,85%
7	GECO	72MVA	11kV	0,85	91,10%	40,80%	20,02%
8	GECO	72MVA	11kV	0,85	91,10%	40,80%	20,02%

Fonte: Obtido através do programa ANAREDE, referencia bibliográfica [36]

Tabela B4 – Características dos geradores da UHB Externa.

UNIDADES GERADORAS DE HENRY BORDEN - SUBTERRÂNEA							
Unidade	Potência	Tensão	Fator de Potência	Xd	Xq	X'd	X''d
11	75MVA	13,8kV	0,85	108%	62%	25,50%	17,40%
12	75MVA	13,8kV	0,85	108%	62%	25,50%	17,40%
13	75MVA	13,8kV	0,85	108%	62%	25,50%	17,40%
14	75MVA	13,8kV	0,85	108%	62%	25,50%	17,40%
15	75MVA	13,8kV	0,85	100%	60%	26,20%	18%
16	75MVA	13,8kV	0,85	100%	60%	26,20%	18%

Fonte: Obtido através do programa ANAREDE, referencia bibliográfica [36]

Tabela B5 – Características dos geradores da UHB Subterrânea.

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico de São Paulo**

ANEXO B

ANEXO B – UNIDADES GERADORAS DA USINA PIRATININGA

UNIDADES GERADORAS DE PIRATININGA							
Nº	ITENS	GERADORES Nº 1 E 2			GERADORES Nº 3 E 4		
1	Fabricante	General Eletric Co.			General Eletric Co.		
2	Tipo	ATB			ATB		
3	Nº de série	Gerador 1	Gerador 2		Gerador 3	Gerador 4	
		6.198.174	6.198.175		8.287.047	8.287.048	
4	Ano de instalação	1954			1960		
5	Rotação - rpm	1.800			3.600		
6	Nº de pólos	4			2		
7	Frequência - ciclos/segundo	60			60		
8	Tensão dos terminais V	13.800			14.400		
9	Tensão de Excitação V	250			375		
10	Fator de potência	0,8			0,85		
11	Classe de isolamento	B			B		
12	Aumento de temp. máx. - °C	60 estator	85 rotor		50 estator	76 rotor	
13	Números de fase	3			3		
Parâmetros relacionados com a pressão do hidrogênio no interior do gerador							
14	Pressão de hidrogênio - atm.	0,035	1,05	2,1	0,035	1,05	2,1
15	Potência aparente - KVA	100.000	115.000	125.000	128.000	147.058	160.000
16	Potência real - KVA	80.000	92.000	100.000	108.000	125.000	136.000
17	Corrente no estator - A	4.184	4.810	5.229	5.132	5.895	6.415
18	Corrente de excitação - A	985	1.080	1.150	806	880	934
19	Xd	126%	126%		166%	166%	
20	Xq	120%	120%		155%	155%	
21	X´d	21%	21%		24%	24%	
22	X´q	14%	14%		11,50%	11,50%	
23	X´´d	14%	14%		11,50%	11,50%	

Fonte: Obtido através do programa ANAREDE, referencia bibliográfica [36]

Tabela B6 – Características dos geradores da Usina Piratininga.

**O Estudo da Inserção do Reativo da Usina Elevatória de Pedreira na
Dinâmica do Sistema Elétrico de São Paulo**

ANEXO B

UNIDADES GERADORAS DE PIRATININGA						
Nº	ITENS	TURBINAS Nº 1 E 2		TURBINAS Nº 3 E 4		Unidades
1	Fabricante	General Eletric Co.		General Eletric Co.		
2	Tipo	Condensação com sangrias		Condensação com sangrias e reaquecimento		
3	Nº de série	Turbina 1	Turbina 2	Turbina 3	Turbina 4	
		99.692	99.693	118.393	118.394	
4	Ano de instalação	1954		1960		-
5	Potência nominal	100		125		MW
6	Potência máxima contínua garantida	100		136		MW
7	Pressão de vapor principal	59,8		126,6		atm. ef.
8	Pressão de vapor reaquecido	-		33,4		atm. ef.
9	Temperatura de vapor principal	496,1		537,8		°C
10	Temperatura de vapor reaquecido	-		537,8		°C
11	Pressão de exaustão (absoluta)	0,052		0,069		atm
12	Rotação	1.800		3.600		rpm
13	Nº de estágios	17		19		-
14	Nº de estágios	5		5		-

Fonte: Obtido através do programa ANAREDE, referencia bibliográfica [36]

Tabela B7 – Características das turbinas da Usina Piratininga.

**ANEXO B – UNIDADES GERADORAS REVERSÍVEIS DA USINA ELEVATÓRIA
DE PEDREIRA**

UNIDADES GERADORAS REVERSÍVEIS DE PEDREIRA							
Unidade	Potência	Tensão	Fator de Potência	X _d	X _q	X' _d	X'' _d
1	17,5MVA	6,6kV	0,85	102%	72%	33%	23%
2	17,5MVA	6,6kV	0,85	111%	*72%	36%	28%
3	17,5MVA	6,6kV	0,85	111%	*72%	36%	28%
4	6,25MVA	6,6kV	0,80	*91,1%	*58%	*40,8%	*32,9%
5	16,5MVA	6,6kV	0,85	102%	72%	33%	23%
6	17,5MVA	6,6kV	0,85	102%	72%	33%	23%
7	17,5MVA	6,6kV	0,85	111%	72%*	36%	28%
8**	26,25MVA	6,6kV	0,85	80,40%	49%	23%	17%

Fonte: Obtido através do programa ANAREDE, referencia bibliográfica [36]

Obs: (*) Valores não disponíveis. Para efeito de estudos, os dados que não estavam disponíveis foram substituídos por dados literários ou com base na similaridade entre unidades.

