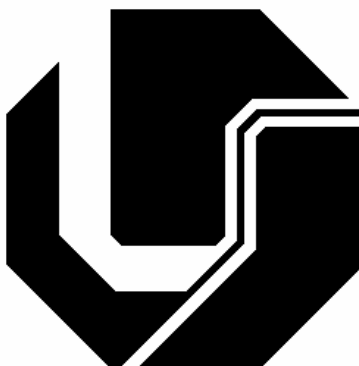


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**ESTUDO DE POTÊNCIA REATIVA, TENSÃO, CONTINGÊNCIA E PERDAS**  
**EM EMPRESAS DE ENERGIA ELÉTRICA LOCALIZADAS NA GRANDE**  
**SÃO PAULO.**

**WALTER RAGNEV**

**JUNHO**  
**2005**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTUDO DE POTÊNCIA REATIVA, TENSÃO, CONTINGÊNCIA E PERDAS EM  
EMPRESAS DE ENERGIA ELÉTRICA LOCALIZADAS NA GRANDE SÃO PAULO.**

Dissertação apresentada por Walter Ragnev à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências. Aprovada em 24/06/2005 pela banca examinadora:

**Prof. José Roberto Camacho, PhD (UFU) – Orientador;**

**Prof. Alexandre Rocco, Dr (USP/UNISANTA);**

**Prof. Carlos Henrique Salerno, Dr (UFU);**

**Prof. Sebastião Camargo Guimarães Jr., Dr(UFU).**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

R143e Ragnev, Walter, 1964-

Estudo de potência reativa, tensão, contingência e perdas em empresas de energia elétrica localizadas na Grande São Paulo / Walter Ragnev. - Uberlândia, 2005.

125f. : il.

Orientador: José Roberto Camacho.

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

Inclui bibliografia.

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

CDU:621.311(043.3)

**ESTUDO DE POTÊNCIA REATIVA, TENSÃO, CONTINGÊNCIA E  
PERDAS EM EMPRESAS DE ENERGIA ELÉTRICA  
LOCALIZADAS NA GRANDE SÃO PAULO**

**WALTER RAGNEV**

Dissertação apresentada por Walter Ragnev à Universidade Federal de Uberlândia  
para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. José Roberto Camacho, Ph.D.  
Orientador

Prof. Darizon Alves de Andrade, Ph.D.  
Coordenador do Curso de Pós Graduação

*Aos meus pais Athanasio Ragnev (in Memoriam) e  
Ana Ragnev, a minha esposa Andréa de Paula  
Ferrer Ragnev e aos meus filhos Mariana de Paula  
Ragnev e Vinícius de Paula Ragnev.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus por me prover condições e oportunidade de desenvolver este trabalho.

À minha mãe pelo apoio incondicional prestado durante todo o meu estudo. Este momento alcançado também é mérito seu.

À minha esposa Andréa de Paula Ferrer Ragnev pelo amor, incentivo, paciência, renúncia, apoio e compreensão.

Aos meus filhos Mariana de Paula Ragnev e Vinícius de Paula Ragnev que também contribuíram com renúncias, carinho e atenção.

Ao meu orientador professor José Roberto Camacho pelo ensinamento, orientação acadêmica e por sua dedicação ao longo do desenvolvimento desse trabalho. Nesse tempo de convivência criou uma verdadeira admiração como pessoa e como professor, além de uma grande amizade.

Aos meus amigos João Marcos Brito da Silva, Carlos Roberto Bastelli e Edval Delbone pelo incentivo e ajuda dada ao longo do trabalho.

Aos Engº Jack Polakicwicz da EMAE, Erasmo Fontana, José Maciel Filho e Fabio Fonseca da CTEEP e João Carlos Martins da AES-Eletropaulo pelas informações fornecidas para o desenvolvimento do trabalho.

Ao amigo Daniel Borges Ricardo pela ajuda no desenvolvimento computacional ao longo do trabalho.

## **RESUMO**

Com o crescimento acelerado do setor de energia elétrica no Brasil a partir de meados do século XX, o problema do controle de tensão nos sistemas de transmissão e distribuição necessitou de uma maior atenção das empresas de energia elétrica, dos órgãos responsáveis pelo gerenciamento do setor elétrico e dos consumidores, uma vez que a limitação do fluxo de potência reativa nas linhas começou a causar dificuldades na operação dos sistemas na medida do crescimento das cargas e das tensões nas linhas de transmissão.

O presente trabalho mostra um estudo teórico e simulações computacionais da utilização das máquinas síncronas da Usina Elevatória de Pedreira como compensadores síncronos, usina esta localizada no coração de um grande centro consumidor (a cidade de São Paulo). Utilizar estas máquinas como compensadores síncronos tem como objetivo inicial melhorar os níveis de tensão na área do entorno da usina. Foram consideradas configurações operativas que possibilitam a geração de potência reativa na Usina Elevatória de Pedreira com conseqüente melhoria nos indicadores de desempenho do restante do sistema. Os resultados obtidos a partir dos estudos realizados apontam para as seguintes melhorias: nível de tensão mais adequado; redução das perdas elétricas; diminuição do fluxo de potência reativa no sistema (linhas e transformadores); redução na geração de potência ativa para atendimento das cargas da região; alívio dos demais compensadores síncronos do sistema; e aumento na confiabilidade do sistema em caso de contingência. Para finalizar faz-se uma comparação dos custos evitados para o sistema, mudando-se apenas a filosofia de operação, sem custos de novos investimentos em equipamentos de compensação de reativos.

**Palavras chave:** controle, limites de tensão, máquina síncrona, potência reativa, qualidade de energia, topologia de sistemas.

## **ABSTRACT**

In the middle of the 20<sup>th</sup> century the Brazilian electrical energy sector experienced a rapid growth, since that occasion the problem of voltage control in the transmission and distribution systems grabbed the attention of energy authorities, electrical sector offices and high voltage consumers. With the limitation of reactive power in transmission lines this started to be the reason of difficulties in the system operation at the same pace of the increase of loads and system voltage level along the system.

The present work shows the theoretical study of the synchronous machines at the Pedreira pumping/generating station as synchronous compensators, the station is located at the heart of a huge consumer center (São Paulo and adjacencies). The use of these machines as synchronous compensators has the primary objective to improve the voltage levels in the station surroundings. Operative configurations were considered to allow the generation of reactive power at the Pedreira pumping/generating station for the system improvement. The research show the following factors of improvement in the area: increase in voltage levels; reduction of electrical losses; decrease in flux of reactive power in the system (transmission lines and transformers); decrease in active power generation for the supply of loads in the area; decrease in reactive power generated by other nearby synchronous compensators; and increase in system reliability during contingencies. Finally a comparison of system avoided costs is made, with the only change being the system operating philosophy, without investment costs in reactive power compensation equipment.

**Keywords:** control, energy quality, reactive power, synchronous machine, systems topology, voltage limits.



**SUMÁRIO**

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	A definição do problema .....	2
2	TEORIA DOS COMPONENTES DO SISTEMA .....	8
2.1	A linha de transmissão.....	8
2.2	A máquina síncrona .....	10
2.3	Efeito da excitação da máquina síncrona .....	11
2.4	Curva de capacidade do gerador .....	15
2.4.1	Limite de aquecimento da armadura .....	15
2.4.2	Limite de aquecimento do enrolamento de campo .....	16
2.4.3	Limite de potência da turbina .....	17
2.4.4	Limite de estabilidade .....	18
2.4.5	Limite de excitação mínima .....	20
2.5	Compensador síncrono .....	21
2.6	Curva V de um motor síncrono .....	23
3	O SISTEMA ELÉTRICO .....	25
3.1	O sistema elétrico em estudo.....	25
3.2	Linhas de transmissão do sistema .....	29
3.3	Transformadores do sistema .....	31

3.4	Compensadores síncronos .....	32
3.4.1	Compensador síncrono de Ibiúna .....	32
3.4.2	Compensador síncrono de Embu-Guaçu.....	33
3.4.3	Compensador síncrono de Tijuco Preto .....	33
3.4.4	Compensador síncrono de Santo Ângelo .....	34
3.5	Usinas do sistema .....	34
3.5.1	Usina Hidroelétrica Henry Borden .....	34
3.5.1.1	Usina externa .....	36
3.5.1.2	Usina subterrânea.....	37
3.5.2	Usina Termoeletrica Piratininga.....	38
3.5.3	Usina Termoeletrica Nova Piratininga .....	40
3.5.4	Usina Elevatória de Traição .....	41
3.5.5	Usina Elevatória de Pedreira .....	42
3.5.5.1	Ensaio nas máquinas da Usina Elevatória de Pedreira .....	44
3.5.5.2	Análise dos ensaios das unidades da UEP.....	47
3.6	Cargas do sistema .....	47
3.7	Operação do sistema .....	52
3.7.1	Área de 230kV e 88kV .....	52
3.7.2	Área de 345kV e 440kV .....	54
4	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....	56
4.1	Introdução.....	56
4.2	O programa ANAREDE .....	56

4.2.1 Programa de fluxo de potência .....	57
4.2.1.1 Função do programa .....	57
4.2.1.2 Algoritmo do programa .....	57
4.3 Configurações estudadas .....	58
4.3.1 Configuração elétrica do caso nº 1 .....	59
4.3.2 Configuração elétrica do caso nº 2 .....	60
4.3.3 Configuração elétrica do caso nº 3 .....	61
4.3.4 Configuração elétrica do caso nº 4 .....	62
4.4 Cargas analisadas .....	63
4.5 Contingências analisadas.....	64
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	66
5.1 Introdução.....	66
5.2 Resultados de potência gerada e tensões.....	66
5.2.1 Período de carga pesada.....	66
5.2.2 Período de carga média .....	70
5.2.3 Período de carga leve .....	73
5.3 Análise do reativo gerado pelos síncronos .....	75
5.3.1 Período de carga pesada .....	75
5.3.2 Período de carga média .....	77
5.3.4 Período de carga leve .....	78
5.4 Aumento na capacidade das linhas de transmissão e transformadores .....	80
5.4.1 Linhas de 88kV Henry Borden – Baixada circuitos nº 1 a 4 .....	80

5.4.2 Banco de transformadores de 88/345kV da SE Baixada .....	81
5.4.3 Banco de transformadores de 88/230kV da SE Piartininga.....	81
5.5 Perdas elétricas no sistema entorno da Usina Elevatória de Pedreira .....	82
5.6 Análise das contingências.....	85
5.6.1 Perda de um banco de 345/88kV – 400MVA da SE Baixada.....	85
5.6.2 Perda das duas linhas 230kV Piratininga – Interlagos (circuitos 1 e 2 )...	87
5.6.3 Perda de um banco de transformador de 230/88kV da SE Piratininga.....	90
5.6.4 Perda de uma linha de 88kV Henry Borden – Pedreira .....	91
6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS .....	94
6.1 Conclusões .....	94
6.2 Propostas para futuros trabalhos .....	97
Bibliografia .....	99
Anexo A – Usina Elevatória de Pedreira .....	101
Anexo B – Usina Hidroelétrica Henry Borden .....	117
Anexo C – Usina Termoelétrica Piratininga .....	120
Anexo D – Usina Termoelétrica Nova Piratininga .....	122
Anexo E – ETD's Varginha, Rio Bonito e Imigrantes .....	123

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1.1	- Gráfico de tensão da ETD Imigrantes – TR1 .....	6
Figura 1.2	- Gráfico de tensão da ETD Rio Bonito .....	7
Figura 2.1	- Circuito equivalente de um gerador CA .....	11
Figura 2.2	- Circuito equivalente simplificado de um gerador CA.....	12
Figura 2.3	- Circuito para um gerador e um motor.....	12
Figura 2.4	- Diagrama fasorial do gerador.....	13
Figura 2.5	- Diagrama fasorial do motor.....	14
Figura 2.6	- Limite de aquecimento da armadura.....	16
Figura 2.7	- Limite de aquecimento do enrolamento de campo.....	17
Figura 2.8	- Limite de potência na turbina.....	18
Figura 2.9	- Limite de estabilidade imposto como valor máximo do ângulo de potência	19
Figura 2.10	- Efeito da margem de estabilidade em potência no valor de $\delta$ max.....	20
Figura 2.11	- Limite mínimo de excitação.....	20
Figura 2.12	- Curva de capacidade de geração.....	21
Figura 2.13	- Curva V de um motor síncrono.....	24
Figura 3.1	- Localização da região em estudo .....	25
Figura 3.2	- Detalhe da região em estudo.....	26

---

## Índice de figuras

---

Figura 3.3	- Diagrama elétrico da região estudada.....	27
Figura 3.4	- Foto via satélite com a localização da UEP.....	42
Figura 3.5	- Cargas da barra nº 485 – SE Piratininga.....	49
Figura 3.6	- Cargas da barra nº 481 – ETU Henry Borden .....	50
Figura 3.7	- Cargas nas barras Imigrantes (3499), Varginha I e II (3488 e 3489) e Rio Bonito (3492).....	51
Figura 4.1	- Configuração elétrica do caso nº 1.....	60
Figura 4.2	- Configuração elétrica do caso nº 2.....	61
Figura 4.3	- Configuração elétrica do caso nº 3.....	62
Figura 4.4	- Configuração elétrica do caso nº 4.....	63
Figura 5.1	- Diagrama elétrico das perdas .....	83
Figura A1	- Diagrama elétrico ETU Pedreira .....	101
Figura A2	- Vista superior da Usina Elevatória de Pedreira .....	102
Figura A3	- Vista em corte das unidades reversíveis da UEP .....	103
Figura A4	- Detalhes do sistema de refrigeração e aquecimento das unidades da Usina Elevatória Pedreira .....	104
Figura A5	- Curva de operação da unidade nº 2 da UEP.....	105
Figura A6	- Gráfico de operação da unidade nº 2 da UEP.....	106
Figura A7	- Curva V da unidade nº 2 da UEP.....	107
Figura A8	- Curva V da unidade nº 5 da UEP.....	108
Figura A9	- Gráfico de operação da unidade nº 4 da UEP.....	109
Figura A10	- Curva de operação da unidade nº 4 da UEP.....	110

---

Figura A11	- Gráfico de operação da unidade nº 5 da UEP.....	111
Figura A12	- Curva de operação da unidade nº 5 da UEP.....	112
Figura A13	- Curvas características da unidade nº 4 da UEP.....	113
Figura A14	- Curvas características da unidade nº 2 da UEP.....	114
Figura A15	- Curva de capacidade das unidades nº 1 e 6 da UEP.....	115
Figura A16	- Curva de capacidade das unidades nº 2, 3 e 7 da UEP.....	115
Figura A17	- Curva de capacidade da unidade nº 5 da UEP .....	116
Figura A18	- Curva de capacidade da unidade nº 8 da UEP .....	116
Figura B1	- Diagrama elétrico da ETU Henry Borden .....	117
Figura B2	- Curva de capacidade das unidades de 35 MW de UHB.....	118
Figura B3	- Curva de capacidade das unidades de 65 MW de UHB .....	118
Figura B4	- Curva de capacidade das unidades de 66 MW de UHB.....	119
Figura B5	- Curva de capacidade das unidades de 70 MW de UHB.....	119
Figura C1	- Curva de capacidade das unidades nº 1 e 2 da UTP .....	120
Figura C2	- Curva de capacidade das unidades nº 3 e 4 da UTP .....	121
Figura D1	- Curva de capacidade das unidades geradoras da UTNP.....	122
Figura E1	- Diagrama elétrico da ETD Varginha .....	123
Figura E2	- Diagrama elétrico da ETD Rio Bonito.....	124
Figura E3	- Diagrama elétrico da ETD Imigrantes.....	125

## **ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 3.1	- Valores dos parâmetros das linhas.....	30
Tabela 3.2	- Características dos transformadores do sistema.....	32
Tabela 3.3	- Características dos geradores da UHB Externa.....	36
Tabela 3.4	- Características dos geradores da UHB subterrânea.....	37
Tabela 3.5	- Característica das turbinas da usina termoeletrica Piratininga.....	39
Tabela 3.6	- Características dos geradores da usina termoeletrica Piratininga.....	40
Tabela 3.7	- Características das unidades reversíveis da Usina Elevatória de Pedreira.....	43
Tabela 3.8	- Valores das unidades da UEP como bomba capacitiva.....	45
Tabela 3.9	- Valores das unidades da UEP como bomba indutiva.....	45
Tabela 3.10	- Valores das unidades da UEP como síncrono sobreexcitado.....	46
Tabela 3.11	- Valores das unidades da UEP como síncrono subexcitado.....	46
Tabela 3.12	- Comparação entre o turbinamento de UEP e UHB.....	47
Tabela 3.13	- Faixas para controle de tensão nos barramentos de controle área São Paulo.....	55
Tabela 5.1	- Resultados da geração período de carga pesada.....	67
Tabela 5.2	- Tensão nas barras mês de fevereiro carga pesada.....	69
Tabela 5.3	- Tensão nas barras mês de julho carga pesada.....	69
Tabela 5.4	- Tensão nas barras mês de agosto carga pesada.....	69



---

Tabela 5.5	- Resultados da geração período de carga média.....	71
Tabela 5.6	- Tensão nas barras mês de fevereiro carga média.....	72
Tabela 5.7	- Tensão nas barras mês de julho carga média.....	72
Tabela 5.8	- Tensão nas barras mês de agosto carga média.....	72
Tabela 5.9	- Resultados da geração período de carga leve.....	73
Tabela 5.10	- Tensão nas barras mês de fevereiro carga leve.....	74
Tabela 5.11	- Tensão nas barras mês de julho carga leve.....	74
Tabela 5.12	- Tensão nas barras mês de agosto carga leve.....	74
Tabela 5.13	- Resultados da geração dos síncronos no período de carga pesada.....	76
Tabela 5.14	- Resultados da geração dos síncronos no período de carga média.....	77
Tabela 5.15	- Resultados da geração dos síncronos no período de carga leve.....	79
Tabela 5.16	- Fluxo de potência reativa nas linhas 88kV HB-Baixada circuitos 1 a 4.....	80
Tabela 5.17	- Fluxo de potência reativa nos bancos da SE Baixada.....	81
Tabela 5.18	- Fluxo de potência reativa nos bancos da SE Piratininga.....	82
Tabela 5.19	- Perdas na região no período de carga leve.....	84
Tabela 5.20	- Perdas na região no período de carga média.....	84
Tabela 5.21	- Perdas na região no período de carga pesada.....	84
Tabela 5.22	- Carregamento do banco remanescente – Carga leve.....	86
Tabela 5.23	- Carregamento do banco remanescente – Carga média.....	86
Tabela 5.24	- Carregamento do banco remanescente – Carga pesada.....	86
Tabela 5.25	- Tensão nas barras – Carga Pesada.....	88
Tabela 5.26	- Tensão nas barras – Carga Média.....	88

---

---

Tabela 5.27 - Geração de potência reativa na Usina Elevatória de Pedreira.....	89
Tabela 5.27 - Carregamento dos equipamentos no período de carga pesada.....	89
Tabela 5.29 - Carregamento dos equipamentos no período de carga média.....	90
Tabela 5.30 - Carregamento dos bancos remanescentes.....	90
Tabela 5.31 - Geração de potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira.....	91
Tabela 5.32 - Carregamento da linha 88kV Henry Borden – Pedreira (remanescente).....	92
Tabela 5.33 - Tensão nas barras – Carga leve.....	92
Tabela 5.34 - Tensão nas barras – Carga média.....	92
Tabela 5.35 - Tensão nas barras – Carga pesada.....	93

**LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS**

A	ampère – unidade de corrente elétrica
CA	corrente alternada
CC	corrente contínua
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CNOS	Centro Nacional de Operação do Sistema
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
CTEEP	Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
EMAE	Empresa Metropolitana de Águas e energia
ETD	Estação Transformadora de Distribuição
ETT	Estação Transformadora de Transmissão
ETU	Estação Transformadora de Usina
FP	fator de potência
GECO	General Electric Company
I	corrente elétrica
km <sup>2</sup>	quilometro quadrado – unidade de área (10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> )
kV	quilovolt – unidade de tensão elétrica (10 <sup>3</sup> V)
LT	linha de transmissão
m <sup>3</sup>	metro cúbico - unidade de volume
m	metro – unidade de distância
m <sup>3</sup> / s	metro cúbico por segundo - unidade de vazão
MVA	megavoltampere – unidade de potência aparente (10 <sup>6</sup> VA)

## Lista de Símbolos e Abreviaturas

---

MVAr	megavolt-ampére reativo – unidade de potência reativa ( $10^6$ VAr)
MW	megawatt – unidade de potência ativa ( $10^6$ W)
MW.h	megawatt-hora – unidade de energia elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
Pmec	Potência mecânica
Ppri	Potência primária
pu	por unidade
rpm	unidade de velocidade - rotação por minuto
SE	Subestação
UEP	Usina Elevatória de Pedreira
UET	Usina Elevatória de Traição
UHB	Usina Hidroelétrica Henry Borden
UNP	Usina Termoeletrica Nova Piratininga
UTP	Usina Termoeletrica Piratininga
V	Volt – unidade de tensão elétrica
$X'd$	Reatância subsíncrona do eixo d
$X'q$	Reatância subsíncrona do eixo q
$X_d$	Reatância síncrona do eixo d
$X_q$	Reatância síncrona do eixo q
$\delta$	ângulo de potência do gerador
$\theta$	ângulo entre a tensão e a corrente

## **CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO**

Este capítulo inicial tem como característica principal apresentar o trabalho em sua totalidade, desde as considerações iniciais abordando o objetivo geral da dissertação até as considerações finais onde são mostrados os resultados pretendidos através deste estudo. Para isso é necessário fazer uma descrição geral da dissertação passando por um resumo de cada capítulo.

O objetivo desta dissertação de mestrado é apresentar possíveis soluções para o problema de operação do sistema elétrico no entorno da Usina Elevatória de Pedreira, onde algumas subestações de distribuição de energia elétrica apresentam baixos valores de tensão em suas barras de 88kV. No desenvolvimento da dissertação foi estudada a utilização das unidades reversíveis da Usina Elevatória de Pedreira para a geração de energia reativa, mantendo as demais condições técnicas de operação do sistema elétrico.

Para melhor compreender o assunto abordado, segue-se a descrição da estrutura em capítulos desta dissertação de mestrado.

Neste primeiro capítulo também é descrito o trabalho com o objetivo de familiarizar o leitor ao assunto e à forma como o mesmo encontrará a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo, “Teoria dos Componentes do Sistema” são desenvolvidos aspectos teóricos dos principais equipamentos elétricos utilizados no sistema em estudo. Aqui são mostradas as curvas características de funcionamento de cada equipamento, seus limites de operação, e aplicações.

No capítulo III, “O Sistema Elétrico em Estudo”, é explicado através de diagramas elétricos e de tabelas de dados técnicos, incluindo as usinas de geração, usinas de

bombeamento, as linhas de transmissão, compensadores síncronos, transformadores e cargas do sistema. Aqui são mencionadas as suas características operacionais com limitações e recomendações através das instruções de operações do ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Neste capítulo também são incluídos ensaios realizados nas unidades reversíveis da Usina Elevatória de Pedreira, feitos pela LIGHT S/A.

No capítulo IV, é apresentado o programa utilizado nas simulações computacionais, o ANAREDE, programa oficial utilizado pelo ONS e empresas pertencentes do Sistema Elétrico Nacional. São considerados quatro casos possíveis da utilização do reativo gerado pela Usina Elevatória de Pedreira e são propostas as análises de algumas simulações de contingências do sistema.

No capítulo V, são expostos os resultados das simulações computacionais do capítulo IV, comparando os casos com e sem a geração de potência reativa na Usina Elevatória de Pedreira, analisando sob a ótica dos seguintes pontos: nível de tensão, geração de potência ativa, geração de potência reativa, sobrecargas de equipamentos, alívio dos compensadores síncronos e perdas no sistema e comportamento no caso de contingências.

No último capítulo são descritas as conclusões obtidas no estudo, indicando as melhorias obtidas com a utilização da Usina Elevatória de Pedreira.

### **1.1 A definição do problema.**

A questão da compensação reativa e sua influência na tensão de um determinado sistema de potência são assuntos que vêm sendo discutidos entre os especialistas do setor de energia elétrica durante algum tempo. Neste 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, propiciando adequadamente o equilíbrio no balanço entre a geração e o consumo de potência reativa e desse modo disponibilizando para a operação, uma condição adequada de controle de tensão e, principalmente, o atendimento ao sistema.