Obs: (**) A unidade nº08 não é reversível

Tabela B8 – Características das unidades reversíveis da Usina Elevatória Pedreira.

ANEXO B – ENSAIOS NAS MÁQUINAS DA USINA ELEVATÓRIA DE PEDREIRA

Conforme relatórios da EMAE.

• Ensaios das unidades funcionando como bomba capacitiva:

Unidades	02	04	05
Potência ativa consumida (MW)	13,3	5,2	13,9
Potência reativa fornecida (MVAr)	10	3,9	5,0
Potência aparente (MVA)	16,9	6,5	14,8
Tensão (KV)	7,1	6,84	6,85
Corrente do estator (A)	1360	550	1245
Fator de potência	0,79	0,80	0,939
Corrente de campo (A)	588	179	387
Tensão de excitação (V)	-----	180	175

Fonte: Obtido através de relatórios da EMAE, referencia bibliográfica [24]

Tabela B9 – Valores das Unidades da UEP como bomba capacitiva.

• Ensaios das unidades funcionando como bomba indutiva:

Unidades	02	04	05
Potência ativa consumida (MW)	13,2	5,1	13,8
Potência reativa consumida (MVAr)	5	2,0	3,0
Potência aparente (MVA)	14,1	5,4	14,1
Corrente do estator (A)	1288	480	1250
Fator de potência	0,925	0,94	0,977
Corrente de campo (A)	253	93	259
Tensão de excitação (V)	-----	93	112

Fonte: Obtido através de relatórios da EMAE, referencia bibliográfica [24]

Tabela B10 – Valores das Unidades da UEP como bomba indutiva.

● **Ensaio das unidades funcionando como síncrono sobreexcitado:**

Unidades	02	04	05
Potência ativa consumida (MW)	1,2	0,4	0,9
Potência reativa fornecendo (MVar)	12	5,0	9,5
Tensão (kV)	7,1	7,0	7,1
Corrente do estator (A)	992	450	780
Fator de potência	0,08	0,104	0,122
Corrente de campo (A)	600	184	429
Tensão de excitação (V)	-----	185	190

Fonte: Obtido através de relatórios da EMAE, referencia bibliográfica [24]

Tabela B11 – Valores das Unidades da UEP como síncrono sobreexcitado.

● **Ensaio das unidades funcionando como síncrono subexcitado:**

Unidades	02	04	05
Potência ativa consumindo (MW)	1,2	0,3	0,7
Potência reativa consumindo (MVar)	5,0	1,0	3,0
Tensão (kV)	6,3	6,75	6,6
Corrente do estator (A)	512	80	200
Fator de potência	0,17	0,24	0,325
Corrente de campo (A)	152	68	180
Tensão de excitação (V)	-----	70	80

Fonte: Obtido através de relatórios da EMAE, referencia bibliográfica [24]

Tabela B12 – Valores das Unidades da UEP como síncrono subexcitado.

• Ensaios das unidades da Usina Elevatória de Pedreira x Usina Henry Borden:

Unidades	02	04	05
Potência ativa consumida necessária para manter a rotação síncrona (MW)	1,2	0,4	0,9
Turbinamento necessário para manter a velocidade síncrona (m3/s)	2,0	1,5	2,0
Geração que pode ser obtida na UHB com o mesmo turbinamento (MW)	11,308	8,481	11,308

Fonte: Obtido através de relatórios da EMAE, referencia bibliográfica [24]

Tabela B13 – Comparação entre o turbinamento de UEP e UHB.

ANEXO C – REGULADOR DE VELOCIDADE PARA UNIDADES HIDRÁULICAS

1. REGULADOR COM QUEDA DE VELOCIDADE

Este tipo de regulador é mais estável e rápido na regulação, pois possui uma realimentação ligada diretamente ao eixo de admissão de água para a turbina como veremos na figura C1 a seguir.

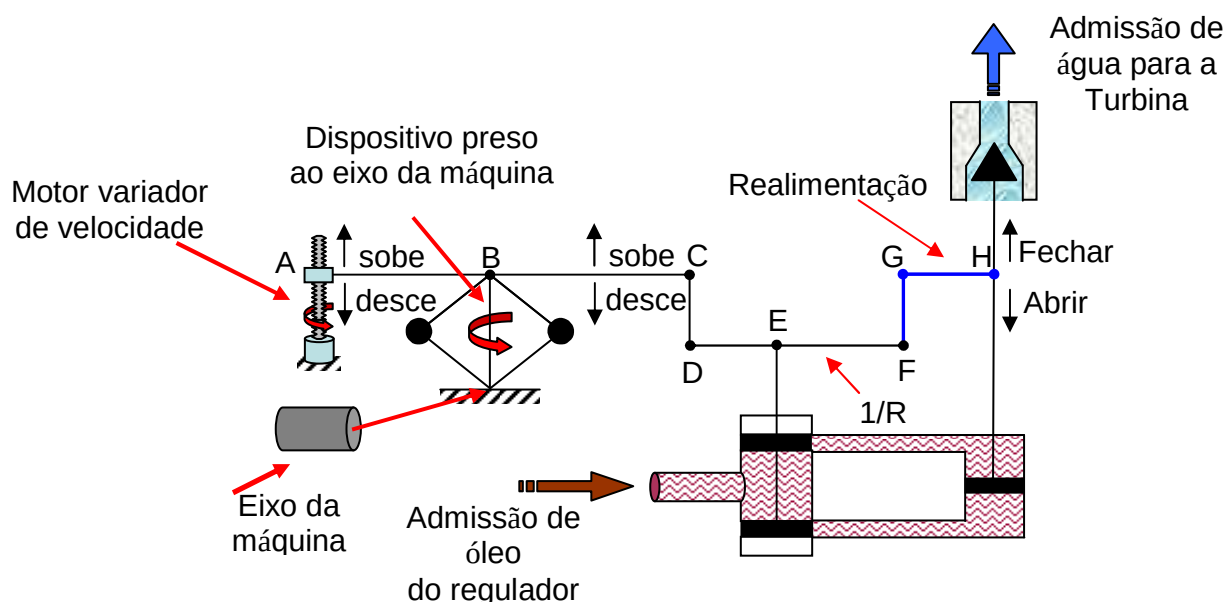


Figura C1 – Regulador com queda de velocidade de dois estágios.

Os pontos “G” e “H” ligam o regulador de velocidade diretamente a admissão de água para a turbina, quando há uma alteração da RPM da máquina, a informação é transmitida até o ponto “E” que movimenta as câmaras internas ao cilindro admitindo pressão de óleo para fechar ou abrir a agulha.

Como este sistema tem uma realimentação, ele é comandado por duas variáveis de movimento, (1) a variação da RPM do eixo da máquina e (2) a variação de movimento da agulha.

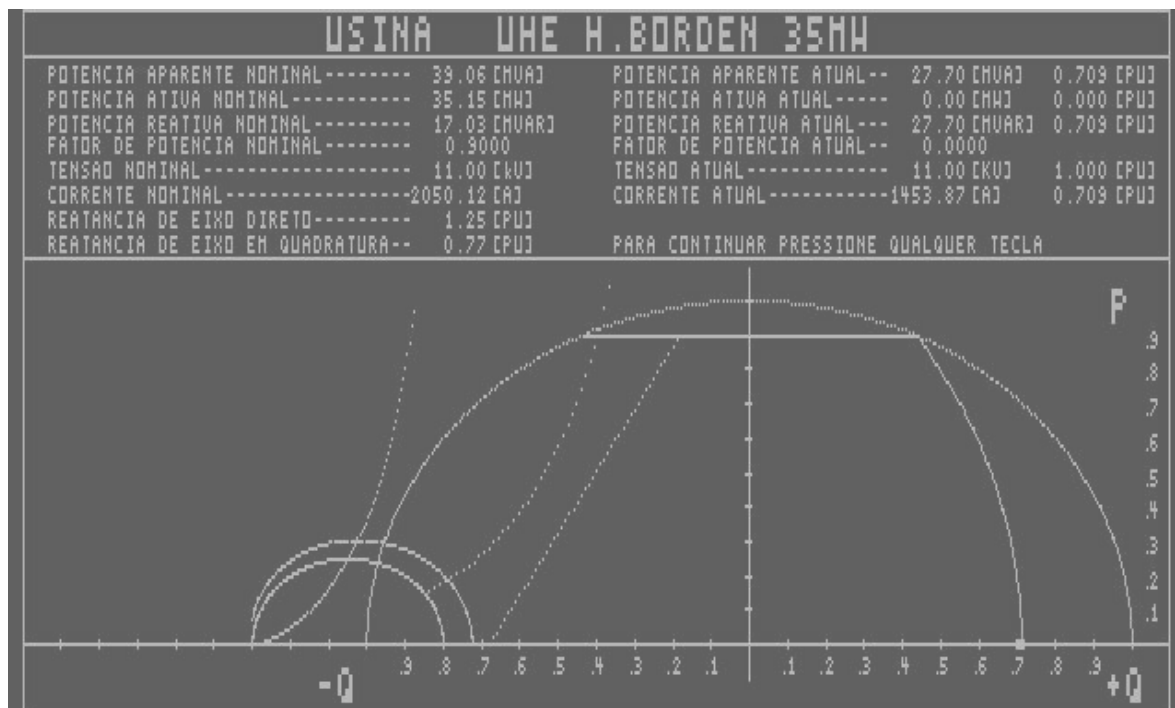
ANEXO C

Além disso, o regulador de velocidade possui um 2º estágio de regulação, que tem função trazer o valor da frequência para o valor padrão através da introdução de um motor variador de velocidade inserido no ponto “A”, passando a ser mais preciso.

O princípio é relativamente simples, pois vai comparar a frequência da máquina com uma frequência padrão. A diferença é convertida em um sinal que vai movimentar o motor variador de velocidade até que a diferença desapareça.