Sendo assim, o desejo de se controlar a tensão é justificável, pois praticamente todos os equipamentos utilizados num sistema de potência são projetados para funcionar num dado nível de tensão, a tensão nominal ou tensão de placa. Se a tensão do sistema afastar-se desse valor, o desempenho desses equipamentos, bem como sua expectativa de vida, diminui. Por exemplo, o conjugado de um motor de indução é proporcional ao quadrado da tensão aplicada, o fluxo luminoso de uma lâmpada varia fortemente com a tensão, entre outros. São, portanto, fortes, os motivos que levam a controlar o nível de tensão em um sistema elétrico. Entretanto, não há necessidade de controlá-lo mantendo-o entre estreitos limites, como o que ocorre com a frequência. Existem padrões industriais que fixam as variações toleráveis da tensão da rede, em valores relativamente amplos.

Diante disto, assim como a constância da frequência do sistema é a melhor garantia de que o balanço da potência ativa está sendo mantido no sistema, um perfil praticamente constante de tensão de barra garante que o equilíbrio entre a potência reativa produzida e consumida, também está sendo mantido. Sempre que o módulo de uma dada tensão sofrer variações, isso significará que o balanço de reativo está comprometido no entorno da barra analisada.

Deve-se deste modo, observar que o controle do fluxo de reativo é geralmente um problema local, em contraste com o controle do fluxo de potência ativa, que é um problema do sistema. Devido aos numerosos fatores interagentes, incluindo taps do transformador, capacitores, reatores, controle de tensão pelos geradores, e geração ou absorção de reativo na linha de transmissão, o não atendimento dos requisitos de reativo em uma área pode resultar em

tensão baixa ou alta naquela área, sendo necessário assim a utilização de equipamentos para corrigir este problema.

Devido à diversidade de problemas, o aspecto econômico do controle automático de tensão e reativo, enquanto seja possível, pode ser muito oneroso sob o ponto de vista de equipamentos de controle, quando necessário.

Portanto, durante a realização deste trabalho, pode ser verificada a questão do nível de tensão abaixo do adequado em algumas barras do sistema de sub-transmissão de 88kV da AES – Eletropaulo. Este baixo valor de tensão não se justifica, pois um estudo bem elaborado dos equipamentos ociosos da EMAE poderia resolver o problema. O sistema como se encontra hoje é de causar preocupação uma vez que a EMAE é uma das empresas que atende o principal centro consumidor de energia elétrica do país. Um outro aspecto importante e bastante relevante a ser considerado neste estudo é o fato que as linhas adjacentes ao sistema EMAE, são linhas curtas e que não contribuem de forma apreciável para geração de reativos em carga leve, não ajudando assim com o problema de baixo perfil de tensão até mesmo nesta situação.

Diante dessa situação, para se corrigir este problema, foi feito um estudo para a utilização de alguns geradores da empresa EMAE que se encontram ociosos e que podem vir a funcionar como fonte de reativos (compensadores síncronos), contribuindo assim para a manutenção do perfil correto de tensão em algumas barras do sistema, e tendo como vantagem a utilização de recursos próprios da empresa, não havendo aí a necessidade de grandes custos adicionais para se corrigir tal problema. Um exemplo é o caso da UEP (Usina Elevatória de Pedreira) que ficou ligada ao sistema no ano de 2004, funcionando como motor e bombeando água apenas 2,84% do tempo. Sendo que no restante do tempo ficou parada, consumindo uma energia de 518,3 MW.h, com um custo de R\$ 40.427,00, somente para manter seus enrolamentos



aquecidos evitando que estes absorvessem umidade, o que diminuiria a sua vida útil.

As ETD's – Estação Transformadoras de Distribuição de Imigrantes, Varginha e Rio Bonito, pertencentes a AES - Eletropaulo, apesar de estarem próximas a usinas de geração de energia elétrica, apresentam tensões baixas nos seus barramentos de 88kV, o que obriga a empresa a fazer a compensação de tensão através de seus transformadores de potência e banco de capacitores, o que as vezes não é suficiente. A ETD Imigrantes possui transformador sem tap de regulação de tensão, o que faz com que a baixa tensão no 88kV se reflita na tensão primária de distribuição, 13,8kV.

Conforme informação da AES - Eletropaulo, com a ocorrência de tensões baixas nas suas ETD's é comum o aumento de reclamação dos consumidores, como é o caso da SABESP – Companhia de Saneamento Básico de São Paulo, que tem bombas de grande potência para captação de água, ligadas na rede de 13,8kV e que com tensões baixas é comum a atuação do seu sistema de proteção.

A seguir são mostrados dois gráficos, fornecidos pela AES - Eletropaulo, das ETD's Imigrantes e Rio Bonito ao longo do mês de dezembro de 2002, aonde pode-se observar o perfil de tensão nestas estações transformadoras.

**ETD Imigrantes - TR-1**  
01/11/2002 à 30/11/2002

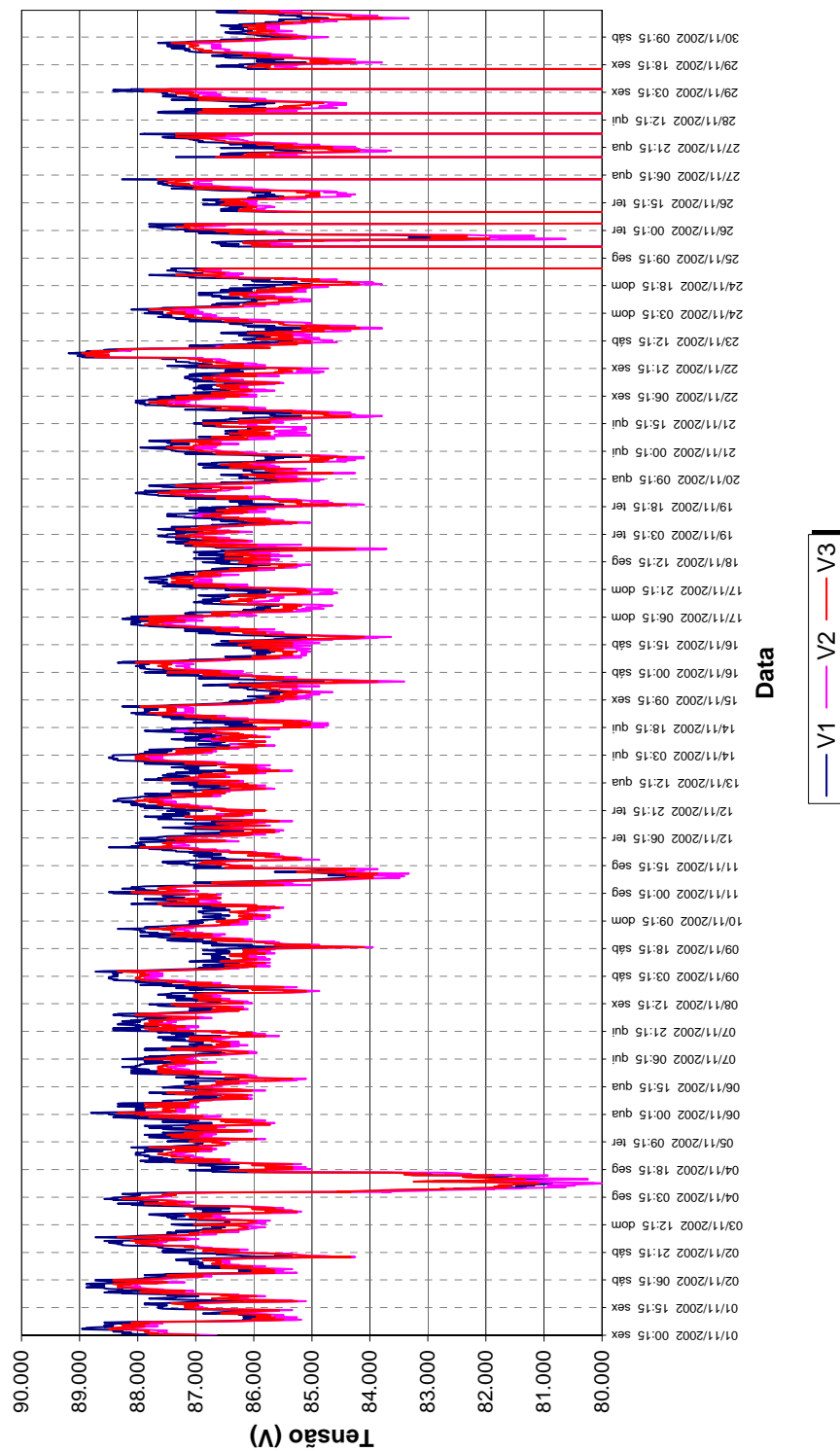


Figura 1.1 – Gráfico de tensão da ETD Imigrantes – TR1  
(obs: V1; V2; V3 → tensões nas fases Azul, Branca e Vermelha)

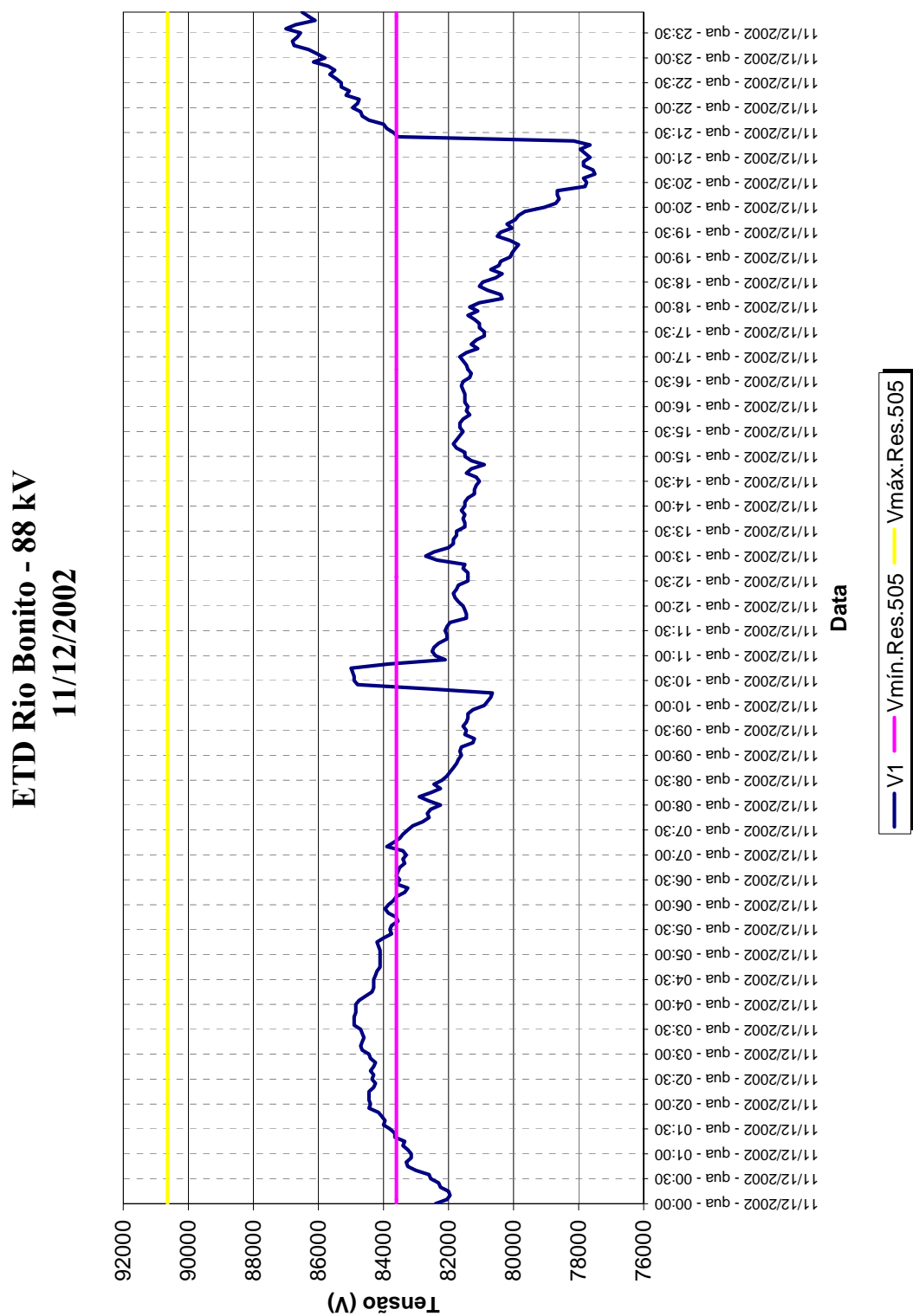


Figura 1.2 – Gráfico de tensão na ETD Rio Bonito.

## **CAPÍTULO II – TEORIA DOS COMPONENTES DO SISTEMA**

### **2.1 A Linha de Transmissão**

Um dos principais problemas enfrentados na operação de grandes sistemas elétricos consiste na obtenção de valores nominais de tensão em todas as barras nos diversos níveis de tensão e nos pontos extremos de linhas de transmissão muito longas, isto é:

- Linhas de transmissão (LT's) muito longas quando à vazio ou carga reduzida, devido ao seu efeito capacitivo, aumentam a tensão à medida que se caminha do início para o fim das mesmas, ou seja, no sentido da geração para o consumidor.

- Linhas de transmissão muito longas quando carregadas, devido ao efeito indutivo próprio e do fator de potência tipicamente indutivo da carga, diminuem a tensão à medida que se caminha do início para o fim das mesmas, ou seja, no sentido da geração para o consumidor.

No primeiro caso, a fim de reduzir o efeito capacitivo, é comum a utilização de reatores que são conectados às linhas de transmissão.

Os reatores nada mais são que indutâncias cuja finalidade é anular uma parcela do efeito capacitivo da linha de transmissão e desta forma reduzir o aumento de tensão que este efeito provoca.

Os reatores não possuem regulação. Uma vez ligados à linha de transmissão, o operador não tem mais como alterar seu efeito sobre a mesma, e assim a sua potência reativa indutiva tem um valor fixo. Por esta razão uma forma de variar a tensão no lado receptor da LT, é variar a tensão de geração das máquinas síncronas pelo controle da excitação.

Existem casos também em que se recorre às manobras de linhas de tal forma que a alteração da configuração do sistema concorra para a variação do valor da tensão nos extremos das mesmas.

No segundo caso, quando as linhas de transmissão estão muito carregadas (horário de ponta de carga), devido ao efeito indutivo que elas possuem e ao efeito indutivo da carga ocorrerá a diminuição da tensão nos extremos das mesmas.

A fim de compensar estas quedas é necessário que a tensão de geração seja alta e também que se recorra à mudança de taps sob carga nos transformadores elevadores. Estes dois recursos possuem alguns inconvenientes, tais como:

- A tensão de geração nos limites superiores em muitos casos é prejudicial aos geradores, pois níveis de tensão mais elevados levam necessariamente a uma maior solicitação da isolação destas máquinas.
- A variação da tensão do sistema acontece devido à variação no consumo, isto fará com que transformadores com regulação automática sob carga sofram freqüentes mudanças de tap's. Isto com certeza trará desgaste prematuro dos contatos devido à alta freqüência com que são acionados.

Basicamente, portanto, é através da redução ou elevação da tensão de geração que se obtém o valor nominal de tensão em ambos os casos citados, isto é, durante períodos de ponta de carga ou fora da ponta de carga.

No entanto, estes recursos têm sérias limitações operativas quanto mais próximos de seus limites estiverem operando os geradores.

Nos sistemas de potência o controle de tensão é feito pelo despacho reativo das usinas geradoras, pelos compensadores síncronos e pelos taps dos transformadores. Este controle conta com o auxílio na distribuição dos sistemas de compensação de reativos junto à carga.

---

Os capacitores e reatores estáticos não servem para regular a tensão de forma suave, mas apenas para controlá-la de forma mais grosseira, sendo extensivamente utilizados em correção de fator de potência no nível de distribuição.

### 2.2 A Máquina Síncrona

As máquinas síncronas têm a característica de trabalhar sempre com velocidade constante e de possuir dois campos magnéticos que interagem: do estator, de corrente alternada (induzido), e do rotor, de corrente contínua (indutor). A máquina síncrona quando absorve energia mecânica e fornece energia elétrica é denominada gerador, quando absorve energia elétrica e fornece energia mecânica é denominada motor.

Como gerador dependendo de sua aplicação, ela pode diferir quanto ao aspecto construtivo. Para utilização em unidades geradoras de usinas termoeletricas, com turbinas à vapor ou turbinas à gás, cuja rotação é alta de 1800rpm a 3600rpm, seu rotor é cilíndrico, denominado de pólos lisos, ou rotor liso. Por causa da alta rotação sua refrigeração normalmente é feita através do Hidrogênio. Para utilização em unidades geradoras de usinas hidroelétricas, com turbinas Pelton, Francis ou Kaplan, cujas rotações são baixas, menores que 900rpm, seu rotor é de pólos salientes. Sua refrigeração normalmente é feita através do próprio ar ou da água.

A máquina síncrona é bastante flexível, pois pode trabalhar sobre-excitada, com a tensão de excitação (em corrente contínua) acima da nominal, absorvendo potência ativa quando trabalha como motor ou fornecendo potência ativa quando trabalha como gerador e fornecendo potência reativa para o sistema. Seu efeito físico é igual ao de um capacitor. Quando trabalha com tensão de excitação abaixo da nominal, sub-excitada, absorve potência ativa (motor) ou fornece potencia ativa (gerador) e absorve potência reativa do sistema. Seu efeito físico é semelhante ao de um indutor.

Para funcionar como compensador síncrono, a máquina é movimentada à velocidade síncrona através de passagem de água pela turbina, ou através da absorção de uma pequena potência ativa da rede para movimentar a máquina como motor. A máquina síncrona pode fornecer ou absorver potência reativa, dependendo de sua tensão de excitação.

### 2.3 Efeito da Excitação da Máquina Síncrona

A máquina síncrona pode ser representada pelo circuito equivalente abaixo, mostrado na Figura 2.1:

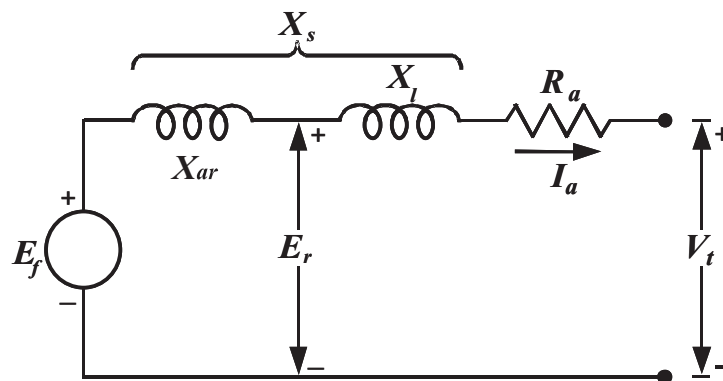


Figura 2.1 - Circuito equivalente de um gerador CA

Onde:

- $V_t \rightarrow$  Tensão nos terminais, por fase;
- $E_r \rightarrow$  Tensão equivalente no rotor;
- $E_f \rightarrow$  Tensão gerada, por fase;
- $R_a \rightarrow$  Resistência do enrolamento da armadura, por fase;
- $X_l \rightarrow$  Indutância da armadura que representa o fluxo disperso, por fase;
- $X_{ar} \rightarrow$  Indutância que representa a reação da armadura, por fase.

A soma das indutâncias  $X_{ar}$  e  $X_l$  é chamada de reatância síncrona ( $X_s$ ), então o circuito equivalente, mostrado na Figura 2.2, fica:

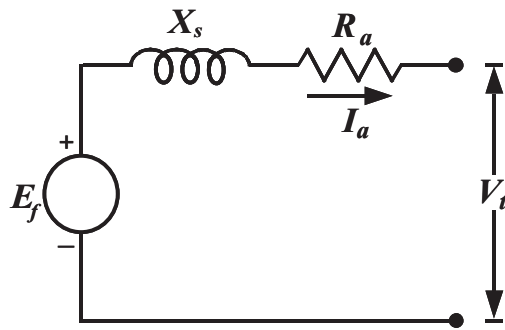


Figura 2.2 - Circuito equivalente simplificado de um gerador CA

Como  $R_a$  normalmente é bem menor que  $X_s$  o circuito contendo um gerador e um motor síncrono pode ser reduzido para:

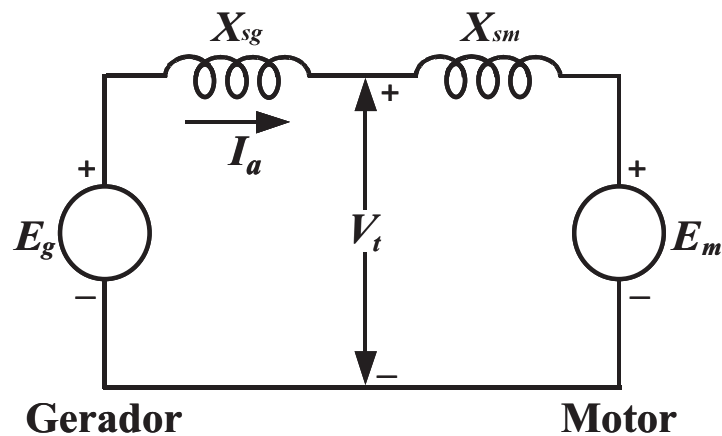


Figura 2.3 - Circuito para um gerador e um motor

Onde:

$X_{sg}$  = Reatância síncrona do gerador

$X_{sm}$  = Reatância síncrona do motor

$I_a$  = Corrente fornecida pelo gerador e recebida pelo motor

$V_t$  = Tensão nos terminais do gerador e motor

$E_g$  = Tensão gerada pelo gerador



$E_m$  = Tensão recebida pelo motor

A variação da excitação da máquina síncrona constitui um fator importante para o controle do fluxo de potência reativa. Considere um gerador síncrono ligado a um grande sistema de potência, no qual a tensão na barra terminal  $V_t$  seja constante. Se for mantida constante a potência ativa do gerador para o sistema, a parcela  $|V_t| \cdot |I_a| \cos\theta$  permanecerá aproximadamente constante, quando é variada a excitação de campo CC, e com isso variando-se  $|E_g|$ , tem-se:

$$|E_g| \cos\delta = V_t \quad (2.1)$$

onde:

$\delta$  = é o ângulo de conjugado ou ângulo de potência da máquina.

O gerador, quando está sobreexcitado, fornece corrente atrasada em relação à tensão do sistema. Como um capacitor, ela fornece potência reativa ao sistema. Observa-se neste caso que  $|E_g| > |V_t|$ .

O gerador quando está subexcitado, fornece corrente adiantada em relação à tensão do sistema. O gerador subexcitado recebe potência reativa do sistema. Esta ação pode ser explicada pela fmm interna e pela corrente adiantada da tensão terminal. Observa-se que neste caso  $|E_g| < |V_t|$ .

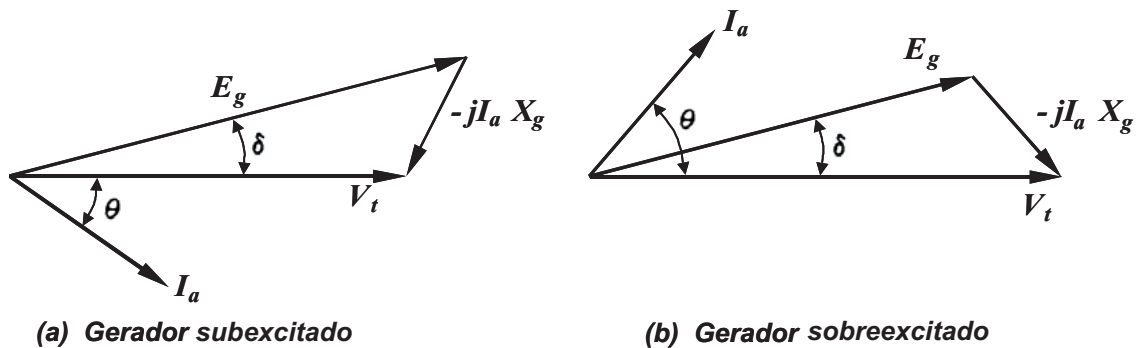


Figura 2.4 - Diagrama fasorial do gerador (a) subexcitado (b) sobreexcitado.

O motor síncrono sobreexcitado, solicita corrente adiantada em relação à tensão e se comporta como um circuito capacitivo quando visto do sistema para o qual ele fornece potência reativa, pois neste caso  $|E_m| > |V_t|$ . O motor subexcitado, solicita corrente em atraso, absorve potência reativa e se comporta tal qual um circuito indutivo quando visto do sistema, pois neste caso  $|E_m| < |V_t|$ .

Os diagramas apresentados nas Figuras 2.4 e 2.5 mostram, respectivamente, que os geradores e motores síncronos sobreexcitados fornecem potência reativa ao sistema e os geradores e motores síncronos subexcitados absorvem potência reativa do sistema.