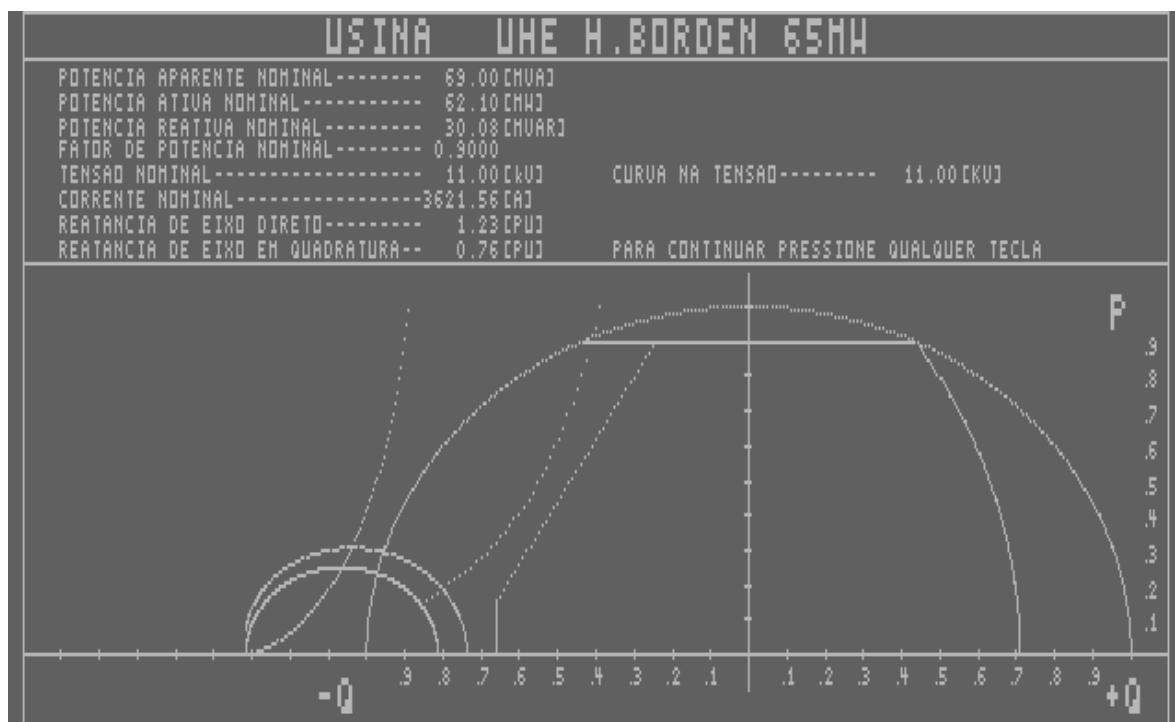
Embora explicado de forma simples, o que deve ficar claro sobre o regulador de velocidade é a sua grande importância para a operação estável de uma máquina geradora e seu comportamento durante um evento.

ANEXO D – CURVAS DE CAPABILIDADE



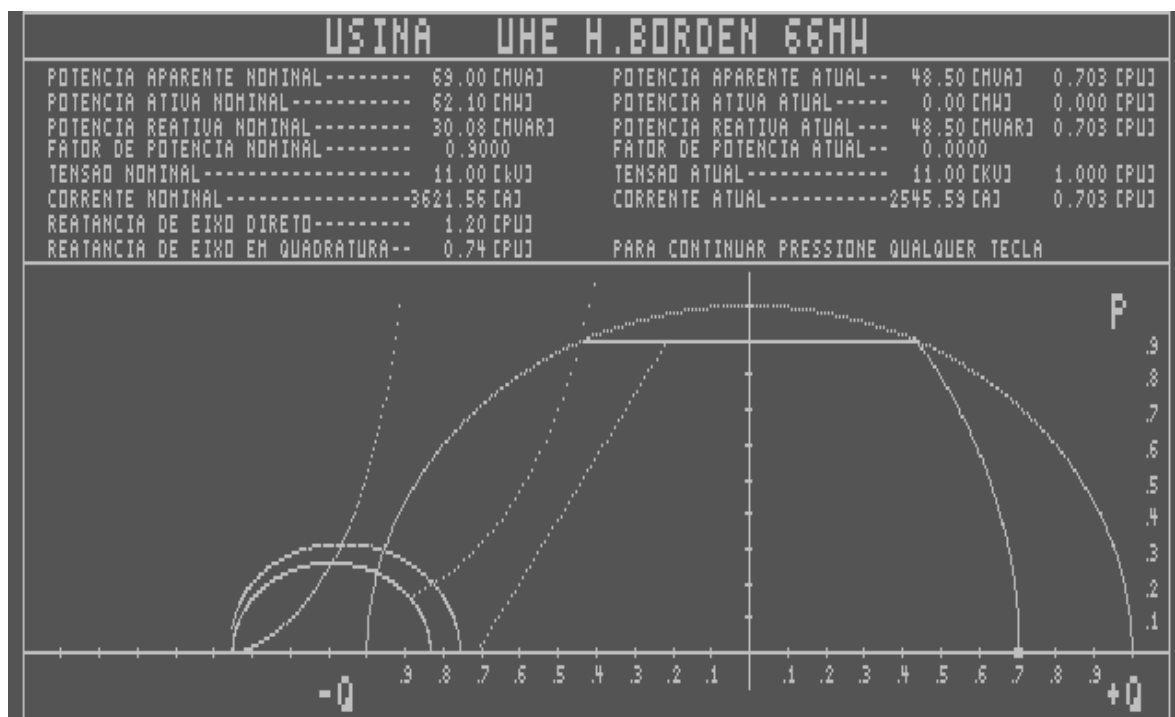
Fonte: Obtido através de literatura, referencia bibliográfica [18]

Figura D1 - Curva de capacidade das unidades de 35 MW de Usina Henry Borden.



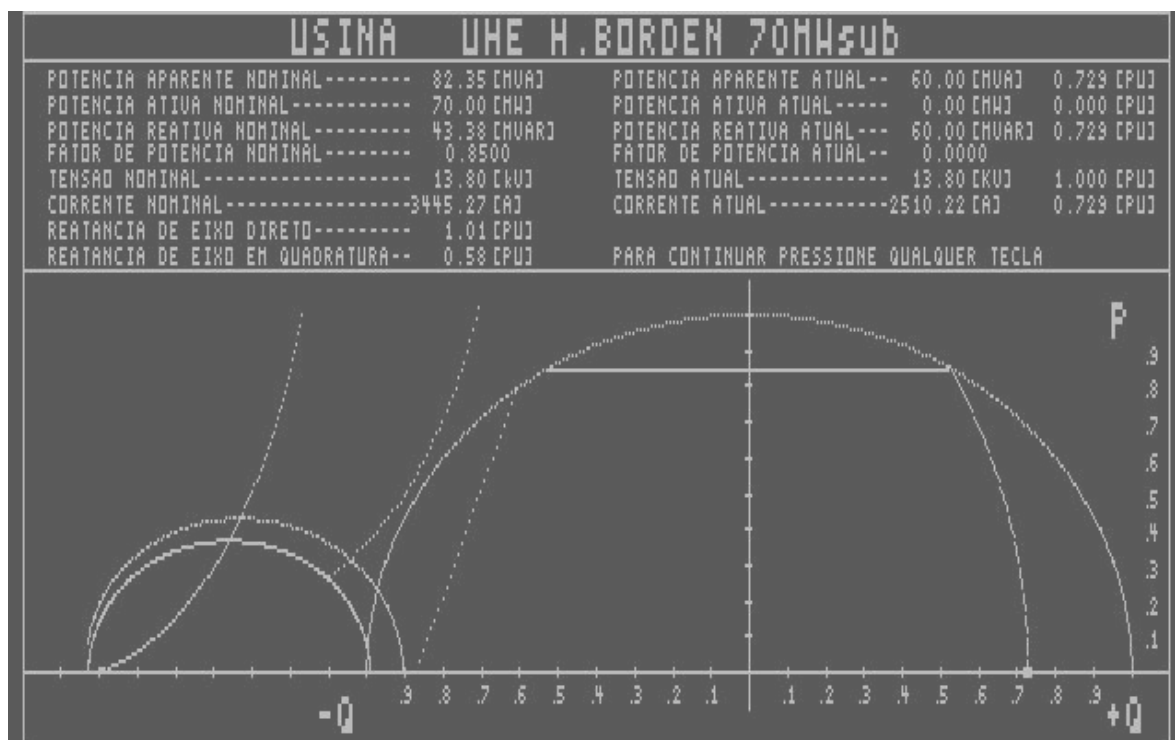
Fonte: Obtido através de literatura, referencia bibliográfica [18]

Figura D2 - Curva de capacidade das unidades de 65 MW de Usina Henry Borden.



Fonte: Obtido através de literatura, referencia bibliográfica [18]

Figura D3 - Curva de capacidade das unidades de 66 MW de Usina Henry Borden.



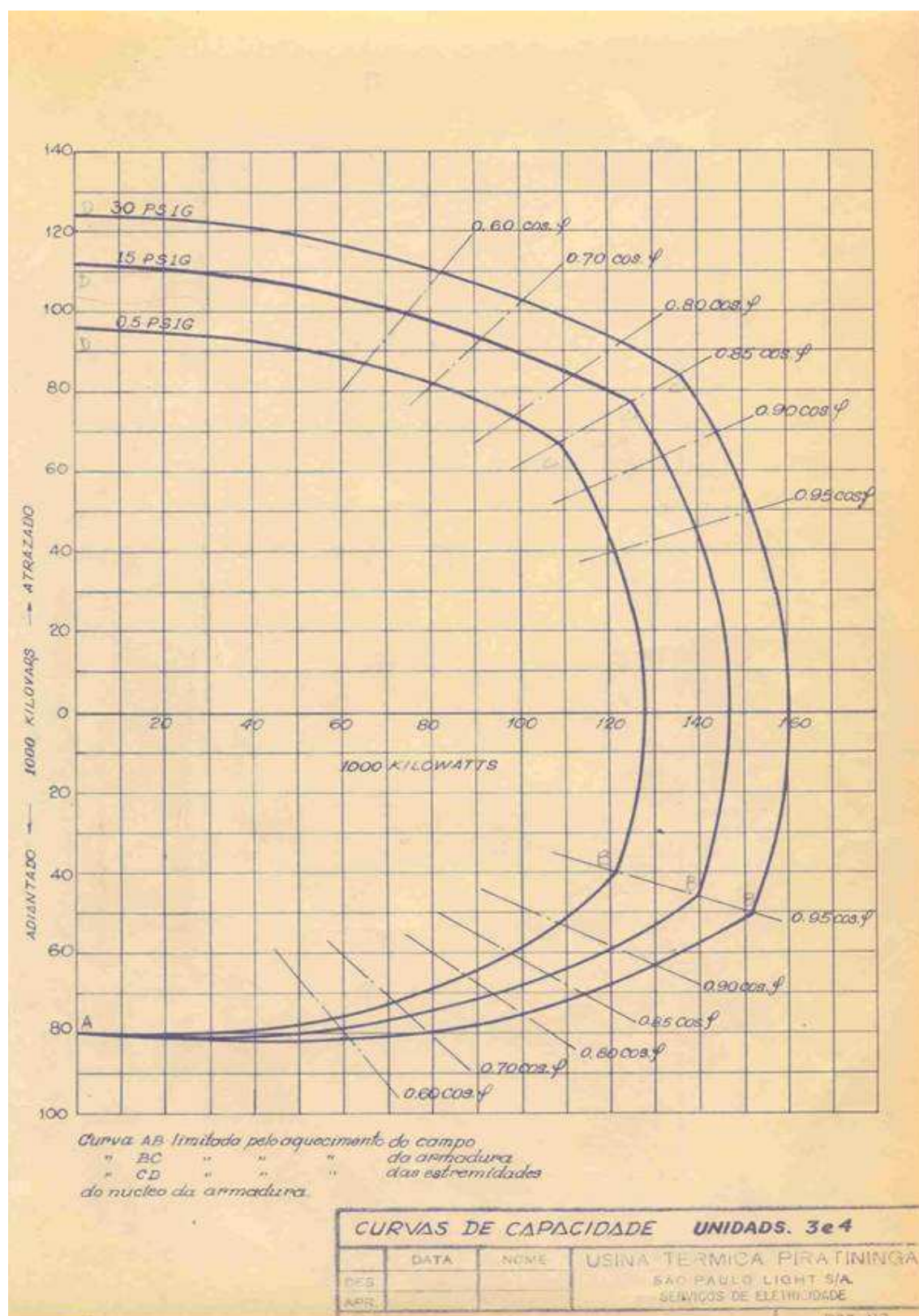
Fonte: Obtido através de literatura, referencia bibliográfica [18]

Figura D4 - Curva de capacidade das unidades de 70 MW de Usina Henry Borden.