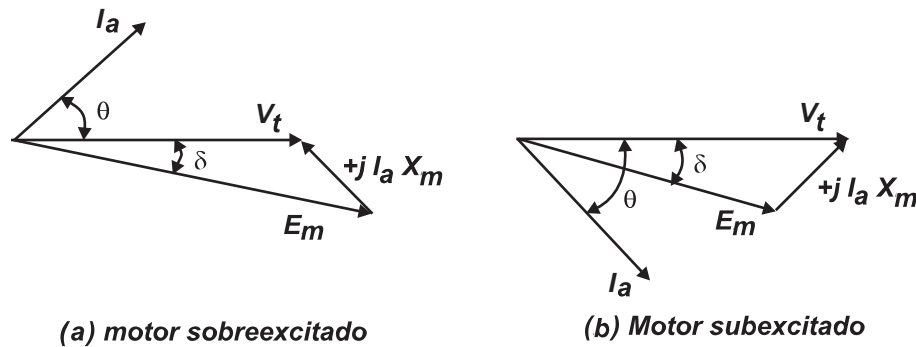


Figura 2.5 - Diagrama fasorial do motor (a) sobreexcitado (b) subexcitado

A expressão matemática das tensões da máquina síncrona, funcionando como gerador é dada pela Equação (2.2):

$$E_g = (V_t \cdot \cos \theta + I_a \cdot R_a) + j (V_t \cdot \sin \theta \pm I_a \cdot X_s), \text{ para geradores} \quad (2.2)$$

Para a máquina síncrona funcionando como motor a expressão matemática é dada pela Equação (2.3):

$$E_m = (V_t \cdot \cos \theta - I_a \cdot R_a) + j (V_t \cdot \sin \theta \pm I_a \cdot X_s), \text{ para motores} \quad (2.3)$$

Nas duas equações acima, o termo em quadratura com sinal (+) é usado para fatores de potência em avanço e com sinal (-) é usado para fatores de potência em atraso.

Onde:  $E_g$  = tensão gerada pelo gerador;

$E_m$  = tensão recebida pelo motor;

---

$X_s$  = Reatância síncrona do gerador ou motor;

$I_a$  = Corrente fornecida pelo gerador ou recebida pelo motor;

$V_t$  = Tensão nos terminais do gerador ou motor

$\theta$  = Ângulo entre a corrente  $I_a$  e a tensão  $V_t$ .

A expressão de potência ativa por fase é dada por:

$$P = V_t \cdot I_a \cdot \cos\theta \quad (2.4)$$

A expressão de potência reativa por fase é dada por:

$$Q = V_t \cdot I_a \cdot \sin\theta \quad (2.5)$$

### 2.4 Curva de Capabilidade do Gerador

A curva de capabilidade de um gerador mostra os limites de operação indicando como pode ser operado um gerador ligado a um sistema elétrico, com fornecimento de potência ativa e reativa, dentro dos limites da máquina [11].

Os limites dos geradores síncronos são:

- Aquecimento da armadura (corrente máxima de armadura);
- Aquecimento do enrolamento de campo (corrente máxima de campo);
- Potência da turbina;
- Estabilidade;
- Excitação mínima e máxima.

#### 2.4.1 Limite de Aquecimento da Armadura:

A corrente de armadura  $I$  provoca aquecimento dos enrolamentos por perdas ôhmicas por fase.

Calculadas como mostra a Equação 2.6:

$$P = R_a \cdot I^2 \quad (2.6)$$

Onde:

$R_a$  = resistência da armadura, por fase.

Nos enrolamentos da armadura a reatância síncrona tem magnitude maior do que a resistência elétrica, porém a resistência é a responsável pelo aquecimento dos enrolamentos. Ela pode ser responsável pela limitação da potência máxima fornecida em algumas situações de operação.

Na Figura 2.6 é mostrado um exemplo da influência do limite de aquecimento na potência ativa máxima fornecida pela máquina. Considerando uma máquina conectada a uma barra infinita com tensão  $V_t$ , a corrente de armadura é responsável pelo aquecimento da máquina e do valor da potência aparente (MVA) fornecida pela máquina, que dependendo do ângulo  $\theta$  teremos uma limitação da potência ativa fornecida pela máquina.

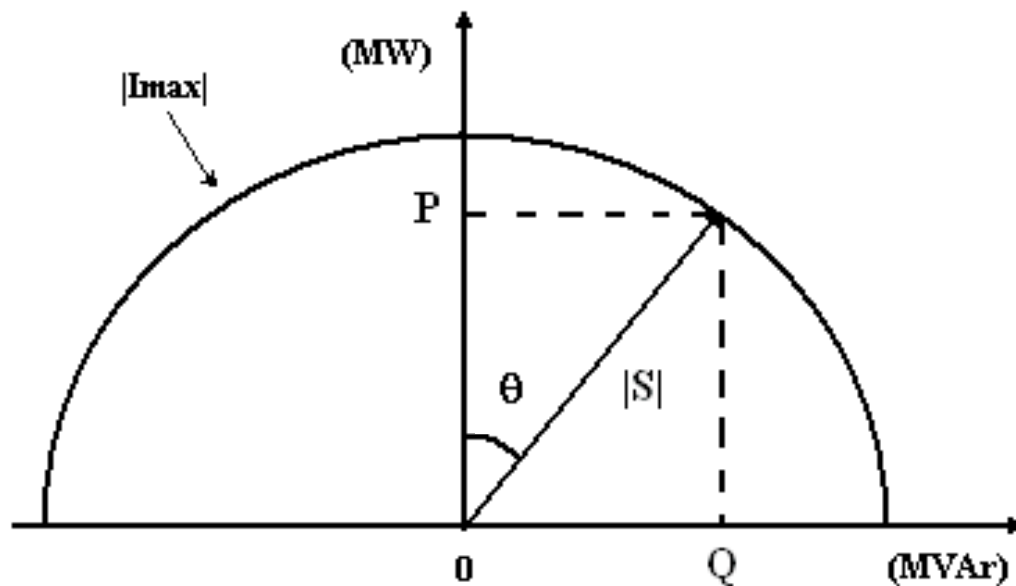


Figura 2.6 – Limite de aquecimento da armadura (corrente de armadura)

### 2.4.2 Limite de Aquecimento do Enrolamento de Campo

O enrolamento do campo alojado no rotor do gerador síncrono pode sofrer aquecimento devido às perdas ôhmicas por fase dada pela Equação (2.7):

$$P = R_f \cdot I_f^2 \quad (2.7)$$

Onde  $R_f$  = resistência do enrolamento de campo;

---

$I_f$  = corrente de campo.

O limite de aquecimento do enrolamento de campo aparece na Figura 2.7 como um segmento de circunferência com centro no ponto  $O'$  e raio  $\frac{E_f \cdot V_f}{X_s}$ , onde  $E_f$  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.

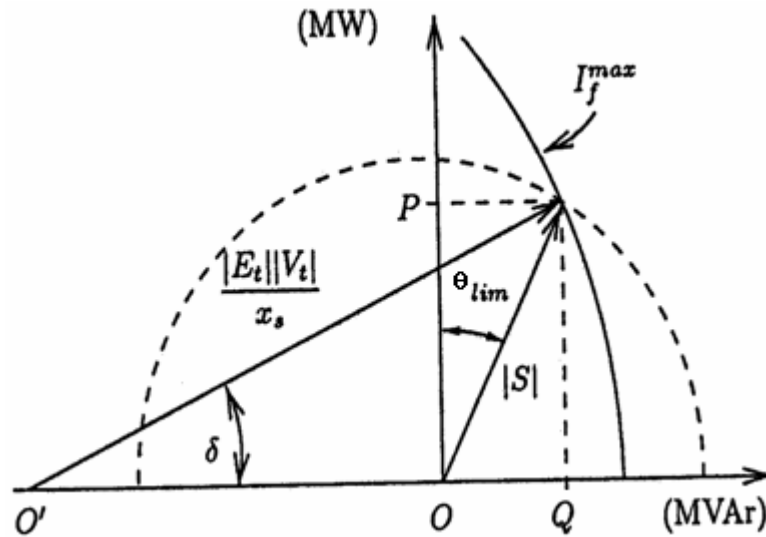


Figura 2.7 - Limite de aquecimento do enrolamento de campo (corrente de campo máxima)

#### 2.4.3 Limite de Potência da Turbina.

Existe uma limitação imposta sobre a potência que o gerador pode receber da turbina. A potência mecânica que a turbina fornece ao eixo da máquina síncrona é dada por:

$$P_{mec} = T \cdot \omega_s \quad (2.8)$$

Onde:

$$T = \text{torque}; \omega_s = \text{velocidade angular mecânica} = \frac{2\pi f}{p}, \text{ onde } f \text{ é a frequência e } p \text{ o}$$

número de pares de pólos da máquina.

Na Figura 2.8 mostra esse limite na forma de um valor máximo de potência ativa gerada pela máquina. Dependendo das características da máquina, esse limite pode ser mais ou menos restritivo que o limite imposto pelo aquecimento da armadura. No exemplo da figura o limite está mais restritivo.

O limite de potência de turbina só afeta a potência ativa, pois a energia líquida associada à potencia reativa é nula. A energia elétrica fornecida ao sistema é igual à energia mecânica fornecida ao eixo, descontadas as perdas.

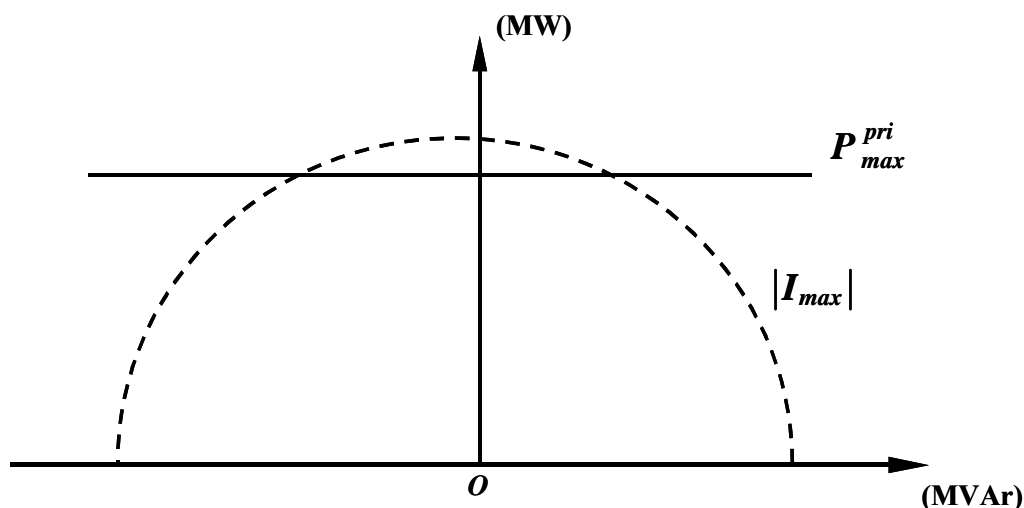


Figura 2.8 – Limite de potência na turbina

### 2.4.4 Limite de Estabilidade

O limite de estabilidade é imposto pelo ângulo de potência máximo permitido,  $\delta_{max}$ . Este tipo de limite está ilustrado na Figura 2.9 para duas situações distintas: ponto  $O'$  dentro da região viável de aquecimento da armadura e fora dessa região. Nos dois casos, o limite de  $\delta_{max} = \pi/2$  aparece como uma linha vertical, sendo que, no caso de  $O'$  ficar fora da região de aquecimento viável, o limite de estabilidade é inoperante. A Figura 2.9 seguir também indica outras situações nas quais os limites de estabilidade são impostos na forma de uma margem angular em relação ao ângulo máximo teórico ( $\pi/2$ ).

---

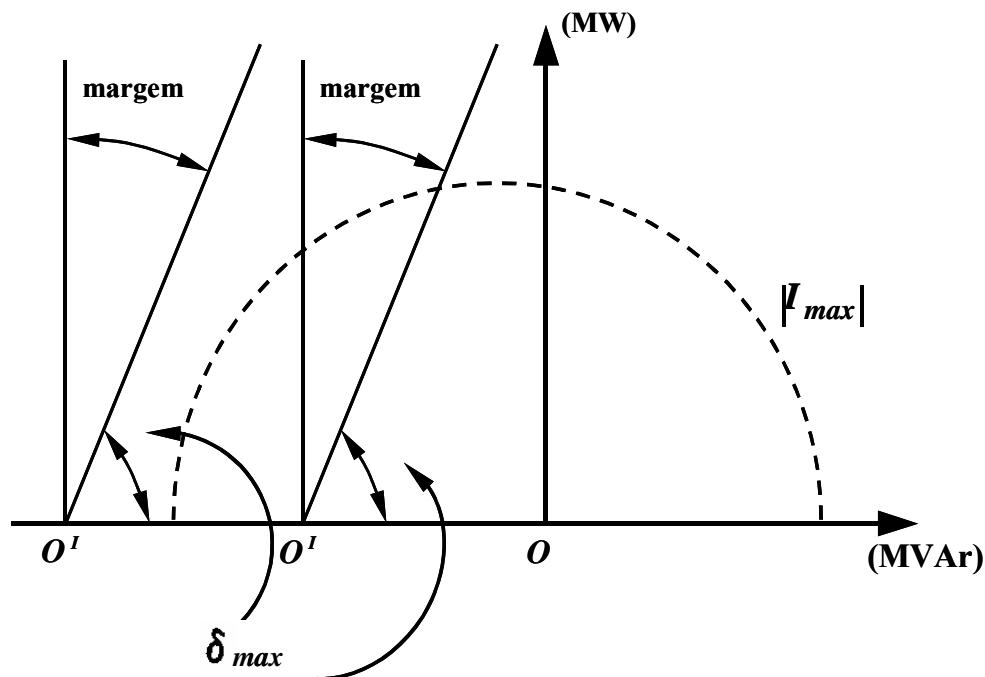


Figura 2.9 – Limite de estabilidade imposto como valor máximo do ângulo de potência (margem angular).

Nesses casos, o ângulo máximo varia com o nível de excitação do gerador: quanto menor a excitação, menor o ângulo possível.

A curva  $P - \delta$  ilustrada na Figura 2.10, mostra que quando a excitação cai, cai a magnitude de  $E_f$  e, portanto, cai o valor máximo de potência teórica; como a margem é especificada em MW, isto equivale a aumentar a porcentagem da margem em relação ao pico de potência na medida que cai a excitação.

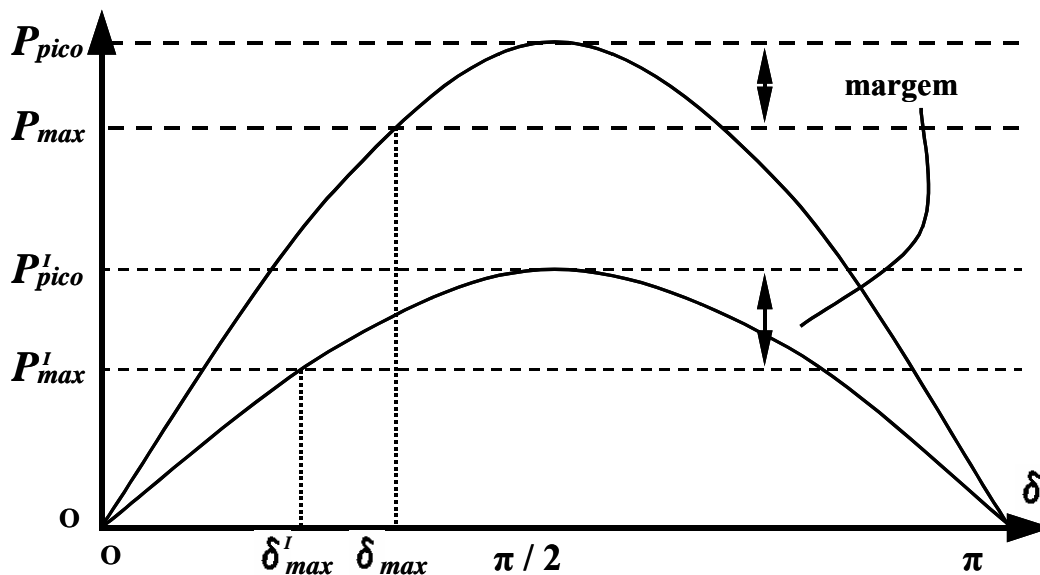


Figura 2.10 - Efeito da margem de estabilidade em potência no valor de  $\delta_{max}$

#### 2.4.5 Limite de Excitação Mínima

A diminuição contínua da corrente de excitação  $i_f$  nos levará a um ponto no qual o valor de pico correspondente à  $\pi/2$  se igualará à própria margem imposta, e curva  $P - \delta$  passa a coincidir com o eixo da abscissas (capacidade de geração nula). Isto indica que existe uma limitação adicional que deve ser imposta ao valor da corrente de excitação. Na figura 2.11 no gráfico da potência (P,Q) mostra-se os lugares geométricos das correntes  $i_f$ .

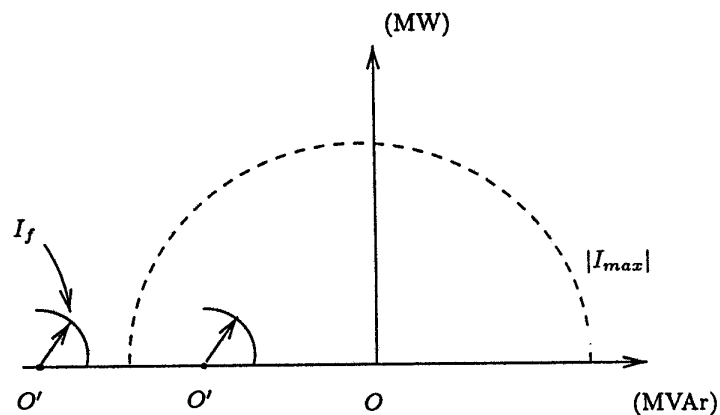


Figura 2.11 – Limite mínimo de excitação.



Levando em conta todas as limitações possíveis na carta de capacidade dos geradores síncronos teremos a seguinte curva final:

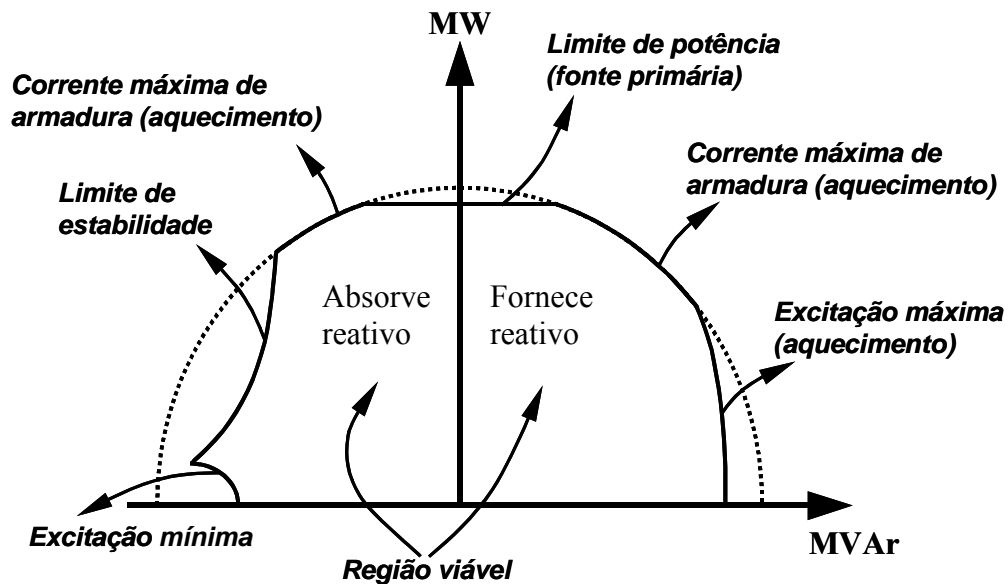


Figura 2.12 – Curva de capacidade de geração.

Os geradores do sistema em estudo foram ensaiados e suas curvas de capacidade se encontram nos anexos A, B, C e D.

### 2.5 Compensador Síncrono

O compensador é uma máquina síncrona que é utilizada para compensar variações lentas de tensão, de forma a atender o que se procura em um sistema transmissão, ou seja, a possibilidade de entregar para consumo a máxima potência ativa possível sob um valor nominal de tensão.

Se mantivermos um gerador síncrono ligado ao sistema e deixássemos de fornecer água à sua turbina, este gerador funcionaria como um motor síncrono. Nesta condição, poderíamos atuar na regulação de tensão e observaríamos que mesmo sobreexcitando ou subexcitando o gerador, ele continuaria girando por estar sincronizado ao sistema. Isto ocorre porque a máquina síncrona tem excitação própria que independe do sistema e ficando conectada a este operando como motor ou como gerador.

A máquina síncrona estaria, portanto, girando a vazio, consumindo do sistema uma potência suficiente para vencer as suas perdas internas (atrito, ventilação, aquecimento, etc.) e que ainda ofereceria a possibilidade de variação de sua tensão terminal. A máquina síncrona não funcionaria mais um gerador síncrono, mas como um “compensador síncrono”.

Desta forma, o compensador síncrono consome uma certa potência ativa do sistema e através da variação de sua excitação pode fornecer ou absorver potência reativa do sistema.

Em situações de carga pesada, quando a tensão tende a baixar nos pontos de consumo, o compensador pode ser sobre-excitado fornecendo-se energia reativa na medida necessária, pela variação suave de seu sistema de excitação, e fazendo com que a tensão se eleve conforme exigido pelo sistema.

Na situação de carga leve em que a tensão tende a aumentar devido ao efeito capacitivo das linhas de transmissão, o compensador deverá ser sub-excitado, absorvendo energia reativa e assim reduzindo a tensão nos pontos de consumo.

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

1 - Maior disponibilidade de potência ativa dos geradores, para atendimento das cargas. Isto ocorre porque para manter a tensão do consumidor no valor nominal em horas de ponta de carga, os geradores ao trabalharem com tensões mais elevadas estarão gerando potência reativa além da potência ativa necessária. Quando o gerador gera potência ativa junto com uma grande quantidade de potência reativa, seu fator de potência é baixo, ou seja, para os mesmos MVA de potência do gerador, menor será a potência ativa disponível;

2 – Evita que os geradores trabalhem com tensão de geração próxima de seus valores limites e evita variação constante nos tap's dos transformadores elevadores equipados com modificação automática de tap's sob carga;

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

4 – Facilidade de ajuste de tensão. Apenas com o ajuste da excitação do compensador síncrono, em uma atuação bastante simples e rápida, evita-se uma série de outras manobras, que seriam necessárias, para se conseguir o mesmo efeito e que envolveriam mais equipamentos, maior comunicação entre unidades, maior tempo e conseqüentemente maior probabilidade de falhas.

### **2.6 Curva V de um motor síncrono**

A curva V de um motor síncrono, apresentada na Figura 2.13, mostra a relação entre a corrente de armadura e a corrente de campo para uma tensão terminal constante e com uma carga constante no eixo. Para potência de saída constante, a corrente de armadura é, naturalmente, mínima com fator de potência unitário, e aumenta conforme o fator de potência decresce. As linhas tracejadas correspondem aos pontos de fator de potência constante. Elas são as curvas compostas para o motor síncrono, mostrando como a corrente de campo deve ser alterada conforme a variação da carga, a fim de manter o fator de potência constante [6].

---

Na Figura 2.13 nota-se também que a vazio, a corrente de armadura para o fator potência unitário não é nula, mas tem um pequeno valor de corrente de armadura  $CA$  por fase, que é necessária para produzir um torque que equilibra as perdas rotacionais. Conforme se aumenta a carga, não apenas cresce a corrente de armadura, mas também é necessário que se aumente a excitação para levar a corrente de armadura novamente a uma posição de defasamento nulo em relação à tensão do barramento, por fase,  $V_f$ .

As curvas possuem um certo deslocamento para a direita conforme o aumento de carga, de modo que seja fornecida a excitação necessária para se obter o mesmo ângulo de fase para uma carga maior. Assim, as curvas  $V$  representam os diagramas fasoriais, e vice - versa, para diferentes condições de carga e de fator de potência.

Na curva é mostrado também que com a variação da corrente de excitação, pode-se variar o ângulo de potência do motor, absorvendo ou fornecendo reativo à rede em que ele está ligado.

As unidades reversíveis da usina elevatória de Pedreira foram ensaiadas e suas curvas  $V$  se encontram no anexo A.

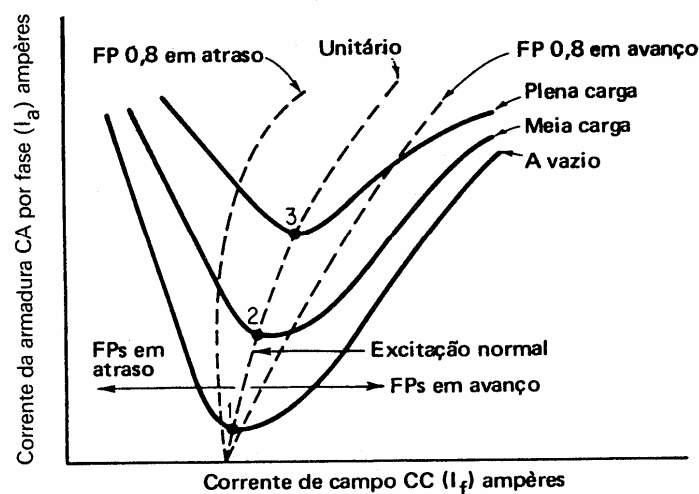


Figura 2.13 - Curva  $V$  de um motor síncrono.

## CAPÍTULO III – O SISTEMA ELÉTRICO

### 3.1 O Sistema Elétrico em Estudo

O sistema elétrico em estudo, mostrado em detalhes nas Figuras 3.1 e 3.2, refere-se a área VI do Estado de São Paulo que atende parte do principal centro consumidor do país, abrangendo parte da cidade de São Paulo, parte do litoral de São Paulo compreendendo as cidades de Santos, Praia Grande, Cubatão e São Vicente.

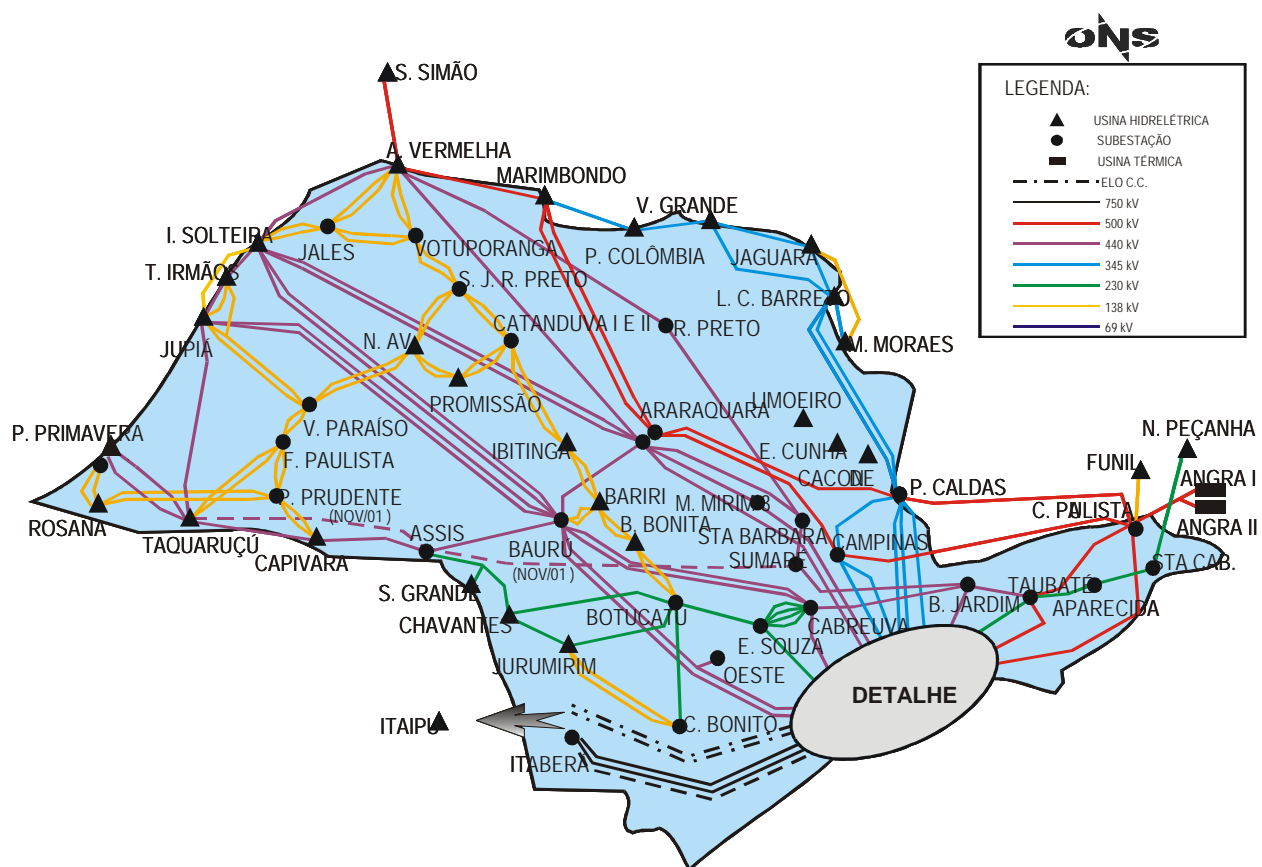


Figura 3.1 – Localização da região em estudo.

Empresas de eletricidade que fazem parte do sistema: EMAE – Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A. (geração de energia elétrica), AES Eletropaulo S.A. (distribuidora de

energia elétrica), CTEEP - Companhia Paulista de transmissão de energia elétrica S.A., CPFL Piratininga S.A. (distribuidora de energia elétrica) e FURNAS Centrais Elétricas S.A. (geradora e transmissora de energia elétrica).

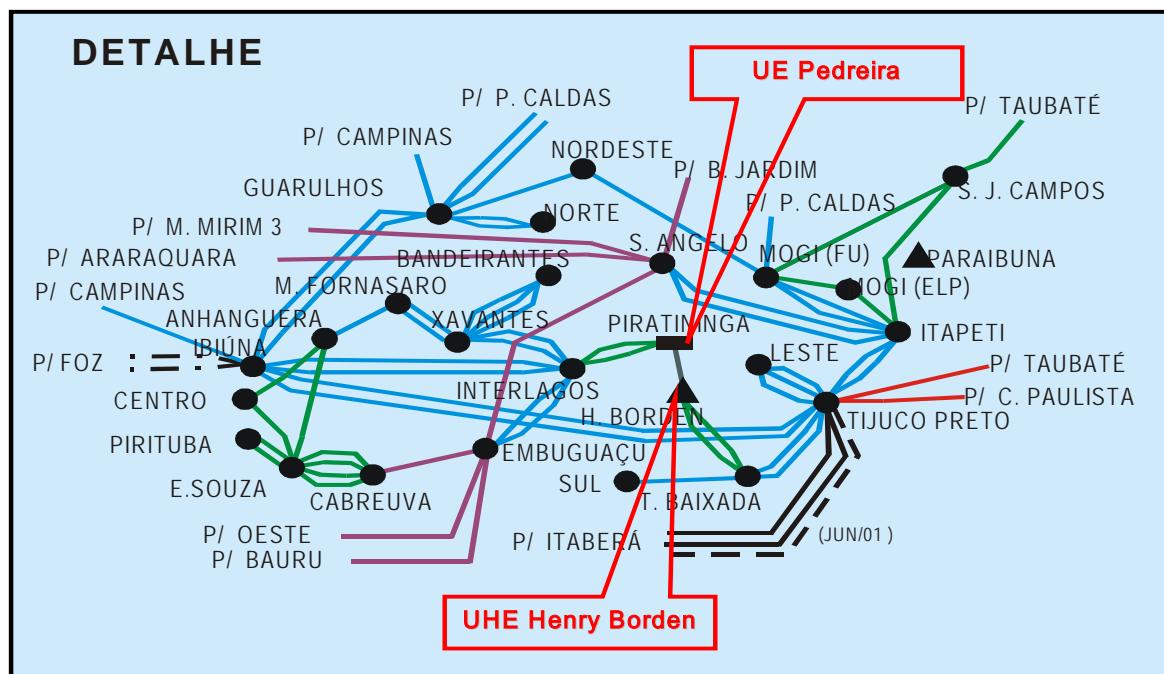


Figura 3.2 – Detalhe da região em estudo.

Historicamente, esse sistema foi importante no século passado, sendo responsável pelo desenvolvimento industrial da região. Neste sistema encontram-se o complexo gerador Henry Borden e a Usina Termoeletrica Piratininga que são considerados marcos históricos devido à sua grandeza e aos desafios tecnológicos da época, sendo sem dúvida a obra mais importante na área para o desenvolvimento industrial do país.

Com o passar do tempo e com a forte industrialização da área teve-se um grande aumento nas cargas da região, sendo necessário a construção de diversas subestações transformadoras de transmissão e de distribuição e de linhas de transmissão. Hoje esse sistema teve o incremento de geração de grandes usinas geradoras como: Ilha Solteira, Três Irmãos,

Itaipu, dentre outras. Energia essa que chega através de linhas de transmissão de extra-alta tensão em corrente alternada e/ou em corrente contínua. O diagrama elétrico da região estudada é mostrado na Figura 3.3.

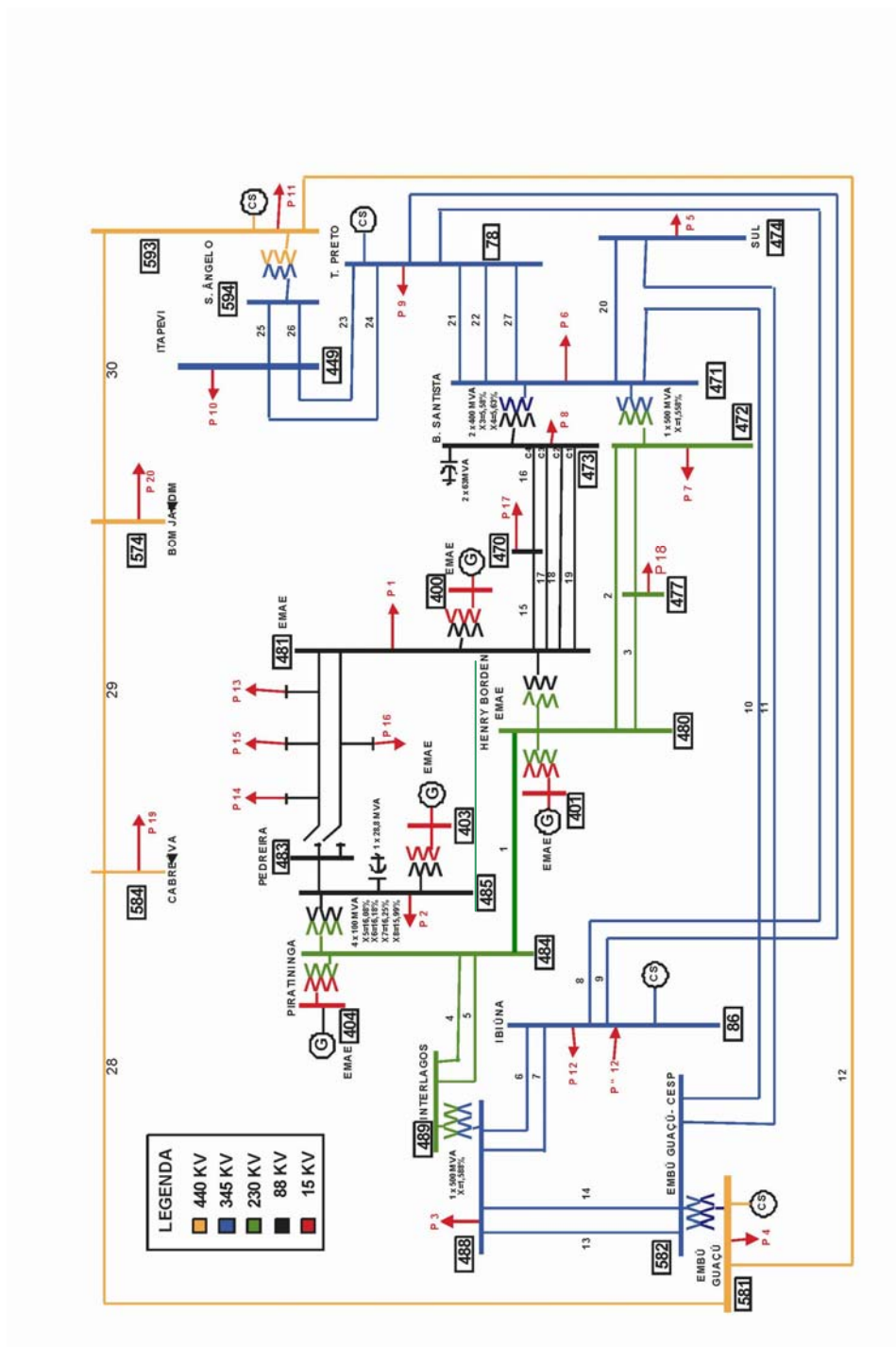


Figura 3.3 – Diagrama elétrico da região estudada

O sistema conta hoje com diversos níveis de tensão, e para o seu controle utiliza-se: bancos de capacitores, indutores e compensadores síncronos dispostos estrategicamente em algumas subestações.

Nas subestações de 88kV Piratininga e Baixada Santista encontram-se bancos de capacitores de 28,8MVar e 126MVar. Nas subestações de 345kV Ibiúna e Tijuco Preto estão instalados bancos de 1200MVar e 800MVar.

Além dos dispositivos acima citados, o sistema possui usinas que ficaram praticamente no centro de carga. Através da geração de potência reativa em seus geradores é possível controlar as tensões nas barras de 88kV e 230kV. Pode-se citar o caso da Usina Hidroelétrica de Henry Borden, que por problemas ambientais e do baixo nível em seu reservatório, tem gerado mais reativo do que ativo.

Nesse sistema encontram-se as usinas elevatórias de Traição (UET) e de Pedreira (UEP) que tem a função de inverter o fluxo normal das águas do rio Pinheiros, para seu bombeamento na Represa Billings e para aproveitamento na usina de Henry Borden. Hoje, por motivos ambientais, esse bombeamento é restritivo, só sendo permitido em caso de chuvas fortes para controle de cheias.

Os aumentos das cargas e das linhas de interligação, nesse sistema, resultaram também em um aumento do nível de corrente de curto circuito, o que obriga o sistema a operar com certas restrições. Outra característica é que existem algumas linhas antigas com alto valor de impedância quando da sua construção e devido a sua manutenção, como é o caso das linhas de 88kV entre as ETU Henry Borden e Pedreira, as quais alimentam as ETD's Varginha, Rio Bonito e Imigrantes.



As cargas alimentadas pelo sistema possuem ainda características sazonais, devido à variedade das regiões que nela se encontram como, capital e litoral e também pelas suas características: industrial, residencial e comercial.

#### **3.2 Linhas de Transmissão do Sistema**

As linhas de transmissão do sistema em estudo possuem diversos níveis de tensão, desde 88kV a 440kV e seus parâmetros variam muito devido aos seus comprimentos e a época que foram projetadas e construídas. O sistema se caracteriza pela presença de um grande número de linhas curtas entre as subestações. Na Tabela 3.1 são apresentados os parâmetros das linhas de transmissão.

Tabela 3.1 – Valores dos parâmetros das linhas.

Nº	Nome	Tensão (kV)	Impedância (Z%)	Comp. (m)	Capacidade (MVA)	
					Normal	Emerg.
1	Henry Borden - Piratininga	230	$Z = 0,61 + j 3,01$ $B = 5,54$	33067	311	311
2	Henry Borden – Baixada C1	230	$Z = 0,05 + j 0,43$ $B = 1,318$	6318	637	637
3	H. Borden – Carbocloro 230	230	$Z = 0,01 + j 0,10$ $B = 0,321$	1516	637	637
4	Piratininga – Interlagos C1	230	$Z = 0,02 + j 0,13$ $B = 0,29$	1516	478	478
5	Piratininga – Interlagos C2	230	$Z = 0,02 + j 0,13$ $B = 0,29$	1516	478	478
6	Ibiúna – Interlagos C1	345	$Z = 0,61 + j 3,01$ $B = 5,54$	61023	2020	2627
7	Ibiúna – Interlagos C2	345	$Z = 0,61 + j 3,01$ $B = 5,54$	61023	2020	2627
8	Ibiúna – Tijuco Preto C1	345	$Z = 0,61 + j 3,01$ $B = 5,54$	97000	1149	1149
9	Ibiúna – Tijuco Preto C2	345	$Z = 0,61 + j 3,01$ $B = 5,54$	97000	1149	1149
10	Embu-Guaçu – Baixada	345	$Z = 0,61 + j 3,01$ $B = 5,54$	46396	895	895
11	Embu-Guaçu – Sul	345	$Z = 0,61 + j 3,01$ $B = 5,54$	55035	895	895
12	Embu-Guaçu – Santo Ângelo	440	$Z = 0,61 + j 3,01$ $B = 5,54$	74650	1522	1522
13	Interlagos – Embu-Guaçu C1	345	$Z = 0,07 + j 0,70$ $B = 12,166$	22446	895	895
14	Interlagos – Embu-Guaçu C2	345	$Z = 0,07 + j 0,70$ $B = 12,166$	22446	895	895
15	Henry Borden - Carbocloro88	88	$Z = 0,42 + j 1,52$ $B = 0$	2643	118	118
16	Carbocloro88 - Baixada C4	88	$Z = 0,01 + j 0,07$ $B = 0,007$	2643	236	236
17	Henry Borden - Baixada C3	88	$Z = 0,84 + j 3,04$ $B = 0$	5286	118	118
18	Henry Borden - Baixada C2	88	$Z = 0,66 + j 3,01$ $B = 0$	5286	118	118
19	Henry Borden - Baixada C1	88	$Z = 0,66 + j 3,01$ $B = 0$	5286	118	118
20	Baixada – Sul	345	$Z = 0,08 + j 0,78$ $B = 11,503$	21275	1076	1076
21	Baixada – T. Preto C1	345	$Z = 0,08 + j 0,86$ $B = 12,56$	26503	912	1195
22	Baixada – T. Preto C2	345	$Z = 0,08 + j 0,81$ $B = 12,56$	26503	1184	1195
23	T. Preto – Itapeti C1	345	$Z = 0,07 + j 0,66$ $B = 12,85$	21416	1184	1195
24	T. Preto – Itapeti C2	345	$Z = 0,07 + j 0,66$ $B = 12,85$	21416	1184	1195
25	Itapeti – S. Ângelo C1	345	$Z = 0,04 + j 0,41$ $B = 7,15$	13255	895	895
26	Itapeti – S. Ângelo C2	345	$Z = 0,04 + j 0,41$ $B = 7,15$	13255	895	895

Tabela 3.1 – Valores dos parâmetros das linhas (continuação).

Nº	Nome	Tensão (kV)	Impedância (Z%)	Comp. (m)	Capacidade (MVA)	
					Normal	Emerg.
27	Baixada – Tijuco Preto C3	345	$Z = 0,08 + j 0,81$ $B = 12,56$	26503	1184	1195
28	Embu Guaçu – Cabreuva	440	$Z = 0,09 + j 1,22$ $B = 73,50$	73980	1524	1829
29	Bom Jardim – Cabreuva	440	$Z = 0,03 + j 0,38$ $B = 23,71$	23720	1522	1522
30	Bom Jardim – S. Ângelo	440	$Z = 0,01 + j 0,10$ $B = 0,321$	119210	637	637
31	Carbocloro230 – Baixada	230	$Z = 0,04 + j 0,33$ $B = 0,997$	4801	637	637
32	H. Borden – Pedreira C1	88	$Z = 4,48 + j 24,71$ $B = 0$	42488	137	137
33	H. Borden – Pedreira C2	88	$Z = 4,48 + j 24,71$ $B = 0$	42488	137	137
34	Piratininga – Pedreira	88	$Z = 0,04 + j 0,21$ $B = 0$	554	180	180

Os parâmetros constantes nas tabelas foram obtidos do programa Anarede do ONS (base 100MVA e tensão 138kV).

### 3.3 Transformadores do Sistema

Na Tabela 3.2 são mostrados os dados dos transformadores de interligação do sistema.

Tabela 3.2 – Características dos transformadores do sistema.

Tipo	Barras	Potência nominal (MVA)	Tensão (KV)	TAP's (PU)	Reatância	Capacidade Emergência (MVA)
Transformador	484-485	100	230/88	0,88 a 1,12	16,08%	100
Transformador	484-485	100	230/88	0,88 a 1,12	16,13%	100
Transformador	484-485	100	230/88	0,88 a 1,12	16,25%	100
Transformador	484-485	100	230/88	0,88 a 1,12	15,99%	100
Auto transformador	488-489	500	345/230	1,00	1,59%	500
Auto transformador	488-489	500	345/230	1,00	1,59%	500
Auto transformador	581-582	750	440/345	0,97	0,72%	900
Auto transformador	581-582	750	440/345	0,97	0,71%	900
Auto transformador	471-472	500	345/230	1,00	1,59%	500
Transformador	471-473	400	345/88	0,874 a 1,128	5,58%	436
Transformador	471-473	400	345/88	0,874 a 1,128	5,63%	436
Auto transformador	593-594	750	440/345	1,00	0,72%	750
Auto transformador	593-594	750	440/345	1,00	0,71%	750

Obs: O tap usual varia conforme a característica da carga (leve, média e pesada) e com o período do ano.

### **3.4 Compensadores Síncronos**

O sistema em estudo possui quatro compensadores síncronos distribuídos estrategicamente e tem a função de ajuste da tensão da região, com atuação nas barras de 440kV e 345kV. Estes compensadores síncronos são descritos a seguir.

#### **3.4.1 Compensador síncrono de Ibiúna**

É composto por quatro máquinas síncronas, podendo produzir um total de potência reativa de - 1080 MVar a + 1200 MVar. Sua tensão de saída é de 20kV, ligado através de um transformador, conectado à Subestação de Ibiúna de 345kV.

Este compensador é responsável pelo ajuste de tensão na entrada da energia proveniente do elo de corrente contínua de Itaipu e mantém a tensão nos seguintes patamares: carga pesada e média de 354 a 362kV, carga leve de 335 a 348kV.

O compensador síncrono de Ibiúna trabalha com o máximo de folga possível, pois torna-se imprescindível para evitar um colapso de tensão, caso haja perda de um bipolo do elo de corrente contínua.

#### 3.4.2 Compensador síncrono de Embú-Guaçu

Esta máquina é acionada por um motor assíncrono de 500kW, de rotor bobinado, montado no mesmo eixo do compensador e que o aciona até próximo da velocidade de sincronismo. Este compensador síncrono pode produzir potência reativa de -175 MVar a + 250 MVar, sua tensão de saída é de 16kV, ligado através de um transformador e conectado à Subestação de Embú-Guaçu de 440kV.

O compensador síncrono de Embú-Guaçu tem a função de controlar a tensão na barra nº 582 – Embú-Guaçu de 345kV nos seguintes patamares: carga pesada e média de 354 a 362kV, carga leve de 335 a 348kV.

#### 3.4.3 Compensador síncrono de Tijuco Preto

Pode produzir uma variação de potência reativa de - 180 MVar a + 300 MVar. Sua tensão de saída é de 20kV, ligado através de um transformador, conectado à Subestação de Tijuco Preto de 345kV.

Ele é responsável pelo ajuste da tensão na entrada da energia proveniente das linhas de 750kV de Itaipu e mantém a tensão na barra nº 78 Tijuco Preto 345kV, nos patamares de carga pesada e média de 354 a 362kV e carga leve de 335 a 348kV.

#### 3.4.4 Compensador síncrono de Santo Ângelo

Acionado por um motor assíncrono de 500kW, de rotor bobinado, montado no mesmo eixo do compensador e que o aciona até próximo da velocidade de sincronismo. Pode variar a potência reativa de - 175 MVar a + 250 MVar, sua tensão de saída é de 16kV, ligado através de um transformador, conectado à Subestação de Santo Ângelo de 440kV.

Este compensador síncrono tem a função de controlar a tensão na barra nº 449 – Santo Ângelo de 345kV nos seguintes patamares de carga pesada e média de 354 a 362kV e carga leve de 335 a 348kV.

### 3.5 Usinas do Sistema:

No sistema em estudo encontra-se o complexo gerador de Henry Borden, as usinas termoelétricas Piratininga e Nova Piratininga e as usinas elevatórias de Pedreira e Traição. Estas usinas são detalhadas a seguir.

#### 3.5.1 Usina Henry Borden

O projeto original para o aproveitamento hidráulico da Usina Henry Borden, idealizado pelo Engenheiro 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 km<sup>2</sup>.

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 junta à Estação Elevatória de Pedreira, tem 1.500 metros de comprimento e 25 metros de altura.