ANEXO D

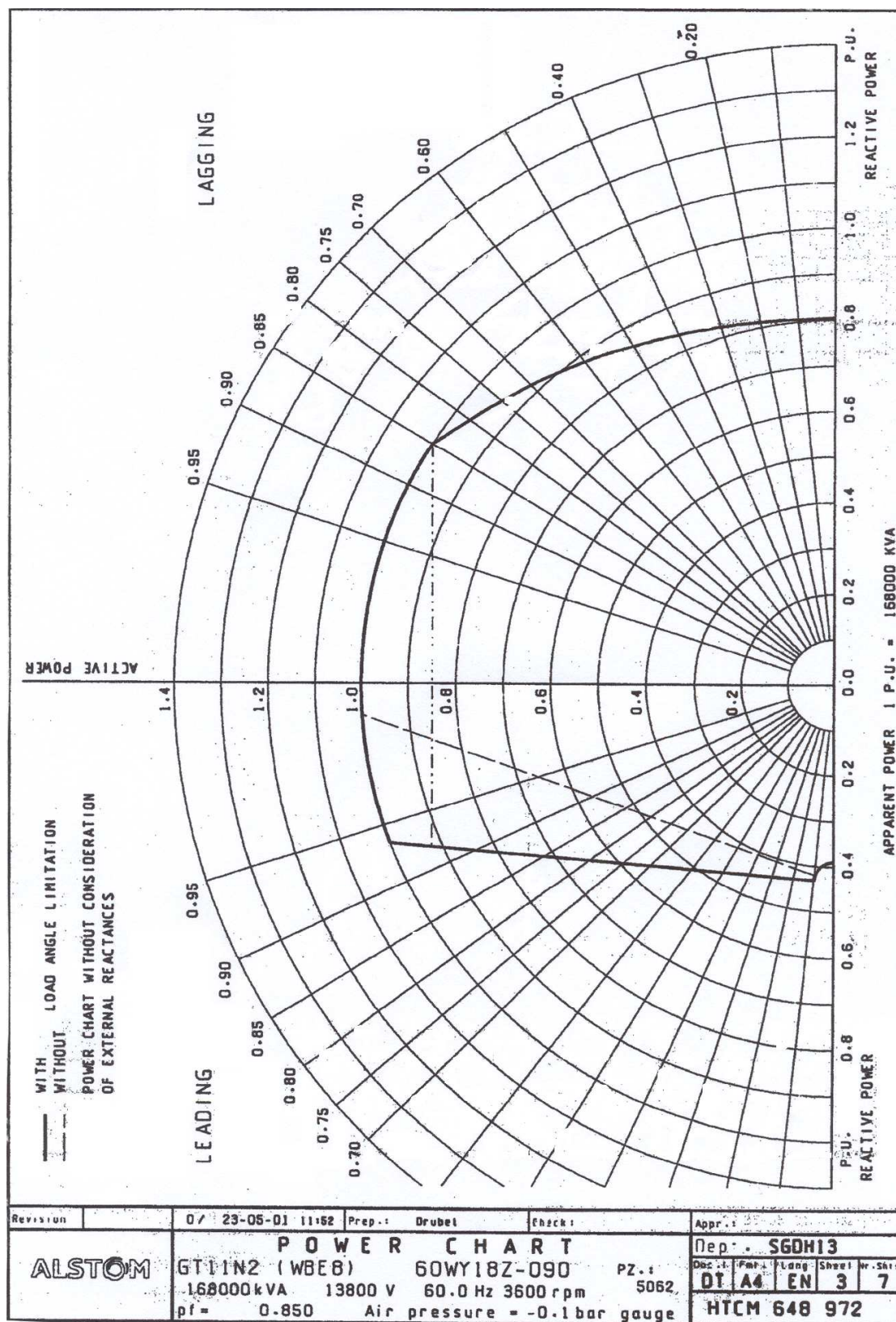


166



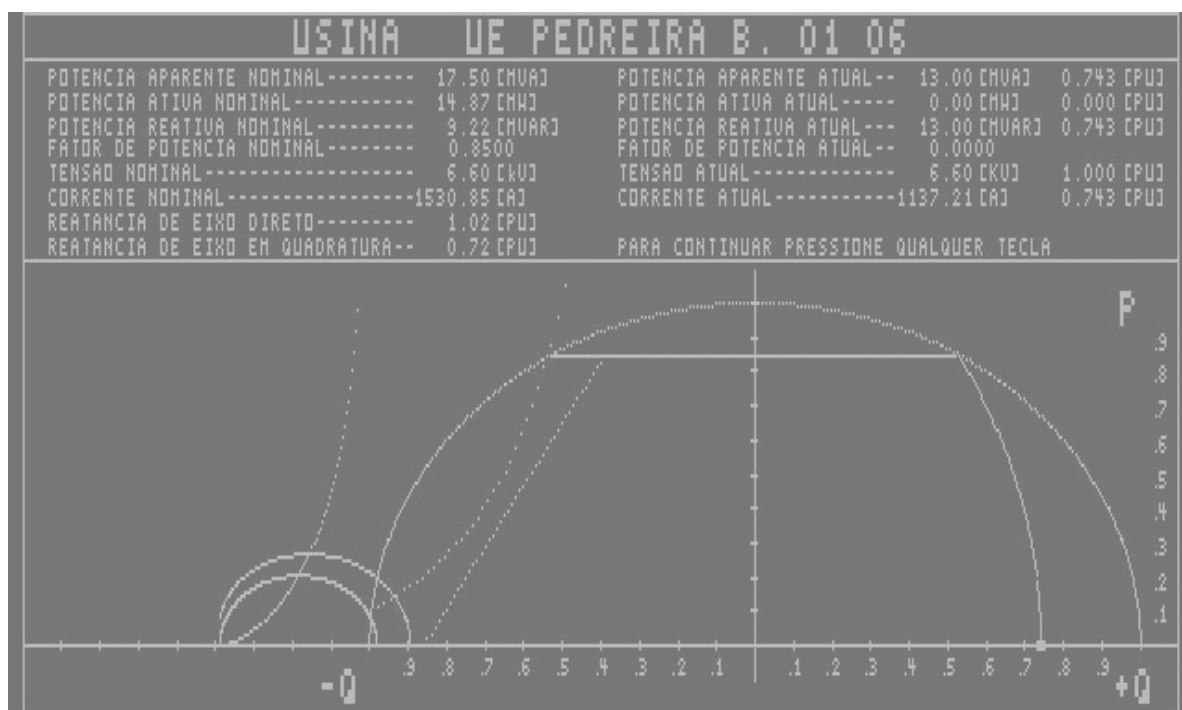
Fonte: Obtido através de literatura, referencia bibliográfica [18]

Figura D6 - Curva de capacidade das unidades n° 3 e 4 da Usina Termoelétrica Piratininga.



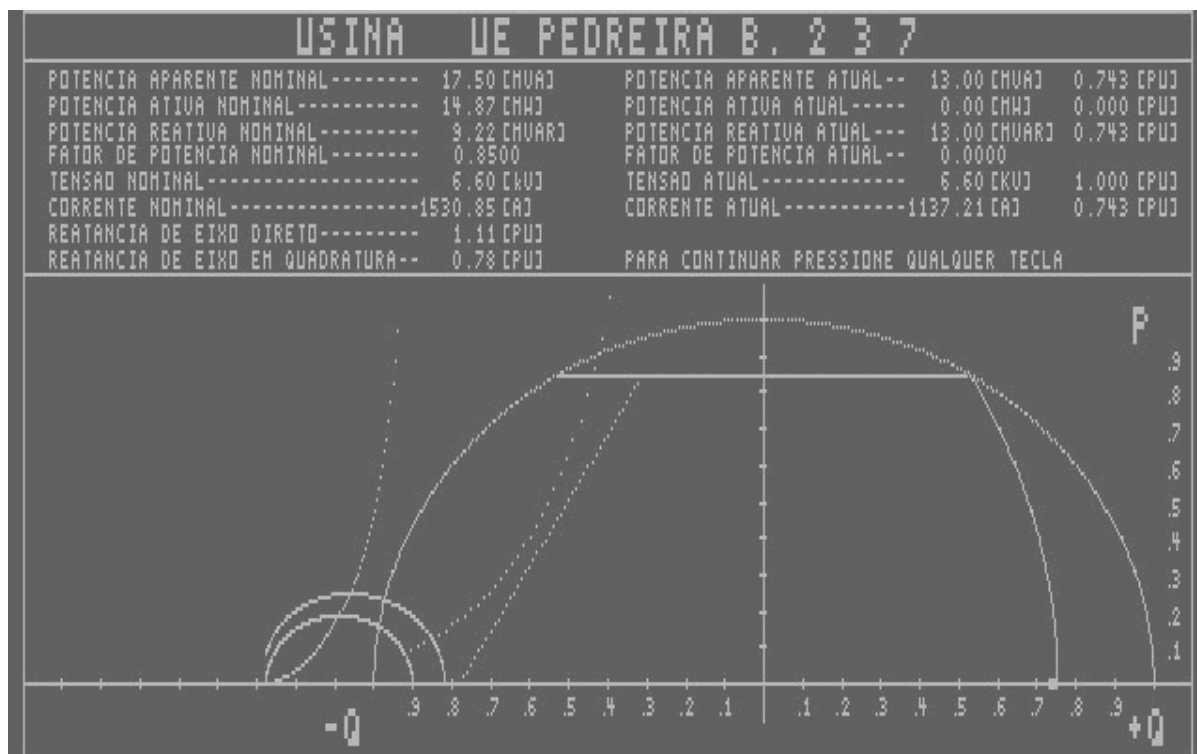
Fonte: Obtido através de literatura, referencia bibliográfica [18]

Figura D7 - Curva de capacidade das unidades térmicas de Fernando Gasparian.