As águas da Bacia do Rio Tietê são lançadas no Reservatório Billings, através do Canal do Rio Pinheiros, sendo este formado pelas águas dos Rios Guarapiranga e Grande, cujo curso foi invertido e recebe as águas do Tietê na Estrutura de Retiro. Um sistema de comportas construído na confluência dos Rios Tietê e Pinheiros destinam-se a controlar a passagem das águas e reter detritos e vegetação aquática na entrada do canal.

A vazão de águas do Rio Tietê é bombeada para o Reservatório Billings primeiramente na Estação Elevatória de Traição a um nível 5 metros mais alto. De Traição, as águas escoam até a Estação Elevatória de Pedreira onde são elevadas em mais 25 metros e lançadas no Reservatório Billings.

Do Reservatório Billings as águas são encaminhadas por gravidade ao Reservatório do Rio das Pedras, através de um canal a céu aberto de 1.800 metros de comprimento e por 8,5 metros de profundidade, onde estão localizadas as tomadas d'água para as duas seções da Usina Henry Borden. A passagem das águas do Reservatório Billings para o Reservatório Rio das Pedras é feito através da Barragem Reguladora Billings-Pedras.

O Reservatório do Rio das Pedras possui 30 km<sup>2</sup> de área e volume d'água de 33.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> na cota máxima de 728,50 metros. 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 com 173 metros de comprimento e 35 metros de largura. Possui 03 (três) comportas deslizantes, tipo gaveta, com capacidade de descarga de 75,24 m<sup>3</sup>/s na cota máxima de 728,50 m.

O projeto hidroelétrico Henry Borden da EMAE consiste de duas Usinas: Uma usina Externa e de uma usina Subterrânea com alta queda, aproximadamente 728 metros, com alta eficiência energética sendo que 1 m<sup>3</sup>/s turbinado gera 5,654MW.

No reservatório Billings encontra-se o sistema de captação de água pela SABESP, para tratamento e consumo da população da cidade de São Paulo. Este sistema captação de água não

permite que o nível da represa possa ficar em níveis baixos, o que limita algumas vezes a geração da usina de Henry Borden.

#### 3.5.1.1 - Usina Externa

É composta por oito unidades geradoras, com capacidade instalada total de 469 MW. Cada unidade geradora é constituída por duas turbinas tipo Pelton, cada uma acionada por um injetor, montados nas extremidades de um eixo horizontal, com gerador ao centro.

Os oito geradores são do tipo eixo horizontal assentado sobre dois mancais, tendo no rotor 20 bobinas-pólos. As características destes geradores são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Características dos geradores da UHB Externa

Unidade	Fabricante	Potência	Tensão	Fator de Potência	Xd	X'd	X''d
01	GECO	47MVA	11kV	0,85	140%	55%	35,01%
02	GECO	33MVA	11kV	0,85	100%	30%	24,59%
03	GECO	72MVA	11kV	0,85	91,1%	40,8%	20,02%
04	GECO	76MVA	11kV	0,85	151%	45%	27,85%
05	GECO	72MVA	11kV	0,85	91,1%	40,8%	20,02%
06	GECO	76MVA	11kV	0,85	150%	43%	27,85%
07	GECO	72MVA	11kV	0,85	91,1%	40,8%	20,02%
08	GECO	72MVA	11kV	0,85	91,1%	40,8%	20,02%

As unidades geradoras nº 1 a 7 geram em seus terminais uma tensão de 11kV e os transformadores a elevam para a tensão de 88kV, suprimindo os barramentos Norte e Sul de 88kV da ETU Henry Borden 88kV, onde estão instaladas 16 linhas de transmissão das empresas: AES - Eletropaulo, CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz e CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista e uma linha de interligação do sistema de 88kV com o de 230kV. A unidade geradora nº 8 pode ser conectada ao sistema de 230kV ou 88kV, atualmente encontra-se ligada ao sistema de 230kV, devido ao nível de corrente de curto circuito na região.



#### 3.5.1.2 Usina Subterrânea

A planta consiste de 6 turbinas hidráulicas do tipo Pelton, de eixo vertical com uma roda integral de aço inoxidável, com 4 injetores cada e potência nominal de 70 MW. A rotação nominal das máquinas é de 450 rpm e a queda bruta é igual a 718 m. As turbinas das unidades geradoras nº11 a 14 são de fabricação da empresa Dominion Engineering e o das unidades nº15 e 16 são da Allis-Chalmers.

Os geradores 11 a 14 são de fabricação General Electric e os 15 e 16 Westinghouse, ligados por meio de eixo próprio ao eixo da turbina com capacidade de 70 MW cada um, tensão de saída 13,8kV com enrolamento em estrela aterrado no estator, possuindo 240 bobinas distribuídas em 2 circuitos por fase ligados em paralelo. O enrolamento do rotor consiste de 16 bobinas pólos. As características dos geradores são mostradas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Características dos geradores da UHB Subterrânea

Unidade	Potência	Tensão	Fator de Potência	Xd	Xq	X'd	X''d
11	75MVA	13,8kV	0,85	108%	62%	25,5%	17,4%
12	75MVA	13,8kV	0,85	108%	62%	25,5%	17,4%
13	75MVA	13,8kV	0,85	108%	62%	25,5%	17,4%
14	75MVA	13,8kV	0,85	108%	62%	25,5%	17,4%
15	75MVA	13,8kV	0,85	100%	60%	26,2%	18%
16	75MVA	13,8kV	0,85	100%	60%	26,2%	18%

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

Toda energia gerada por estes geradores é transmitida através de cabos conectados a uma estação convencional de superfície, suprimindo os barramentos leste e oeste de 230kV, onde derivam-se 3 linhas de transmissão da empresa CTEEP, sendo que uma interliga a ETU Henry

Borden 230kV a SE Piratininga 230kV e duas que interligam a ETU Henry Borden a SE Baixada Santista 230kV, e mais uma linha de interligação entre a ETU HB-230kV e o Anel de 230kV.

#### 3.5.2 Usina Termoelétrica Piratininga

A Usina Termoelétrica Piratininga foi construída nas margens do Canal Pinheiros, próximo ao Reservatório Billings e possui 4 unidades geradoras, duas destas unidades têm tensão de saída de 13,2kV que é transformada para 88kV através de um banco de transformadores com ligação triângulo / estrela, que é conectada ao barramento de 88kV da SE Piratininga. As outras duas unidades têm tensão de saída de 14,4kV que é transformada para 230kV através de um banco de transformadores com ligação triângulo / estrela, que é conectado ao barramento de 230kV da SE Piratininga.

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

As turbinas são a vapor e originalmente utilizavam óleo como combustível. Devido a restrições ambientais, atualmente utilizam o gás natural. Em janeiro de 2001 foi instituído um consórcio com a Petrobrás para que as duas empresas executem a implantação de quatro turbinas a gás em ciclo combinado, aumentando a capacidade de geração.

As unidades nº 1 e 2 utilizam o ciclo Rankine regenerativo sem reaquecimento. As unidades nº 3 e 4 operam segundo o mesmo ciclo, porém com reaquecimento.

Os dados técnicos da Usina Termoelétrica Piratininga são apresentados nas tabelas 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5 – Características das turbinas da Usina Termoelétrica 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 max. contínua garantida	100		136		MW
Nº	ITENS	TURBINAS Nº 1 E 2		TURBINAS Nº 3 E 4		Unidades
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		-

Tabela 3.6 – Características dos geradores da Usina Termoelétrica 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	2,10	0,035	1,05	2,10
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%		11,5%	11,5%	
23	X´´d	14%	14%		11,5%	11,5%	

### 3.5.3 Usina Termoelétrica Nova Piratininga

A Usina Termoelétrica Nova Piratininga é composta de quatro grupos de geradores com potência de 100MW cada, sendo que dois geradores estão ligados ao barramento de 88kV e os outros dois

estão ligados ao barramento de 230kV da SE Piratininga. As suas unidades geradoras utilizam turbinas tipo explosão sendo que o combustível utilizado é o gás natural. Seus geradores geram tensão em 13,8kV, sendo transformado para 88kV ou 230kV, através de transformadores trifásicos, ligados aos barramentos de 88kV e 230kV da SE Piratininga.

Para um melhor aproveitamento e rendimento da usina ela foi projetada para operar em ciclo aberto ou em ciclo combinado com a Usina Termoelétrica Piratininga, ou seja, duas unidades da Usina Nova Piratininga alimentam, através de uma caldeira de recuperação uma unidade da Usina Termoelétrica Piratininga, utilizando os gases de exaustão. As unidades geradoras são do tipo turbo geradores de fabricação da Alstom.

#### 3.5.4 Usina Elevatória de Traição

A Usina Elevatória de Traição foi inaugurada em 1940 e tem como objetivo reverter o curso das águas dos rios Tietê e Pinheiros, para que estas águas possam ser encaminhadas à Usina Elevatória de Pedreira e depois ao Reservatório Billings. A usina possui quatro unidades reversíveis com potência total de 22MW. As unidades reversíveis podem funcionar como geradoras de energia e como bomba, dotadas de turbinas com rotor tipo Kaplan de eixo vertical, acionadas por motores síncronos. A capacidade de bombeamento é de 280m<sup>3</sup>/s, elevando as águas em cerca de 5 metros.

Do ponto de vista energético, a reversão do rio tem como propósito manter volumes d' água nos reservatórios do Rio das Pedras e Billings suficientes para garantir a geração na Usina Henry Borden. Hoje a operação do sistema de reversão do Rio Pinheiros, só é acionada para o controle das 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 a SE Bandeirantes que possui

um bom suporte de reativos através de bancos de capacitores podendo fornecer um total de 132,8MVar.

#### 3.5.5 Usina Elevatória de Pedreira

A Usina Elevatória de Pedreira, cuja localização é mostrada na Figura 3.3, foi inaugurada em 1939, com a entrada em operação da unidade 4, e foi ampliada gradativamente. A unidade 7 foi instalada em 1986, sendo que esta unidade transferida da usina hidroelétrica Edgard de Souza, e a unidade 8 que foi concluída em 1993.

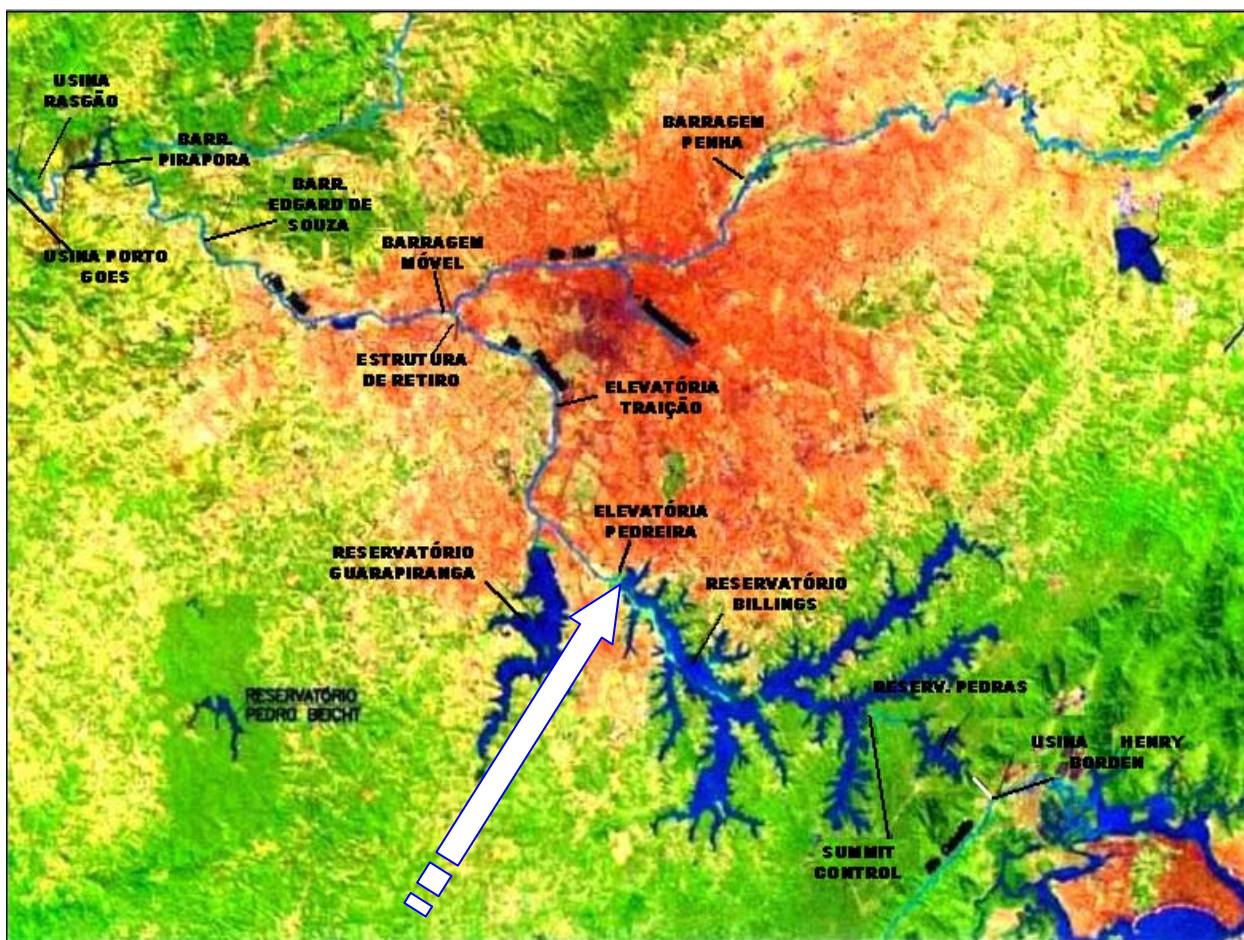


Figura 3.4 - Foto via satélite com a localização da U.E. Pedreira.

Todas as turbinas, cujas características são mostradas na Tabela 3.7, são dotadas de rotor tipo Francis, movidas por motores síncronos de 6,6kV. As unidades 1 a 7 operam absorvendo ou fornecendo potência ativa para o sistema, podendo ainda funcionar como compensadores síncronos, absorvendo ou fornecendo potência reativa, quando houver necessidade de controlar os níveis de tensão do sistema elétrico. A unidade 8 pode operar absorvendo potência ativa e fornecendo potência reativa.

Tabela 3.7 – Características das unidades reversíveis da Usina Elevatória Pedreira.

Unidade	Potência	Tensão	Fator de Potência	Xd	Xq	X'd	X''d
01	17,5MVA	6,6kV	0,85	102%	72%	33%	23%
02	17,5MVA	6,6kV	0,85	111%	*	36%	28%
03	17,5MVA	6,6kV	0,85	111%	*	36%	28%
04	6,25MVA	6,6kV	0,80	*	*	*	*
05	16,5MVA	6,6kV	0,85	102%	72%	33%	23%
06	17,5MVA	6,6kV	0,85	102%	72%	33%	23%
07	17,5MVA	6,6kV	0,85	111%	*	36%	28%
08	26,25MVA	6,6kV	0,85	80,4%	49%	23%	17%

Obs: (\*) Valores não disponíveis

As águas do Canal Pinheiros passam para o Reservatório Billings através desta usina, cuja capacidade atual de bombeamento é de 395m<sup>3</sup>/s, elevando as águas em cerca de 25 m. De acordo com a Resolução Conjunta SMA/SES 03/92, atualizada pela Resolução SEE-SMA-SRHSO-I, de 13/03/96, da Secretaria do Meio Ambiente, na qual diz que 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 dos rios Pinheiros e Tietê, podendo provocar enchentes na região. Estas resoluções limitam a utilização da Usina Elevatória de Pedreira.

Cada unidade é interligada à Estação 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 4 a partida se dará com tensão plena. A partida é feita como motor assíncrono através de seus enrolamentos amortecedores com aplicação de corrente alternada no estator da unidade.

A Usina Elevatória de Pedreira dispõe de dois barramentos trifásicos de 88kV, podendo ser alimentados por duas linhas de transmissão paralelas diretamente ligadas à estação da Usina Henry Borden e mais uma linha ligada à estação da Usina Termoelétrica Piratininga. 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 trafos das unidades proporciona inúmeras opções de manobra para equilíbrio de carga, transferência de barramento e linha de serviço, isolamento de equipamento para manutenção e etc.

#### 3.5.5.1 Ensaios nas máquinas da Usina Elevatória de Pedreira

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

Conforme relatórios da EMAE, as máquinas síncronas da Usina Elevatória de Pedreira nº 2, 4 e 5 foram ensaiadas, sendo obtidos os seguintes resultados [24]:

- **Ensaios das unidades funcionando como bomba capacitiva:**

Neste ensaio, com resultados mostrados na Tabela 3.8, foi verificado o desempenho das unidades com carga, isto é, bombeando o máximo que a unidade permitia e com a máquina sobreexcitada, respeitando os limites operacionais das unidades.



Tabela 3.8 - Valores das Unidades da UEP como bomba capacitiva

Unidade	02	04	05
Potência ativa (MW)	13,3	5,2	13,9
Potência reativa (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

Obs: \* Dado não disponível.

- **Ensaio das unidades funcionando como bomba indutiva:**

Este ensaio foi realizado conforme o anterior, porém com as unidades sub-excitadas. Os resultados são mostrados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Valores das Unidades da UEP como bomba indutiva

Unidade	02	04	05
Potência ativa (MW)	13,2	5,1	13,8
Potência reativa (MVar)	5	2,0	3,0
Potência aparente (MVA)	14,1	5,4	14,1
Tensão(kV)	6,4	6,66	6,5
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

Obs: \* Dado não disponível.

- **Ensaio das unidades funcionando como compensador síncrono sobre-excitado:**

Neste ensaio foi verificado o desempenho das unidades sem carga, isto é, foram sincronizadas ao sistema elétrico sobre-excitados, absorvendo uma pequena quantidade de potência ativa, apenas para movimentar a máquina à velocidade síncrona, verificando a geração de reativos. Os resultados são apresentados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Valores das Unidades da UEP como síncrono sobreexcitado.

Unidade	02	04	05
Potência ativa (MW)	1,2	0,4	0,9
Potência reativa (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

Obs: \* Dado não disponível.

- **Ensaio das unidades funcionando como compensador síncrono subexcitado:**

Este ensaio foi realizado conforme o anterior, porém com as unidades sub-excitadas, e seus resultados são apresentados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Valores das Unidades da UEP como síncrono subexcitado.

Unidade	02	04	05
Potência ativa (MW)	1,2	0,3	0,7
Potência reativa (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

Obs: \* Dado não disponível.

Os ensaios poderiam ser realizados com as unidades sem carga e turbinando o mínimo de água necessária para dar a rotação da velocidade síncrona. Fazendo uma comparação entre o aproveitamento hidroenergético do reservatório Billings que pode abastecer tanto a U. E. Pedreira como a Usina de Henry Borden, observa-se que o melhor aproveitamento seria na Usina de Henry Borden, conforme demonstrado na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Comparação entre o turbinamento de UEP e UHB

Unidade	02	04	05
Potência ativa necessária para manter a rotação síncrona (MW)	1,2	0,4	0,9
Turbinamento necessário para manter a velocidade síncrona (m <sup>3</sup> /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

#### 3.5.5.2 Análise dos ensaios das unidades síncronas da Usina Elevatória de Pedreira.

Pelos resultados obtidos nos ensaios pode-se concluir que a Usina Elevatória Pedreira pode funcionar nas seguintes características:

- Como usina de bombeamento: turbinamento máximo de 395m<sup>3</sup>/s, potência necessária de 113,6MW. Nesta situação poder operar de  $-j\ 67,9\ \text{MVar}$  a  $+j\ 30\ \text{MVar}$ .
- Como compensador síncrono: conectada ao sistema, absorvendo 7,8 MW e gerando 100MVar ou absorvendo do sistema  $-111\text{MVar}$ .

Observação: os dados relativos à unidade nº 8 foram retirados de sua curva de capacidade e dados históricos de sua operação.

### 3.6 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 da geração do reativo da usina elevatória de Pedreira para o sistema, foram levantadas as cargas que estão mais próximas e que teriam maior influência, que são:

- As cargas das barras nº 485 – SE Piratininga 88kV, que atende parte da região sul da cidade de São Paulo, concessionária AES Eletropaulo;
- As cargas da barra nº 481- ETU Henry – Borden 88kV, que atende as cargas das cidades de Praia Grande, São Vicente, parte de Santos e as cargas industriais de Cubatão, concessionária CPFL;
- As cargas das barras nº 3499 – ETD Imigrantes, nº 3488 – ETD Varginha e nº 3492 – ETD Rio Bonito, que atende cargas da região sul da cidade de São Paulo e do município de São Bernardo de Campo, concessionária AES Eletropaulo.

Foram levantadas as cargas mensais durante um ano (2004), considerando os períodos de carga leve, média e pesada.

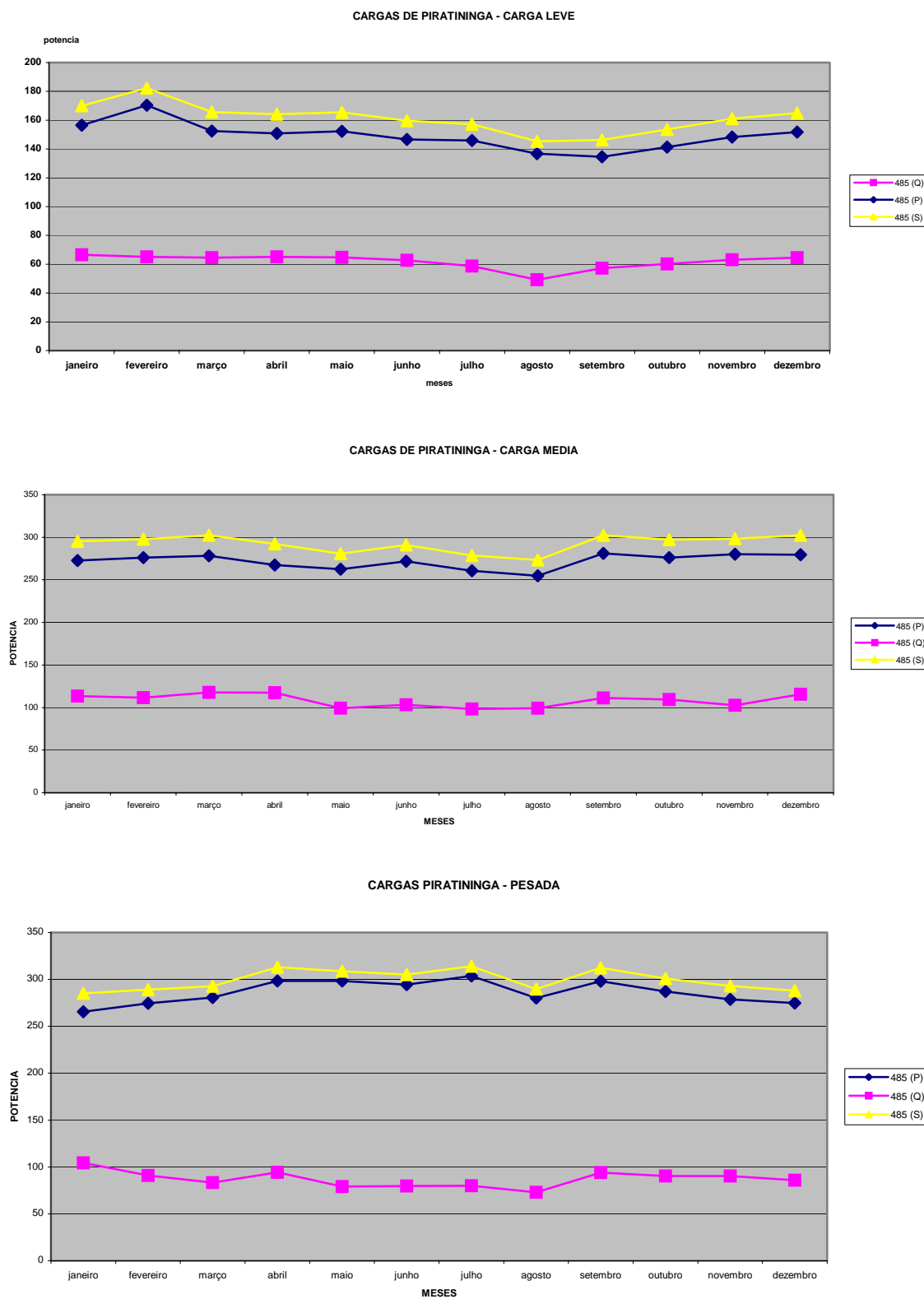


Figura 3.5 - Cargas da barra nº 485 – SE Piratininga.  
Obs: valores de potência em  $10^6$