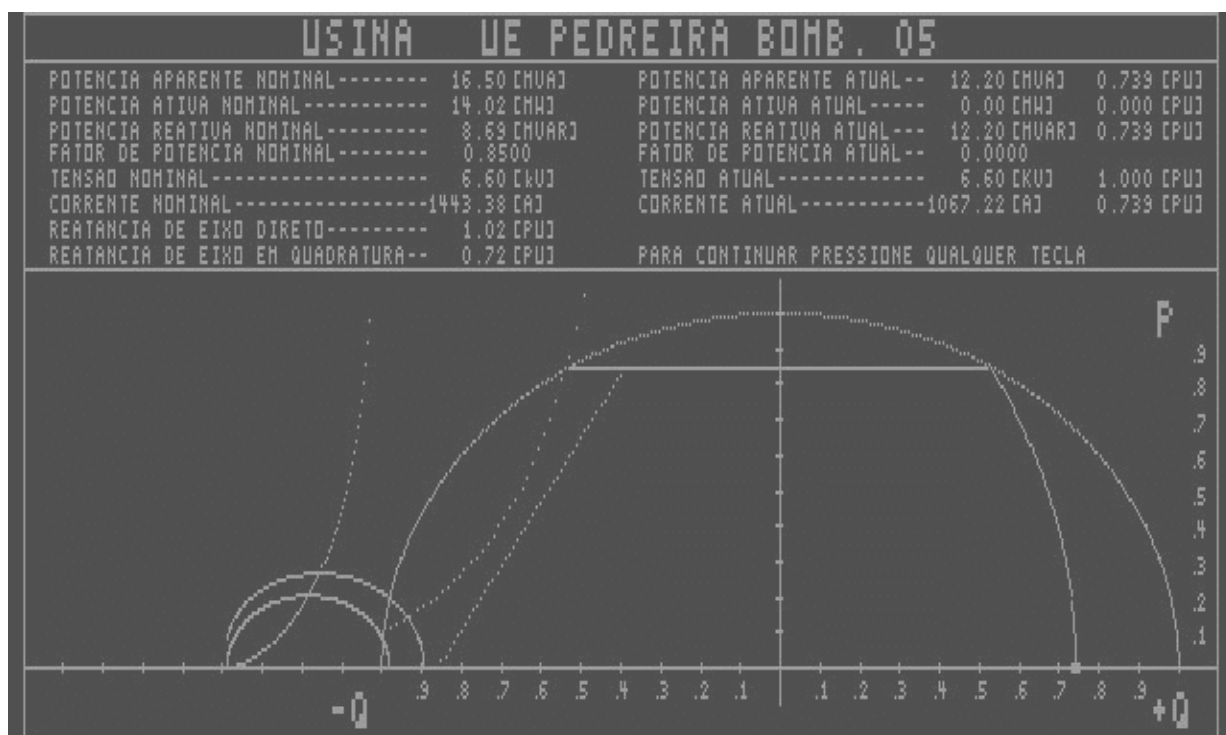
Fonte: Obtido através de literatura, referencia bibliográfica [18]

Figura D8 - Curva de capacidade das unidades 1 e 6 da Usina Elevatória de Pedreira.



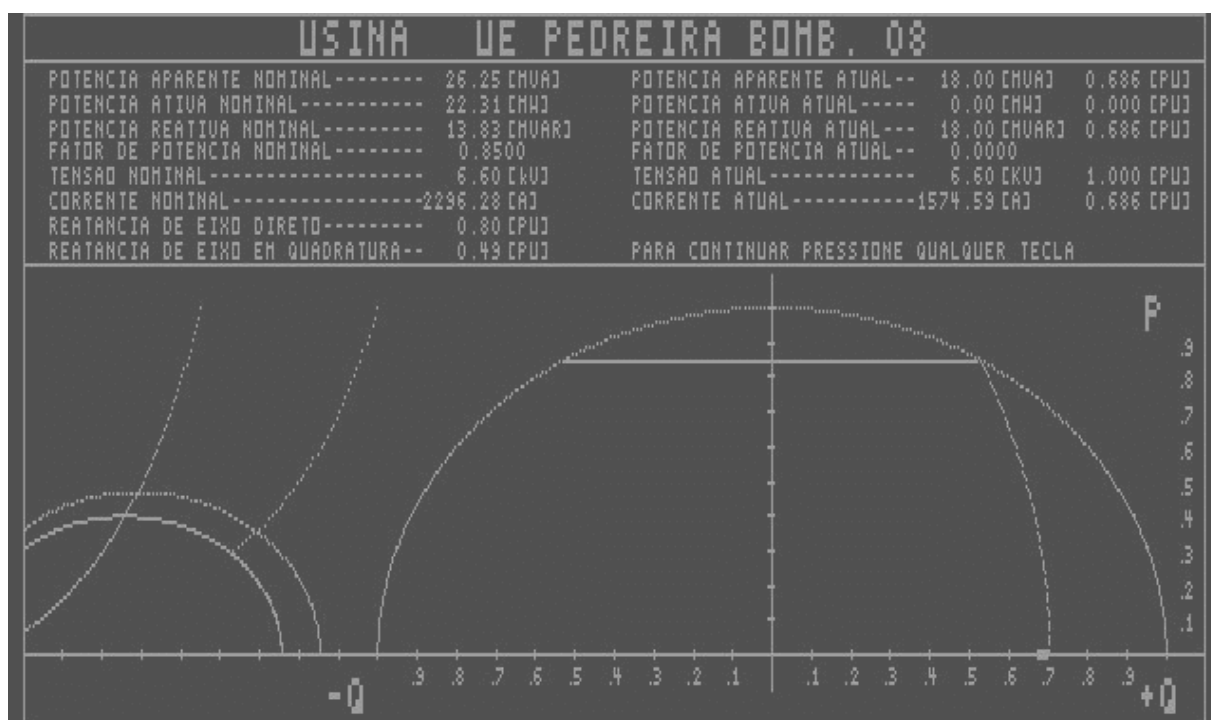
Fonte: Obtido através de literatura, referencia bibliográfica [18]

Figura D9 - Curva de capacidade das unidades 2, 3 e 7 da Usina Elevatória de Pedreira.



Fonte: Obtido através de literatura, referencia bibliográfica [18]

Figura D10 - Curva de capacidade da unidade 5 da Usina Elevatória de Pedreira.



Fonte: Obtido através de literatura, referencia bibliográfica [18]

Figura D11 - Curva de capacidade da unidade 8 da Usina Elevatória de Pedreira.