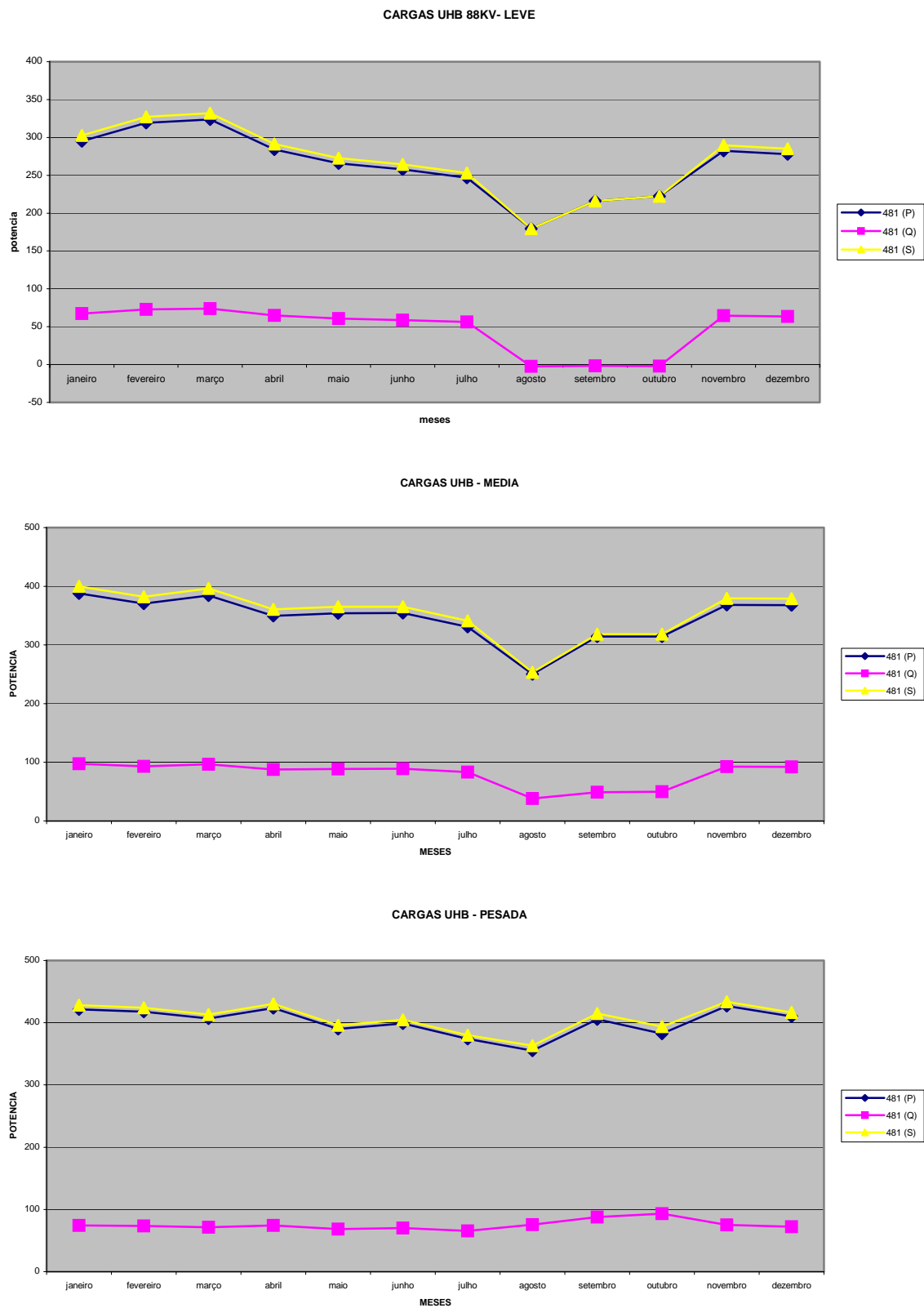


Figura 3.6 - Cargas na barra nº 481 – ETU Henry Borden  
Obs: valores de potência em  $10^6$

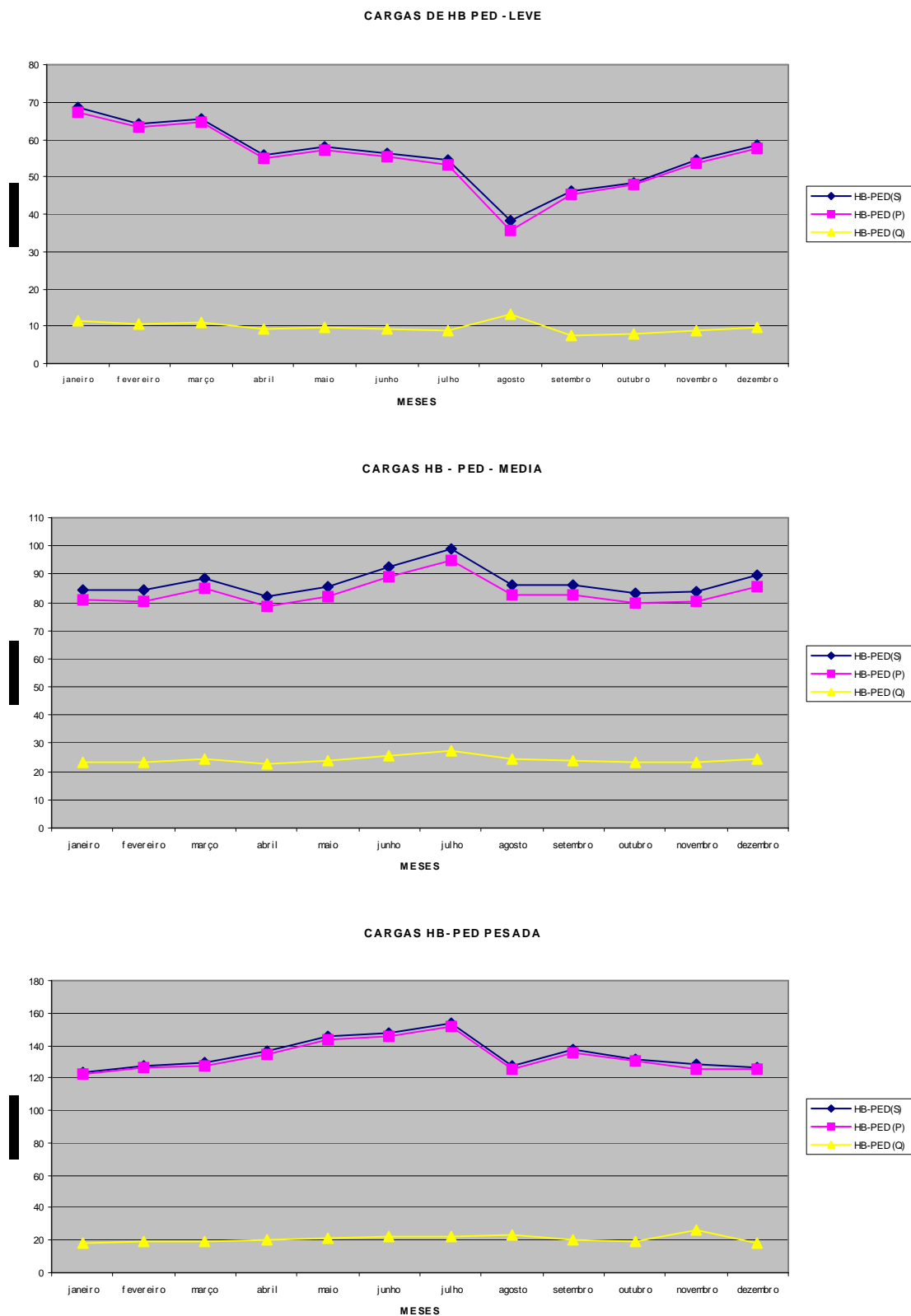


Figura 3.7 - Cargas nas barras Imigrantes (3499), Varginha I e II (3488 e 3489), e Rio Bonito (3492)  
Obs: valores de potência em  $10^6$

### 3.7 Operação do Sistema:

#### 3.7.1 Área de 230kV e 88kV

Com o aumento das cargas e conseqüente 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. Isto levou a certas restrições na operação do sistema [25]:

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

A Usina Hidroelétrica Henry Borden devido a problemas ambientais, já citados anteriormente, não dispõem de água suficiente para a geração em carga máxima. Sendo normalmente 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 Borden, eliminando as sobrecargas das linhas de 88kV Henry Borden - Baixada Santista.

Outra característica de operação e despacho da Usina de 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 volta ao seu despacho minimizado. 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 um importante papel na regulação de tensão da região, pois ela consegue manter a tensão nos barramentos de 88kV e 230kV, através de seu despacho de reativo.

Sempre que é necessário são utilizados os bancos de capacitores dos barramentos de 88kV para auxiliar no controle de tensão da malha de 345kV.

Devido a ocorrência de tensão baixa nas cargas das linhas de 88kV Henry Borden – Pedreira (ETD's Varginha, Imigrantes e Rio Bonito), quando em configuração normal, ou seja, alimentadas pelo barramento 88kV da ETU Henry Borden, uma alternativa pode ser ligar todas as cargas apenas pelo barramento da ETU de Pedreira, devido à restrições do nível de curto circuito entre os dois barramentos.

As linhas de 88kV entre as ETU Henry Borden – Pedreira circuitos nº1 e 2 não podem ficar ligadas em operação cruzada, ou seja, uma linha ligada em cada ponta, pois o anel de 88kV entre Piratininga – Pedreira – Henry Borden seria fechado através do secundário dos transformadores das ETD's: Varginha, Imigrantes e Rio Bonito.

A elevação de geração térmica da UTE 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 carregamentos máximos permitidos.

#### 3.7.2 Área de 345kV e 440kV

No período de carga média os compensadores síncronos da SE Embu – Guaçu, SE Santo Ângelo, SE Tijuco Preto e SE Ibiúna deverão operar, sempre que possível, com uma reserva de 1300MVar [26] [27] [28] [29].

Os compensadores síncronos da SE Embu – Guaçu e SE Santo Ângelo 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 plano possível) ao longo de toda área de 440kV, procurando sempre que possível, manter em condições normais, folga de regulação tanto no sentido de aumentar como abaixar a tensão do sistema.

O CNOS e o COS-SP coordenam junto com a EMAE, no período de carga pesada as providências necessárias para a maximização da geração em Henry Borden (EMAE), respeitando a reserva de potência, no sentido de manter a área de São Paulo em nível de confiabilidade elevado e reduzir o carregamento no sistema de transmissão comum às áreas Rio e São Paulo.

Visando suprir as necessidades de potência reativa do processo de conversão do ELO CC, em condição de regime normal, os compensadores síncronos de Ibiúna devem operar mantendo uma margem global equivalente a capacidade de 1 compensador síncrono (-200 / +300 MVar). Assim em função do número de compensadores síncronos em serviço, as faixas de operação dos mesmos devem ser as seguintes:

Com 1 compensador síncrono: em torno de zero MVar

Com 2 compensadores síncronos: -100 + 150MVar por compensador síncrono

Com 3 compensadores síncronos: -135 + 200MVar por compensador síncrono

Com 4 compensadores síncronos: -150 + 225MVar por compensador síncrono

Os barramentos de 230 e 440kV deverão operar dentro das faixas estabelecidas de tensão. Para os demais barramentos de 230kV e 440kV: tensão máxima 105% e tensão mínima de 95%, controle dentro das faixas pré-estabelecidas, conforme tabelas de faixa de tensão abaixo.

Tabela 3.13 - Faixas para controle de tensão nos barramentos de controle Área São Paulo.

NOME	Nº BARRA	PESADA (kV)	MÉDIA (kV)	LEVE (kV)
IBIUNA – 345kV	86	354 A 362	354 a 352	335 a 348
S. ÂNGELO – 345kV	594	335 a 362	335 a 362	335 a 348
E. GUAÇU – 345kV	582	335 a 362	335 a 362	335 a 348
T. 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

## **CAPÍTULO IV – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

### **4.1- Introdução**

Para o desenvolvimento do estudo foi utilizado o Programa de Análise de Redes (ANAREDE). Este é o programa oficial do ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico e das empresas de energia elétrica conectadas ao SIN - Sistema Interligado Nacional.

Os dados necessários para a execução são: cargas, geração, manutenção de equipamentos, inclusão de novos equipamentos e dados técnicos característicos de todos os equipamentos incluídos no sistema. Estes dados são fornecidos pelas empresas de energia elétrica, nos grupos: anual, quadrimensal e mensal do ONS.

Os dados do programa contemplam a Rede de Operação, incluindo a Rede Básica (tensão igual ou superior a 230kV) e as demais redes com tensão inferior a 230kV que tenham influência direta na operação do SIN que são disponibilizados mensalmente a todos os agentes.

O programa ANAREDE é utilizado pelo ONS e pelas empresas de energia elétrica para prever a geração necessária para o sistema, para análise dos desligamentos de equipamentos elétricos para manutenção, estudo de modificações topológicas e de geração no sistema.

### **4.2 O Programa ANAREDE**

O Programa Análise de Redes – ANAREDE é um conjunto de aplicações computacionais resultante de esforços do CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, no sentido de tornar disponível às empresas do setor, novas técnicas, algoritmos e métodos

eficientes, adequados à realização de estudos nas áreas de operação e de planejamento de sistemas elétricos de potência.

O conjunto de aplicações integradas é composto dos seguintes programas:

- 1 - Programa de Fluxo de Potência;
- 2 - Programa de Equivalente de Redes;
- 3 - Programa de Análise de Contingências;
- 4 - Programa de Análise de Sensibilidade de Tensão;
- 5 - Programa de Redespacho de Potência Ativa;
- 6 - Programa de Fluxo de Potência Continuado;

### 4.2.1 Programa de Fluxo de Potência

#### 4.2.1.1 Função do programa

O programa de fluxo de potência tem como objetivo o cálculo do estado operativo da rede elétrica para definidas condições de carga, geração, topologia e determinadas restrições operacionais.

#### 4.2.1.2 Algoritmo do programa de fluxo de Potência

O processo iterativo do cálculo do estado operativo da rede elétrica para as condições impostas consiste na obtenção de forma alternada, de soluções para o sistema CA e para o sistema CC. O algoritmo é executado até que as variações, entre iterações consecutivas, das potências injetadas na rede CA e pela rede CC sejam menores que uma determinada tolerância.

O primeiro passo do processo de solução é a determinação do estado operativo do sistema CC para as condições iniciais estabelecidas. Nos passos seguintes os sistemas CA e CC são solucionados alternadamente, considerando os controlos automáticos ativados, até a obtenção da convergência da interface entre estes sistemas.

Dois métodos estão disponíveis para a solução das equações da rede elétrica CA:

---

- Método Desacoplado Rápido
- Método de Newton

A solução das equações é normalmente efetuada pelo Método Desacoplado Rápido.

### 4.3 Configurações estudadas.

Para o estudo da influência do reativo gerado pelas unidades reversíveis da Usina Elevatória de Pedreira, foi considerada a configuração operativa normal. Quando há necessidade de sincronismo das unidades para bombeamento, o anel de 88kV entre as subestações Piratininga, Pedreira e Henry Borden, tem que ficar aberto devido ao nível admissível de curto circuito dos disjuntores da região.

A ETU Pedreira possui barramento duplo de 88kV, o que possibilita a abertura do anel, através dos disjuntores de saída das linhas de transmissão de Henry Borden - Pedreira circuitos nº 1 e 2 e da linha Piratininga - Pedreira e do disjuntor de paralelo de barras de 88 kV.

Outra possibilidade de abertura do anel seria através do disjuntor da linha Piratininga - Pedreira na SE Piratininga ou da abertura dos disjuntores das linhas Henry Borden - Pedreira circuitos nº 1 e 2 na ETU Henry Borden (88kV).

Foram analisados quatro casos possíveis, nestes casos as unidades geradoras reversíveis da Usina Elevatória de Pedreira foram colocadas como compensadores síncronos, consumindo energia ativa e gerando energia reativa para o sistema.

Na simulação computacional (programa ANAREDE) da barra nº 483, na qual está conectada a Usina Elevatória de Pedreira, esta barra foi estabelecida como sendo do tipo PQ, com P igual a zero e Q de  $-111\text{MVar}$  a  $+100\text{MVar}$ . Esse limite foi estabelecido com base nos dados obtidos nos ensaios das unidades e pela operação da unidade nº 8 que já foi operada como

síncrono para o sistema. O programa despachou o reativo da usina, conforme necessidade do sistema.

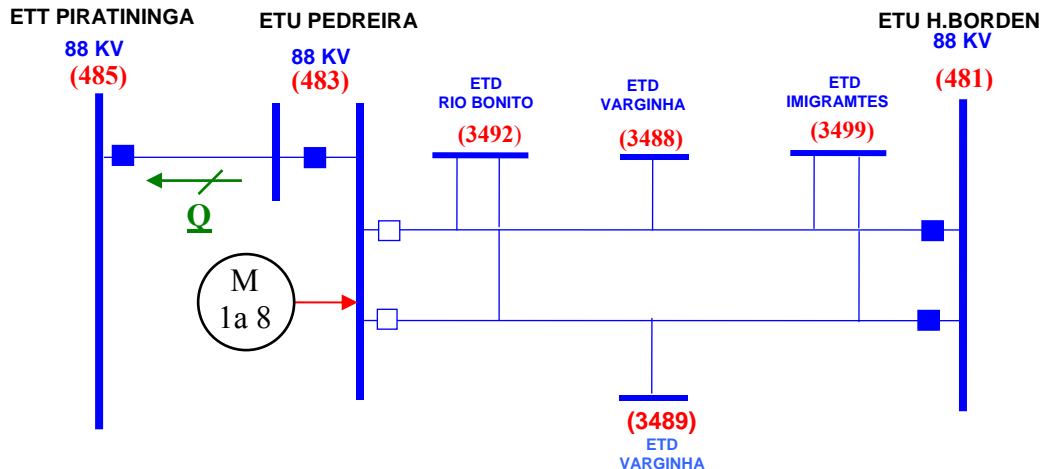
### 4.3.1 Configuração Elétrica do Caso nº 1

A configuração elétrica do caso nº 1 é mostrado na Figura 4.1.

As linhas de transmissão Henry Borden – Pedreira, circuitos nº 1 e 2, ficaram abertos na ETU Pedreira e fechados na ETU Henry Borden (88kV). A linha de transmissão Piratininga - Pedreira ficou ligada na SE Piratininga (88kV) e na ETU Pedreira. O reativo gerado pelas unidades da Usina Elevatória de Pedreira foi inserido no sistema através da linha de transmissão Piratininga – Pedreira, direcionado para SE Piratininga 88kV e as cargas das linhas transmissão Henry Borden - Pedreira ficaram alimentadas pela ETU Henry Borden.

Verifica-se, portanto a influência da geração da potência reativa pela Usina Elevatória de Pedreira na SE Piratininga e nas demais subestações da região.

Este caso se constitui na configuração de operação mais utilizada atualmente, com as ETD's Rio Bonito, Varginha e Imigrantes conectadas à ETU Henry Borden, sem a geração de potência reativa na Usina Elevatória de Pedreira.



□ → disjuntor aberto

■ → disjuntor fechado

M → motor em vazio, não está bombeando

Figura 4.1 - Configuração elétrica do caso nº 1.

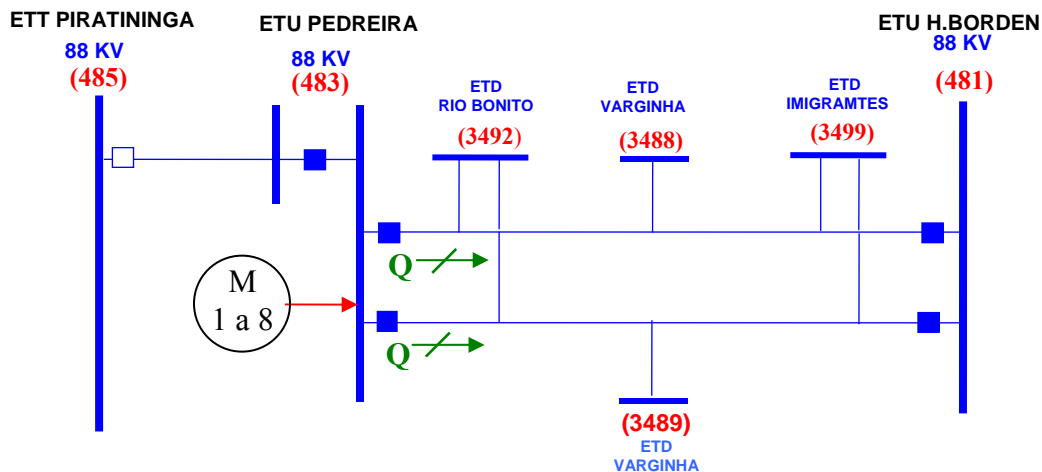
#### 4.3.2 Configuração Elétrica do Caso nº 2

No caso nº 2 a configuração elétrica é mostrada na Figura nº4.2.

As linhas de transmissão Henry Borden - Pedreira circuitos nº 1 e 2, ficaram ligadas na ETU Pedreira e na ETU Henry Borden (88kV). A linha de transmissão Piratininga - Pedreira ficou desligada na SE Piratininga (88kV). O reativo gerado pelas unidades da Usina Elevatória de Pedreira foi inserido no sistema através das linhas Henry Borden - Pedreira circuitos nº 1 e 2, direcionado para ETU Henry Borden 88kV e as cargas das linhas Henry Borden - Pedreira ficaram alimentadas pela ETU Henry Borden.

Verifica-se, portanto a influência da geração do reativo na ETU Henry Borden (88kV) e nas demais subestações da região.





$\square \rightarrow$  disjuntor aberto

■  $\rightarrow$  disjuntor fechado

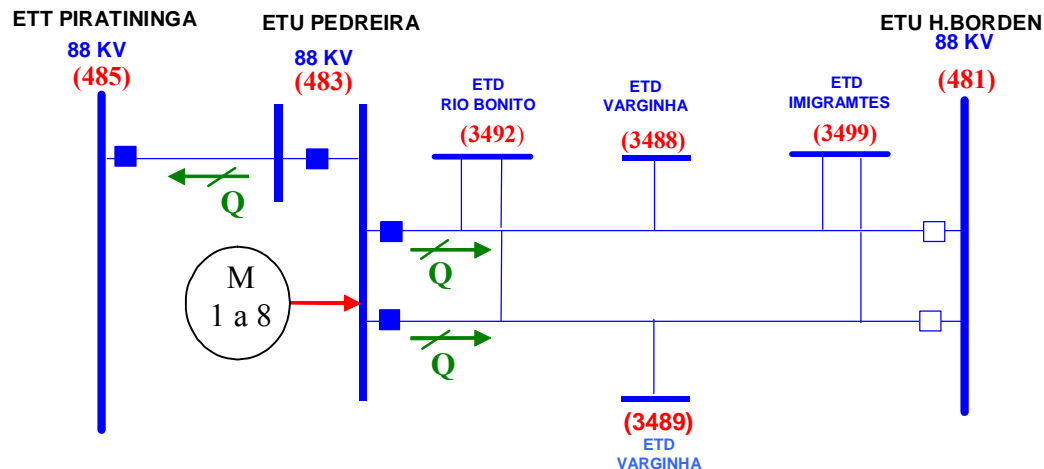
M → motor em vazio, não está bombeando

Figura 4.2 - Configuração elétrica do caso nº 2.

### 4.3.3 Configuração Elétrica do Caso nº 3

Na Figura 4.3 é mostrada a configuração elétrica do caso nº 3.

Os disjuntores das linhas de transmissão Henry Borden - Pedreira circuitos nº 1 e 2, ficaram fechados na ETU Pedreira e abertos na ETU Henry Borden (88kV). A linha de transmissão Piratininga - Pedreira ficou ligada na SE Piratininga (88kV) e na ETU Pedreira (88kV). O reativo gerado pelas unidades da Usina Elevatória de Pedreira foi inserido no sistema através das linhas Henry Borden - Pedreira circuitos nº 1 e 2 e da linha Piratininga - Pedreira, direcionado para ambos os lados. As cargas das linhas Henry Borden - Pedreira ficaram alimentadas pela ETU Pedreira. Neste caso, vamos verificar a influência da geração da potência reativa na SE Piratininga e nas demais subestações da região.



□ → disjuntor aberto

■ → disjuntor fechado

M → motor em vazio, não está bombeando

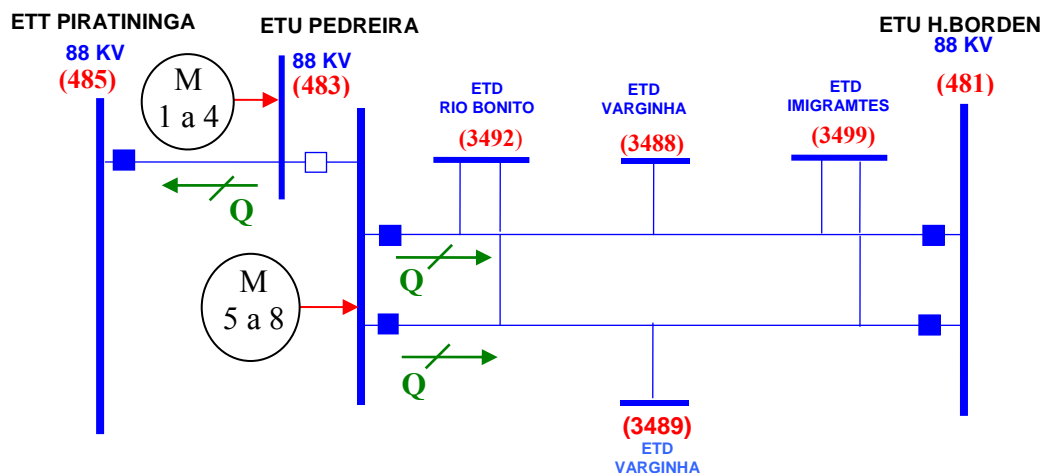
Figura 4.3 - Configuração elétrica do caso nº 3.

#### 4.3.4 Configuração Elétrica do Caso nº 4

A configuração elétrica do caso nº4 é apresentada na Figura 4.4.

No caso nº 4, na ETU Pedreira o disjuntor de paralelo de barras de 88kV foi aberto, operando a subestação com duas barras simples. Em uma barra foram conectadas as linhas Henry Borden - Pedreira circuitos nº 1 e 2 e metade das unidades reversíveis da Usina Elevatória de Pedreira, na outra foi conectada a linha Piratininga - Pedreira e as demais unidades reversíveis da Usina Elevatória de Pedreira.

Neste caso poderemos ver a influência da potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira tanto para SE Piratininga como para ETU Henry Borden.



□ → disjuntor aberto

■ → disjuntor fechado

M → motor em vazio, não está bombeando

Figura 4.4 - Configuração elétrica do caso nº 4

#### 4.4 Cargas Analisadas.

Para a análise computacional foram escolhidos os meses de Fevereiro, Julho e Agosto do ano de 2004, nos períodos de carga leve, média e pesada.

O mês de Fevereiro foi escolhido por ser um mês de carga alta na região da Baixada Santista e média na região da SE Piratininga e nas ETD's Varginha Rio Bonito e Imigrantes.

O mês de Julho foi escolhido por ter carga alta na SE Piratininga e nas ETD's Varginha, Rio Bonito e Imigrantes e média na Baixada Santista.

O mês de Agosto foi escolhido por ter carga baixa na região da SE Piratininga, Baixada Santista e nas ETD's Varginha, Rio Bonito e Imigrantes.

### 4.5 Contingências analisadas.

Dos casos analisados foram simuladas algumas contingências, conforme critério estabelecido pelo ONS:

- Transformadores 1 por vez;
- Linhas de transmissão em faixas (torres) diferentes 1 por vez;
- Linhas de transmissão que compartilham a mesma faixa 2 por vez.

As contingências analisadas não prevêem ilhamento no sistema no entorno da EMAE.

Contingências analisadas:

- Perda do compensador síncrono de Ibiúna
- Perda do compensador síncrono de Santo Ângelo
- Perda do compensador síncrono de Embu – Guaçu
- Perda do compensador síncrono de Tijuco Preto
- Perda de um banco de transformadores – 100MVA (SE Piratininga)
- Perda de um banco de transformadores – 400MVA (SE Baixada)
- Perda do autotransformador – 500MVA (SE Baixada)
- Perda de uma linha de 88kV Henry Borden - Pedreira
- Perda de duas linhas de transmissão Tijuco Preto – Baixada (345kV)
- Perda de duas linhas de transmissão Interlagos – Piratininga (230KV)
- Perda de uma linha de transmissão Ibiúna – Interlagos (345kV)
- Perda da linha de transmissão Henry Borden - Piratininga (230kV)
- Perda das duas linhas de transmissão H. Borden – Baixada (230kV)
- Perda das duas linhas de transmissão Itapeti – Santo Angelo (345kV)
- Perda da linha de transmissão Interlagos – Embu Guaçu (345kV)

- Perda de uma linha de transmissão H.Borden – Baixada (88kV)
- Perda de duas linhas de transmissão Ibiúna – T.Preto (345kV)
- Perda da linha de transmissão Embu Guaçu (440kV)

## CAPITULO V – ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1. Introdução

Os casos simulados no programa ANAREDE, conforme configurações elétricas mostradas no capítulo IV, nos permitem fazer uma análise do comportamento do sistema com a inserção da potência reativa produzida na Usina Elevatória de Pedreira, através da utilização de suas máquinas como motores síncronos sobre-excitados.

### 5.2. Resultados de potência gerada e tensões

O despacho mínimo da Usina Hidroelétrica Henry Borden é de 19MW em 88kV e de 15MW em 230kV, com turbinamento de  $6\text{m}^3/\text{s}$ . Esses valores são necessários para dar estabilidade nas unidades geradoras que estão em sincronismo, para possibilitar a captação de água pela SABESP no município de Cubatão e possibilitar a refrigeração das unidades geradoras.

Na Usina Termoelétrica Piratininga (88kV) o despacho mínimo é de 20 MW, valor necessário para dar estabilidade ao turbo gerador de uma unidade geradora.

A Usina Termoelétrica Piratininga (230kV) não foi despachada, devido estar em fase de modernização e reforma para possibilitar seu funcionamento em ciclo combinado.

#### 5.2.1. Período de carga pesada

Os resultados obtidos das simulações computacionais para o período de carga pesada são apresentadas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Resultados da geração no período de carga pesada.

MÊS: FEVEREIRO										
BARRA	Original		CASO 1		CASO 2		CASO 3		CASO 4	
	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
400-HB 88kV	100	95,9	100	96,6	96	84,9	96	81,1	98	83,8
401-HB 230kV	15	49,8	15	50,1	15	47,5	15	48,7	15	47,8
403-PI 88kV	20	26,6	20	26,6	20	26,7	20	26,7	20	26,6
483-PED (1)	0	0	0	25	0	44	0	42,2	0	43,1
4831-PED (2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,8
MÊS: JULHO										
BARRA	Original		CASO 1		CASO 2		CASO 3		CASO 4	
	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
400-HB 88kV	77	45,8	77	45,8	71	37,7	19	32,3	69	38,2
401-HB 230kV	15	49,4	15	49,8	15	46,1	15	46,1	15	46,7
403-PI 88kV	20	25,6	20	25,6	20	24,8	72	27,6	20	26,6
483-PED (1)	0	0	0	2,9	0	57,1	0	41,8	0	51,3
4831-PED (2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,9
MÊS: AGOSTO										
BARRA	Original		CASO 1		CASO 2		CASO 3		CASO 4	
	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
400-HB 88kV	44	57,9	44	57,9	41	48,2	19	41,9	39	48,4
401-HB 230kV	15	46,4	15	46,3	15	43,2	15	41,8	15	41,4
403-PI 88kV	20	25,1	20	26,6	20	25,6	58	26,8	20	25,6
483-PED (1)	0	0	0	3,2	0	53,2	0	41,3	0	51,3
4831-PED (2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2

Durante as simulações, foi observado que no período de carga pesada, em alguns casos, as LT's Henry Borden – Baixada 88kV circuitos 1 a 4 e os transformadores 230/88kV da SE Piratininga apresentavam sobrecargas. Como estes componentes estão localizados na área de 88KV, para eliminar estas sobrecargas durante as simulações foi necessário aumentar o despacho mínimo das usinas de Henry Borden e de Piratininga.

No caso original, sem a utilização da geração de potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira, as cargas das ETD's Varginha, Imigrantes e Rio Bonito estão sendo alimentadas através da barra nº 481 (Henry Borden 88KV). Nessa situação foi necessário o aumento do despacho da usina Henry Borden (88kV) para: 100MW no mês de fevereiro, 77MW no mês de julho e 44MW no mês de agosto.

Nos casos nºs 2 e 4, onde a geração de potência reativa é feita pela Usina Elevatória de Pedreira, as cargas das ETD's Varginha, Imigrantes e Rio Bonito ficaram alimentadas através da ETU Henry Borden (barra nº 481). O reativo gerado pela Usina Elevatória de Pedreira atende primeiro a essas cargas e o restante do reativo é utilizado na barra nº 481. Como consequência há uma necessidade menor no despacho de geração da usina de Henry Borden (88kV) para: 96MW ou 98MW no mês de fevereiro (caso nº 2 e 4); 71MW ou 69MW no mês de julho (caso nº 2 e 4) e 41 ou 39MW no mês de agosto (caso nº 2 e 4).

No caso original, sem a utilização da geração de potência reativa na Usina Elevatória de Pedreira, as cargas das ETD's Varginha, Imigrantes e Rio Bonito são alimentadas através da barra nº 481 (Henry Borden 88KV), não há sobrecarga nos bancos de transformadores de 88/230kV da SE Piratininga entre as barras nº 485 e 484. Porém, no caso 3, onde, essas cargas ficaram alimentadas através da barra nº 483 (Pedreira 88kV) os referidos bancos de transformadores apresentaram sobrecargas em alguns meses do ano, no período de carga pesada. Para a retirada dessas sobrecargas deve-se aumentar a geração da Usina Termoelétrica Piratininga. Como resultado do estudo verificou-se que era necessária a geração de 72MW para o mês de julho e de 58MW para o mês de agosto. Sem a geração de potência reativa na Usina Elevatória de Pedreira, a geração necessária na Usina Termoelétrica Piratininga seria: 78MW para o mês de julho e de 64MW para o mês de agosto.

---



Nos casos n<sup>os</sup> 2, 3 e 4 estudados foi observado que quando a potência reativa era gerada na usina elevatória de Pedreira, houve uma diminuição de geração de potência reativa na usina Henry Borden (88kV), carregando menos os geradores e aumentando sua capacidade de geração de potência ativa.

Nas tabelas 5.2 a 5.4 são mostrados os valores de tensões obtidos nas simulações computacionais para carga pesada.

Tabela 5.2 - Tensão nas barras mês de fevereiro carga pesada (valores em pu)

Barra	original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
3499 (ETD Imigrantes)	0,920	0,920	0,991	0,988	0,991
3488 (ETD Varginha)	0,880	0,880	0,984	0,984	0,984
3489 (ETD Varginha)	0,979	0,979	0,993	0,993	0,993
3492 (ETD R. Bonito)	0,882	0,882	0,990	0,990	0,990

Tabela 5.3 - Tensão nas barras mês de julho carga pesada (valores em pu)

Barra	original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
3499 (ETD Imigrantes)	0,890	0,890	0,988	0,987	0,984
3488 (ETD Varginha)	0,848	0,848	0,981	0,981	0,975
3489 (ETD Varginha)	0,971	0,971	0,991	0,993	0,985
3492 (ETD R. Bonito)	0,841	0,841	0,989	0,989	0,982

Tabela 5.4 - Tensão nas barras mês de agosto carga pesada (valores em pu).

Barra	original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
3499 (ETD Imigrantes)	0,899	0,899	0,989	0,987	0,987
3488 (ETD Varginha)	0,858	0,858	0,982	0,982	0,979
3489 (ETD Varginha)	0,975	0,975	0,991	0,993	0,989
3492 (ETD R. Bonito)	0,851	0,851	0,989	0,989	0,986

Conforme informação da empresa distribuidora local AES Eletropaulo, o valor ideal para as tensões nas ETD's Varginha, Rio Bonito e Imigrantes, durante o período de carga pesada seria de 1,0pu referidas a 88kV.

No caso original, sem a utilização da geração da potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira as tensões nestas ETD's apresentavam valores muito abaixo de 1,0 pu, variando entre 0,841 a 0,978 pu. Isto ocorre porque as impedâncias das linhas de 88kV Henry Borden – Pedreira, mostradas na Tabela 3.1, possuem valores elevados e a única fonte de geração de potência reativa mais próxima é a usina hidroelétrica de Henry Borden 88kV, que está conectada na barra nº 481, imediatamente à montante das linhas Henry Borden - Pedreira.

Nos casos estudados nºs 2, 3 e 4, nos quais a geração de potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira está direcionado para as barras nº 3499, 3488, 3489 e 3492, há uma melhora considerável no nível de tensão, ficando com valores bem próximos dos 1,0 pu, o que resolveria o problema de baixa tensão no período de carga pesada.

### 5.2.2 Período de carga média

Os resultados da geração no período de carga média são mostrados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Resultados da geração no período de carga média.

MÊS: FEVEREIRO										
BARRA	Original		CASO 1		CASO 2		CASO 3		CASO 4	
	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
400-HB 88kV	19	111,2	19	111,3	19	102,6	19	97,8	19	102,4
401-HB 230kV	15	71,1	15	71,2	15	69,1	15	67,2	15	69
403-PI 88kV	20	26,7	20	26,5	20	26,5	20	26,6	20	26,7
483-PED (1)	0	0	0	0,6	0	35,1	0	35,8	0	34,5
4831-PED (2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5
MÊS: JULHO										
BARRA	Original		CASO 1		CASO 2		CASO 3		CASO 4	
	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
400-HB 88kV	19	52,7	19	52,7	19	47,4	19	44,9	19	47,4
401-HB 230kV	15	47,7	15	48,4	15	45,5	15	45,1	15	45,5
403-PI 88kV	20	26,7	20	26,7	20	26,7	20	26,7	20	26,8
483-PED (1)	0	0	0	7,7	0	44,4	0	34,8	0	43,8
4831-PED (2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MÊS: AGOSTO										
BARRA	Original		CASO 1		CASO 2		CASO 3		CASO 4	
	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
400-HB 88kV	19	92,5	19	92,6	19	86,5	19	79,7	19	84,1
401-HB 230kV	15	61,8	15	61,8	15	59,7	15	58,5	15	59,7
403-PI 88kV	20	26,3	20	26,3	20	26,7	20	26,3	20	26,7
483-PED (1)	0	0	0	0,6	0	39,1	0	41,2	0	38,0
4831-PED (2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4

No período de carga média não foram observadas sobrecargas nas LT's Henry Borden – Baixada 88kV circuitos 1 a 4 e nos transformadores 230/88kV da SE Piratininga, sendo que as usinas hidroelétrica de Henry Borden e a termoelétrica Piratininga foram despachadas com seus valores mínimos.

Nas Tabelas 5.6 a 5.8 são apresentadas as tensões nas barras obtidas das simulações para a carga média.

Tabela 5.6 - Tensão nas barras mês de fevereiro carga média (valores em pu).

Barra	original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
3499 (ETD Imigrantes)	0,920	0,920	0,991	0,988	0,991
3488 (ETD Varginha)	0,880	0,880	0,984	0,984	0,984
3489 (ETD Varginha)	0,979	0,979	0,993	0,993	0,993
3492 (ETD R. Bonito)	0,882	0,882	0,990	0,990	0,990

Tabela 5.7 - Tensão nas barras mês de julho carga média (valores em pu).

Barra	original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
3499 (ETD Imigrantes)	0,890	0,890	0,988	0,987	0,984
3488 (ETD Varginha)	0,848	0,848	0,981	0,981	0,975
3489 (ETD Varginha)	0,971	0,971	0,991	0,993	0,985
3492 (ETD R. Bonito)	0,841	0,841	0,989	0,989	0,982

Tabela 5.8 - Tensão nas barras mês de agosto carga média (valores em pu).

Barra	original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
3499 (ETD Imigrantes)	0,920	0,920	0,991	0,988	0,991
3488 (ETD Varginha)	0,880	0,880	0,984	0,984	0,984
3489 (ETD Varginha)	0,979	0,979	0,993	0,993	0,993
3492 (ETD R. Bonito)	0,882	0,882	0,990	0,990	0,990

A tensão ideal das ETD's Varginha, Rio Bonito e Imigrantes, durante o período de carga média, seria 1,0pu (88kV), conforme informação da AES Eletropaulo.

No caso original, sem a utilização da geração de potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira, as tensões nestas ETD's apresentavam valores muito abaixo de 1,0 pu, variando entre 0,841 a 0,979pu.

Nos casos estudados nº 2, 3 e 4, onde a geração de potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira está direcionado para as barras nº 3499, 3488, 3489 e 3492, foi verificado uma melhora considerável no nível de tensão, ficando com valores bem próximos de 1,0 pu, o que resolveria o problema de baixa tensão no período de carga média.

### 5.2.3 Período de carga leve

Os resultados da geração no período de carga leve são mostrados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Resultados da geração no período de carga leve.

MÊS: FEVEREIRO										
BARRA	Original		CASO 1		CASO 2		CASO 3		CASO 4	
	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
400-HB 88kV	19	53	19	53	19	53	19	53	19	53
401-HB 230kV	15	67,3	15	67,3	15	66,8	15	64,4	15	66,9
403-PI 88kV	20	26,6	20	26,6	20	26,6	20	26,5	20	26,6
483-PED (1)	0	0	0	0,5	0	1,7	0	17,6	0	2,2
4831-PED (2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MÊS: JULHO										
BARRA	Original		CASO 1		CASO 2		CASO 3		CASO 4	
	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
400-HB 88kV	19	53,0	19	53,0	19	53,0	19	53,0	19	53,0
401-HB 230kV	15	67,3	15	67,3	15	66,8	15	64,4	15	66,9
403-PI 88kV	20	26,6	20	26,6	20	26,6	20	26,5	20	26,6
483-PED (1)	0	0	0	0,5	0	1,7	0	17,6	0	2,2
4831-PED (2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MÊS: AGOSTO										
BARRA	Original		CASO 1		CASO 2		CASO 3		CASO 4	
	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
400-HB 88kV	19	6,0	19	6,0	19	5,6	19	8,9	19	5,6
401-HB 230kV	15	62,1	15	62,2	15	62,2	15	60,2	15	62,2
403-PI 88kV	20	25,3	20	25,3	20	25,3	20	25,3	20	25,5
483-PED (1)	0	0	0	0,4	0	1,1	0	14,3	0	1,3
4831-PED (2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3

No período de carga leve não foram observadas sobrecargas nas LT 's Henry Borden – Baixada 88kV circuitos 1 a 4 e nos transformadores 230/88kV da SE Piratininga, sendo que as usinas hidroelétrica de Henry Borden e a termoeletrica Piratininga puderam ser despachadas no mínimo.

Nas Tabelas 5.10 a 5.12 são apresentadas as tensões nas barras obtidas das simulações para a carga média.

Tabela 5.10 - Tensão nas barras mês de fevereiro carga leve (valores em pu).

Barra	original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
3499 (ETD Imigrantes)	0,969	0,969	0,983	0,991	0,983
3488 (ETD Varginha)	0,954	0,954	0,974	0,989	0,973
3489 (ETD Varginha)	0,992	0,992	0,978	0,993	0,978
3492 (ETD R. Bonito)	0,951	0,951	0,973	0,992	0,973

Tabela 5.11 - Tensão nas barras mês de julho carga leve (valores em pu).

Barra	original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
3499 (ETD Imigrantes)	0,974	0,974	0,994	0,971	0,994
3488 (ETD Varginha)	0,962	0,962	0,994	0,970	0,990
3489 (ETD Varginha)	0,993	0,994	0,993	0,974	0,993
3492 (ETD R. Bonito)	0,960	0,991	0,991	0,973	0,991

Tabela 5.12 - Tensão nas barras mês de agosto carga leve (valores em pu).

Barra	original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
3499 (ETD Imigrantes)	0,975	0,975	0,984	0,972	0,984
3488 (ETD Varginha)	0,963	0,963	0,975	0,970	0,975
3489 (ETD Varginha)	0,994	0,994	0,979	0,974	0,979
3492 (ETD R. Bonito)	0,961	0,961	0,974	0,973	0,974

Conforme informação da empresa distribuidora local AES Eletropaulo, a tensão ideal nas ETD's Varginha, Rio Bonito e Imigrantes, durante o período de carga leve seria de 0,977pu (86kV). Este valor é devido ao carregamento e regulação de tensão dos transformadores.

No caso original, sem a utilização da geração da potência reativa na Usina Elevatória de Pedreira as tensões nestas ETD's apresentavam valores abaixo de 0,977 pu, variando entre 0,951 a 0,975pu.

Nos casos estudados n<sup>os</sup> 2, 3 e 4, nos quais a geração de reativos da Usina Elevatória de Pedreira está direcionado para as barras n<sup>o</sup> 3499, 3488, 3489 e 3492, há uma melhora considerável no nível de tensão, ficando com valores bem próximos dos 0,977 pu, o que resolveria o problema de baixa tensão no período de carga leve.

### **5.3. Análise do reativo gerado pelos síncronos**

#### **5.3.1 Período de carga pesada**

Os resultados da geração de potência reativa dos síncronos no período de carga média são mostrados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Resultados da geração dos síncronos no período de carga pesada.

MÊS: FEVEREIRO					
SÍNCRONO	Original	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)
532-Embu–Guaçu (440kV)	+49,4	+49,4	+48,4	+53	+48,6
593-Santo Ângelo (440kV)	+37,8	+38,1	+36,1	+39,6	+36,2
81-Tijuco Preto (345kV)	+2	+2,3	+2,1	+0,7	+2,1
86- Ibiúna (345kV)	+131,8	+135,9	+109,6	+144,9	+111,9
483-Pedreira (1) 88kV	0	+2,5	+44,0	+42,2	+43,1
4831-Pedreira (2) 88kV	0	0	0	0	+3,8

MÊS: JULHO					
SÍNCRONO	Original	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)
532-Embu–Guaçu (440kV)	-1,9	-1,3	-5,0	-5,8	-4,2
593-Santo Ângelo (440kV)	-11,3	-10,8	-14,4	-16,1	-13,8
81-Tijuco Preto (345kV)	+45,5	+45,9	+39,3	+35,4	+40,1
86- Ibiúna (345kV)	+68,1	+73,7	+33,9	+30,7	+41,4
483-Pedreira (1) 88kV	0	-2,9	+57,1	+41,8	51,3
4831-Pedreira (2) 88kV	0	0	0	0	-5,9

MÊS: AGOSTO					
SÍNCRONO	Original	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)
532-Embu–Guaçu (440kV)	-55,9	-55,6	-58,6	-59,9	-61,4
593-Santo Ângelo (440kV)	-57,5	-57,3	-60,2	-62,4	-63,1
81-Tijuco Preto (345kV)	+56,7	+56,7	+51,1	+46,8	+49,2
86- Ibiúna (345kV)	+70,5	+72,6	+37,8	+31,8	+19,6
483-Pedreira (1) 88kV	0	-3,2	+53,2	+41,3	+51,3
4831-Pedreira (2) 88kV	0	0	0	0	+0,2

Nas simulações dos casos n<sup>os</sup> 2, 3 e 4, com a geração de potência reativa pela Usina Elevatória de Pedreira, pode-se observar que os síncronos são menos solicitados resultando em uma diminuição na geração de reativo. Isto verifica-se, principalmente, nos síncronos de Ibiúna (345kV) e Tijuco Preto (345kV), os mais próximos eletricamente da Usina Elevatória de Pedreira.



Para o sistema elétrico quanto maior a folga dos compensadores síncronos melhor, pois estes teriam uma faixa maior de regulação de tensão, atendendo melhor o sistema no caso de alguma contingência.

### 5.3.2 Período de carga média

Os resultados da geração de potência reativa dos síncronos no período de carga média são mostrados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 - Resultados da geração dos compensadores síncronos no período de carga média.

MÊS: FEVEREIRO					
SÍNCRONO	Original	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)
532-Embu–Guaçu (440kV)	+31,2	+31,0	+32,7	+33,3	+32,7
593-Santo Ângelo (440kV)	-14,1	-13,9	-15,5	-16,4	-15,5
81-Tijuco Preto (345kV)	-73,9	-73,9	-77,0	-80,4	-77,0
86- Ibiúna (345kV)	-207,6	-205,9	-219,9	-223,6	-219,7
483-Pedreira (1) 88kV	0	+0,6	+35,1	+35,8	+34,5
4831-Pedreira (2) 88kV	0	0	0	0	+0,5

MÊS: JULHO					
SÍNCRONO	Original	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)
532-Embu–Guaçu (440kV)	-1,9	-1,3	-5,0	-5,8	-4,2
593-Santo Ângelo (440kV)	-11,3	-10,8	-14,4	-16,1	-13,8
81-Tijuco Preto (345kV)	+45,5	+45,9	+39,3	+35,4	+40,1
86- Ibiúna (345kV)	+68,1	+73,7	+33,9	+30,7	+41,4
483-Pedreira (1) 88kV	0	-2,9	+57,1	+41,8	+51,3
4831-Pedreira (2) 88kV	0	0	0	0	-5,9

MÊS: AGOSTO					
SÍNCRONO	Original	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)
532-Embu–Guaçu (440kV)	-71,5	-71,3	-73,1	-73,3	-73
593-Santo Ângelo (440kV)	-86,8	-86,6	-88,6	-89,1	-88,3
81-Tijuco Preto (345kV)	-6,9	-6,8	-10,4	-12,9	-10,2
86- Ibiúna (345kV)	-55,9	-54,3	-73,4	-74,8	-72,3
483-Pedreira (1) 88kV	0	+0,6	+39,1	+41,2	+38
4831-Pedreira (2) 88kV	0	0	0	0	+0,4

No período de carga média, dependendo do mês do ano, os compensadores síncronos podem estar gerando ou absorvendo reativo. Com a geração de potência reativa na Usina Elevatória de Pedreira, nos casos n<sup>os</sup> 2, 3 e 4, os síncronos de Ibiúna (345kV) e Tijuco Preto (345kV) podem ser mais ou menos solicitados.

### 5.3.3 Período de carga leve

Os resultados da geração de potência reativa dos síncronos no período de carga leve são mostrados na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 - Resultados da geração dos compensadores síncronos no período de carga leve.

MÊS: FEVEREIRO					
SÍNCRONO	Original	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)
532-Embu–Guaçu (440kV)	-31,0	-30,8	-31,1	-32,6	-31,0
593-Santo Ângelo (440kV)	-61,8	-61,7	-62,0	-63,8	-62,0
81-Tijuco Preto (345kV)	-55,4	-55,3	-55,8	-59,6	-55,7
86- Ibiúna (345kV)	-681,4	-680,2	-682,7	-695,2	-681,7
483-Pedreira (1) 88kV	0	+0,5	+1,7	+17,6	+2,2
4831-Pedreira (2) 88kV	0	0	0	0	+0,5

MÊS: JULHO					
SÍNCRONO	Original	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)
532-Embu–Guaçu (440kV)	-31,0	-30,8	-31,1	-32,6	-31,0
593-Santo Ângelo (440kV)	-61,8	-61,7	-62,0	-63,8	-62,0
81-Tijuco Preto (345kV)	-55,4	-55,3	-55,8	-59,6	-55,7
86- Ibiúna (345kV)	-681,4	-680,2	-682,7	-695,2	-681,7
483-Pedreira (1) 88kV	0	+0,5	+1,7	+17,6	+2,2
4831-Pedreira (2) 88kV	0	0	0	0	0

MÊS: AGOSTO					
SÍNCRONO	Original	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)	Q (MVar)
532-Embu–Guaçu (440kV)	-54,2	-54,0	-54,0	-54,7	-54,0
593-Santo Ângelo (440kV)	-70,3	-70,2	-70,1	-71,0	-70,1
81-Tijuco Preto (345kV)	-120,0	-119,9	-119,8	-122,7	-119,8
86- Ibiúna (345kV)	-790,2	-789,1	-789,0	-797,3	-788,6
483-Pedreira (1) 88kV	0	+0,4	-1,1	+14,3	-1,3
4831-Pedreira (2) 88kV	0	0	0	0	-0,3

No período de carga leve os compensadores síncronos absorvem potência reativa.

Com a geração de potência reativa na Usina Elevatória de Pedreira os compensadores síncronos de Ibiúna (345kV) e Tijuco Preto (345kV) são mais solicitados, aumentando sua necessidade de absorver potência reativa. Isto acontece no caso nº 3.

#### **5.4 Aumento na capacidade das linhas de transmissão e transformadores**

Foram analisadas as linhas e os transformadores que sofreriam maior influência com a geração de potência reativa na Usina Elevatória de Pedreira.

##### **5.4.1 Linhas de 88kV Henry Borden Baixada circuitos nº1 a 4**

Na Tabela 5.16 é mostrado o fluxo de reativo das linhas de 88kV Henry Borden – Baixada, nos quatro circuitos. Nesta Tabela estão indicados os valores nos casos: original (configuração sem a potência reativa gerada pela Usina Elevatória de Pedreira) e nos casos nº 1 a 4, nos quais a geração da UEP é incluída no sistema.

Tabela 5.16 – Fluxo de potência reativa nas linhas 88kV HB – Baixada circuitos 1 a 4.

<u>Caso</u>	FEVEREIRO			JULHO			AGOSTO		
	Pesada (MVar)	Média (MVar)	Leve (MVar)	Pesada (MVar)	Média (MVar)	Leve (MVar)	Pesada (MVar)	Média (MVar)	Leve (MVar)
Original	60,0	45,6	58,0	120,8	100,4	90,0	97,6	52,0	86,4
C1	59,2	45,6	58,0	120,8	100,4	90,0	97,6	52,0	86,4
C2	18,8	15,6	54,4	55,6	56,4	78,0	40,0	14,8	86,4
C3	20,8	16,4	36,8	52,8	56,0	76,0	38,0	18,0	72,8
C4	18,8	16,0	55,6	60,0	56,0	78,0	41,6	17,6	86,4

Pela tabela acima pode-se observar que, com a geração de potência reativa na Usina Elevatória de Pedreira, o fluxo de reativo na linha de 88kV Henry Borden – Baixada circuitos de 1 a 4 diminui, principalmente no período de carga pesada e média. Como consequência há um aumento na capacidade de transmitir potência ativa, fazendo com que o despacho de geração da usina de Henry Borden (88kV) possa ser diminuído. Este novo despacho otimiza a sua geração, fazendo o sistema operar em condições melhores, pois a Usina de Henry Borden teria maiores condições de atender grandes contingências.

#### 5.4.2 Banco de transformadores de 88/345kV da SE Baixada.

Na Tabela 5.17 é apresentado o fluxo de potência reativa nos dois bancos de transformadores de 400MVA - 88/345kV da SE Baixada. Nesta Tabela estão indicados os valores nos seguintes casos: original (configuração sem o reativo gerado pela UEP) e nos casos de nº 1 a 4, nos quais a geração da UEP é incluída no sistema.

Tabela 5.17 – Fluxo de potência reativa nos bancos da SE Baixada

Caso	FEVEREIRO			JULHO			AGOSTO		
	Pesada (MVar)	Média (MVar)	Leve (MVar)	Pesada (MVar)	Média (MVar)	Leve (MVar)	Pesada (MVar)	Média (MVar)	Leve (MVar)
Original	70,8	53,8	68,4	142,5	118,5	106,2	115,2	61,4	101,9
C1	70,8	53,8	68,4	142,5	118,5	106,2	115,2	61,4	101,9
C2	29,6	23,8	64,8	77,3	74,5	94,2	57,5	24,2	99,0
C3	31,6	24,3	47,2	74,5	74,0	92,2	55,5	27,4	88,3
C4	29,6	24,2	66,0	81,7	74,0	94,0	59,2	27,0	98,0

Observa-se que os bancos de transformadores 88/345kV da SE Baixada apresentam uma substancial redução em seu fluxo de potência reativa. Isto ocorre principalmente nas cargas pesada e média nos meses de Fevereiro e Agosto. Pode-se observar também que a maior redução de fluxo de potência reativa ocorre para o caso nº 3 em todas as situações.

#### 5.4.3 Banco de transformadores de 88/230kV da SE Piratininga

O fluxo de potência reativa nos quatro bancos de transformadores de 100MVA - 88/230kV da SE Piratininga é mostrado na tabela 5.18. Foi analisado o caso nº 3, o qual apresenta maior influência sobre os bancos de transformadores, pois as cargas das linhas 88kV Henry Borden – Pedreira ficaram alimentadas pela ETU Pedreira.

Tabela 5.18 – Fluxo de potência reativa nos bancos da SE Piratininga

MES	FEVEREIRO		JULHO		AGOSTO	
CARGA	COM PED.	SEM PED.	COM PED.	SEM PED.	COM PED.	SEM PED.
	MVAr	MVAr	MVAr	MVAr	MVAr	MVAr
LEVE	54,4	72	46,0	58,8	41,2	55,2
MÉDIA	94,8	131,6	86,4	121,6	74,8	116,4
PESADA	77,6	120,0	77,2	118,8	71,2	112,4

Com a geração de potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira há uma substancial redução do fluxo de potência reativa nos bancos de transformadores 88/345kV da SE Piratininga. Isto ocorre principalmente nas cargas pesada e média.

### 5.5 Perdas elétricas no sistema no entorno da Usina Elevatória de Pedreira.

Foram analisadas as perdas elétricas na fronteira do sistema estudado com a influência da geração de potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira. As variações mais significativas se deram nas proximidades da usina.

Na Figura 5.1 é mostrado o diagrama elétrico indicando as barras, linhas e transformadores que foram considerados.

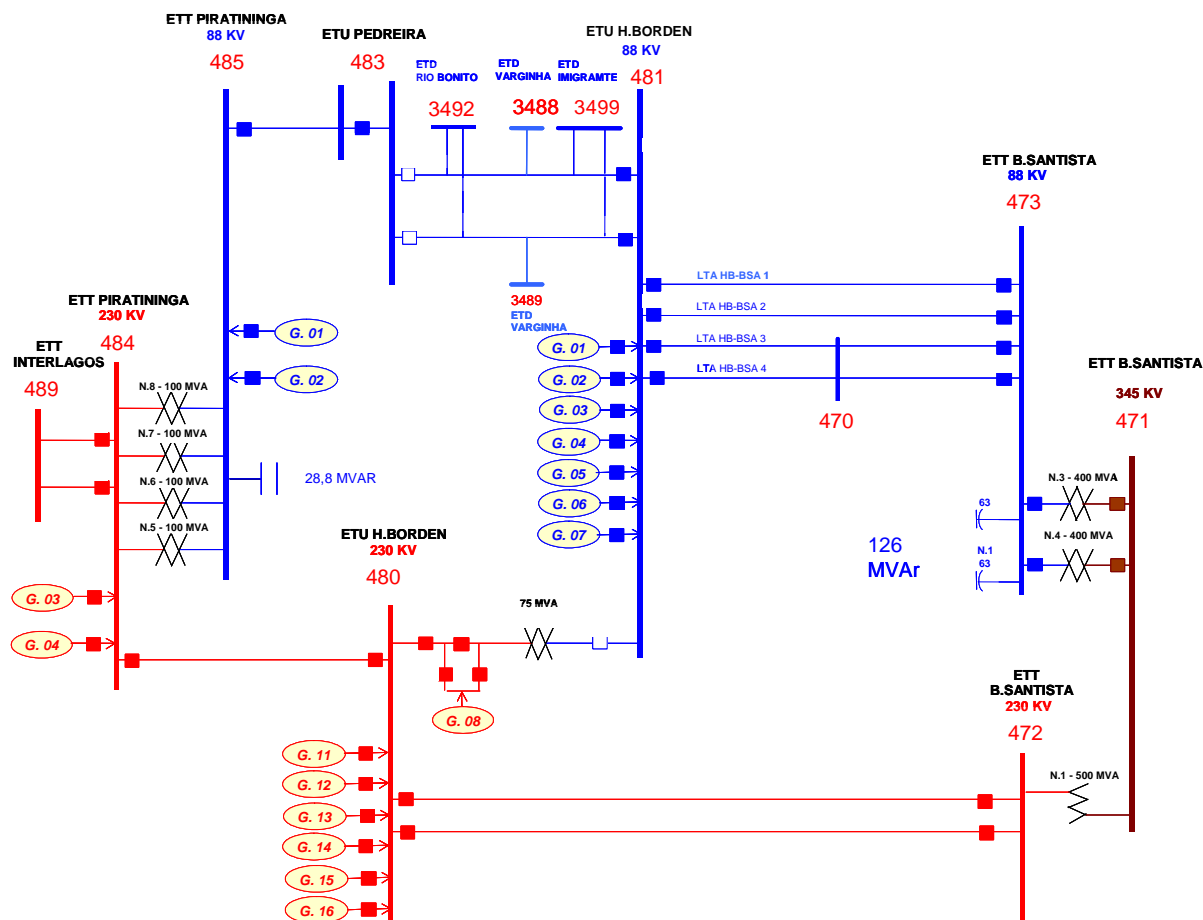


Figura 5.1 – Diagrama elétrico das perdas

Nas Tabelas 5.19 a 5.21 são mostradas as perdas elétricas no entorno da Usina Elevatória de Pedreira

Tabela 5.19 - Perdas na região no período de carga leve.

Caso	FEVEREIRO		JULHO		AGOSTO	
	ATIVA (MW)	REATIVA (MVar)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVar)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVar)
Original	3,8	13,6	2,4	4,9	1,9	5,8
C1	3,8	13,3	2,3	4,9	1,9	5,8
C2	3,7	12,5	2,3	4,5	1,9	5,5
C3	2	4,6	1,3	0,9	0,9	2,4
C4	3,6	12,2	2,2	4,0	1,8	5,2

Tabela 5.20 - Perdas na região no período de carga média.

Caso	FEVEREIRO		JULHO		AGOSTO	
	ATIVA (MW)	REATIVA (MVar)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVar)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVar)
Original	5,7	25,3	6,3	26,3	4,7	23,6
C1	5,7	25,3	6,3	26,2	4,7	23,4
C2	5,1	22,0	5,3	21,1	4,1	19,7
C3	2,9	10,8	2,5	6,9	1,8	7,6
C4	5,0	21,6	5,3	20,5	3,9	20

Tabela 5.21 - Perdas na região no período de carga pesada.

Caso	FEVEREIRO		JULHO		AGOSTO	
	ATIVA (MW)	REATIVA (MVar)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVar)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVar)
Original	8,9	43,4	12,3	62,1	10,5	53,9
C1	8,9	43,4	12,3	61,9	10,6	54
C2	7,6	35,2	9,6	46,1	8,2	40,2
C3	3,8	13,6	4,1	14,2	2,9	11,8
C4	7,5	34,5	9,5	44,5	8,2	40,1

Com a geração de potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira as perdas elétricas dos componentes que pertencem a fronteira em estudo diminuíram nos três períodos de carga: leve, média e pesada. Isto pode ser observado nas Tabelas 5.19, 5.20 e 5.21, onde no caso original as perdas no sistema estudado são calculados sem a utilização da geração de potência reativa naquele local e nos casos de 1 a 4, as perdas são consideradas com a geração da potência reativa na Usina Elevatória de Pedreira.



As perdas reativas tiveram uma redução maior do que as perdas ativas. Sendo que no Caso nº 3 houve a maior redução de 12,3MW para 4,1MW e de 62,1MVar para 14,2 MVar, no mês de Julho, que é o período de carga pesada.

Nas quatro configurações propostas pode-se observar que o Caso nº 3 foi o que apresentou melhor desempenho, com as menores perdas. Essa redução se deu em função da diminuição do fluxo de potência reativa ao longo do sistema, pois a geração na Usina Elevatória de Pedreira está próxima às cargas das ETD's Varginha, Rio Bonito e Imigrantes e da SE Piratininga.

### 5.6 Análise das Contingências

Para análise das contingências, foram consideradas aquelas que não deixam a área em estudo ilhada e também foi seguido o critério adotado atualmente pelo ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, que determina que sejam consideradas contingências duplas nas linhas de transmissão que compartilham a mesma torre.

Das contingências simuladas conforme a lista apresentada no item 4.5, as que apresentavam influência com a geração de potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira são apresentadas a seguir.

#### 5.6.1 Perda de um banco de 345/88kV - 400MVA da SE Baixada

O desligamento de um banco de transformadores de 400MVA - 345/88kV acarreta sobrecarga no banco remanescente, pois devido à restrição de geração da usina Henry Borden, a potência ativa entregue para as cargas da barra nº 481 de 88kV é transmitida pelos dois bancos.

As Tabelas 5.22 a 5.24 mostram o carregamento do banco remanescente em potência e o percentual de sobrecarga.

Tabela 5.22 - Carregamento do banco de transformadores remanescente e percentual de sobrecarga.- Carga leve.

MES	FEVEREIRO				JULHO				AGOSTO			
CASO	COM PED.		SEM PED.		COM PED.		SEM PED.		COM PED.		SEM PED.	
	MVA	%	MVA	%	MVA	%	MVA	%	MVA	%	MVA	%
C1	550	37,5	550	37,5	474	18,5	474	18,5	457,4	14,3	457,4	14,3
C2	553	38,25	549	37,25	472	18,0	474	18,5	462	15,5	458	14,5
C3	469	17,25	469	17,25	408	2,0	408	2,0	393	0,0	393	0,0
C4	550	37,5	549	37,25	470	17,5	474	18,5	462	15,5	462	15,5

Tabela 5.23 - Carregamento do banco de transformadores remanescente e percentual de sobrecarga.- Carga Média.

MES	FEVEREIRO				JULHO				AGOSTO			
CASO	COM PED.		SEM PED.		COM PED.		SEM PED.		COM PED.		SEM PED.	
	MVA	%	MVA	%	MVA	%	MVA	%	MVA	%	MVA	%
C1	589	47,25	589	47,25	574	43,5	574	43,5	544	36,0	544	36,0
C2	588	47,0	588	47,0	567	41,75	572	43,0	542	35,5	543	35,75
C3	495	23,75	495	23,75	456	14,0	456	14,0	453	13,25	453	13,25
C4	585	46,25	588	47,0	564	41,0	572	43,0	545	36,25	543	35,75

Tabela 5.24 - Carregamento do banco de transformadores remanescente e percentual de sobrecarga.- Carga Pesada.

MES	FEVEREIRO				JULHO				AGOSTO			
CASO	COM PED.		SEM PED.		COM PED.		SEM PED.		COM PED.		SEM PED.	
	MVA	%	MVA	%	MVA	%	MVA	%	MVA	%	MVA	%
C1	669	67,25	669	67,25	629	57,25	629	57,25	625,2	56,3	625,2	56,3
C2	663	65,75	666	66,5	619	54,75	629	57,25	616	54,0	624	56,0
C3	604	51,0	604	51,0	497	24,25	497	24,25	474	18,5	474	18,5
C4	668	67,0	673	68,25	620	55,0	632	58,0	617	54,25	623	55,75

Nas tabelas acima para os casos 2 e 4, nos quais as cargas das ETD's Varginha, Rio Bonito e Imigrantes são alimentadas através da ETU Henry Borden 88kV, pode-se observar a influência da potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira em relação ao carregamento do banco remanescente de 400MVA, 345/88kV da SE Baixada.

Quando há geração de potência reativa na Usina Elevatória de Pedreira o carregamento do banco de transformadores remanescente diminui, como pode ser observado no período de cargas pesada e média. No período de carga leve essa influência não é tão expressiva.

Outra observação importante é quanto ao ECE (Esquema de Controle de Emergência) que o ONS adota para evitar o desligamento total das cargas na região. Quando um dos bancos de 400MVA da SE Baixada fica com sobrecarga maior que 19% o ECE é acionado, sendo:

- 1º Estágio: Sobrecarga  $> 19\%$ , corte de carga na região: 100MW;
- 2º Estágio: Sobrecarga  $\geq 40\%$ , corte de carga na região: 70MW;
- 3º Estágio: Sobrecarga  $\geq 55\%$ , corte de carga na região: 60MW;
- 4º Estágio: Sobrecarga  $\geq 70\%$ , corte de carga na região: 40MW.

Nas Tabelas 5.23 e 5.24 pode ser observado que com a geração de potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira em vários casos a sobrecarga do banco remanescente diminui evitando o acionamento do ECE, ou fazendo o ECE atuar em estágios menores.

### 5.6.2 Perda das duas Linha 230kV Piratininga – Interlagos (Circuitos nº 1 e 2).

Para a análise de contingência foi considerado o Caso nº 3, o qual apresentava maior influência, pois as cargas das ETD's Varginha, Rio Bonito e Imigrantes ficaram alimentadas pela SE Piratininga 88kV.

O desligamento dos dois circuitos desta linha acarreta sobrecarga no autotransformador de 500MVA, 345/230kV na SE Baixada Santista em carga pesada. O desligamento implica também sobrecarga na Linha 230kV Henry Borden – Piratininga em carga pesada e média, com indicativo da possibilidade de corte de carga na SE Piratininga.

Nas Tabelas 5.25 e 5.26 são mostrados os valores de tensão nas barras, nos períodos de carga pesada e média, quando da perda das duas Linhas 230kV Piratininga – Interlagos (Circuitos nº 1 e 2).

Tabela 5.25 -Tensão em (PU) nas barras – Carga Pesada.

<b>Barra</b>	<b>FEVEREIRO</b>		<b>JULHO</b>		<b>AGOSTO</b>	
	<b>Com reativo de Pedreira</b>	<b>Sem reativo de Pedreira</b>	<b>Com reativo de Pedreira</b>	<b>Sem reativo de Pedreira</b>	<b>Com reativo de Pedreira</b>	<b>Sem reativo de Pedreira</b>
484	0,938	0,909	0,955	0,924	0,958	0,929
485	1,000	0,999	1,001	1,001	1,001	1,001
483	1,000	0,998	1,001	1,000	1,001	1,000
3492	0,999	0,988	0,989	0,988	0,989	0,988
3488	0,984	0,981	0,981	0,980	0,982	0,981
3499	0,988	0,986	0,987	0,985	0,987	0,986
3489	0,993	0,991	0,993	0,992	0,993	0,992

Tabela 5.26 - Tensão em (PU) nas barras – Carga Média.

<b>Barra</b>	<b>FEVEREIRO</b>		<b>JULHO</b>		<b>AGOSTO</b>	
	<b>Com reativo de Pedreira</b>	<b>Sem reativo de Pedreira</b>	<b>Com reativo de Pedreira</b>	<b>Sem reativo de Pedreira</b>	<b>Com reativo de Pedreira</b>	<b>Sem reativo de Pedreira</b>
484	0,934	0,912	0,937	0,914	0,954	0,923
485	1,000	0,996	1,000	1,000	1,000	1,000
483	1,000	0,995	1,000	0,999	1,000	0,999
3492	0,992	0,987	0,990	0,989	0,991	0,990
3488	0,989	0,984	0,987	0,986	0,988	0,987
3499	0,991	0,987	0,990	0,989	0,991	0,990
3489	0,993	0,988	0,991	0,990	0,992	0,991

Com a utilização da geração de potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira, pode-se observar, pelas tabelas acima, que os valores de tensões não caíram tanto, principalmente na barra nº 484 (Piratininga 230kV).

Na Tabela 5.27 mostra a geração de potência reativa na UEP durante a contingência.

Tabela 5. 27 - Geração de Potência Reativa na Usina Elevatória de Pedreira.

FEVEREIRO		JULHO		AGOSTO	
Carga Pesada (MVar)	Carga Média (MVar)	Carga Pesada (MVar)	Carga Média (MVar)	Carga Pesada (MVar)	Carga Média (MVar)
44,1	38,7	52,8	36,5	52,3	59,0

Nas Tabelas 5.28 e 5.29 mostram o carregamento dos equipamentos durante a contingência nos períodos de carga pesada e média.

Tabela 5.28 - Carregamento dos equipamentos no período de carga pesada.

<b><u>Equipamento</u></b>	<b>Carregamento Nominal (MVA)</b>	<b>FEVEREIRO</b>		<b>JULHO</b>		<b>AGOSTO</b>	
		<b>Com reativo de Pedreira (MVA)</b>	<b>Sem reativo de Pedreira (MVA)</b>	<b>Com reativo de Pedreira (MVA)</b>	<b>Sem reativo de Pedreira (MVA)</b>	<b>Com reativo de Pedreira (MVA)</b>	<b>Sem reativo de Pedreira (MVA)</b>
LT Henry Borden - Piratininga 230kV	311	373,0	385,9	368,7	372,3	359,5	378,6
Bco trafo Piratininga 230-88kV	100	88,9	90,7	88,2	89,7	86,8	89,5
Auto trafo Baixada 345-230kV	500	591,8	603,5	571,5	583,6	570,3	580

Tabela 5.29 - Carregamento dos equipamentos no período de carga média

<b><u>Equipamento</u></b>	<b>Carregamento Nominal (MVA)</b>	<b>FEVEREIRO</b>		<b>JULHO</b>		<b>AGOSTO</b>	
		<b>Com reativo de Pedreira (MVA)</b>	<b>Sem reativo de Pedreira (MVA)</b>	<b>Com reativo de Pedreira (MVA)</b>	<b>Sem reativo de Pedreira (MVA)</b>	<b>Com reativo de Pedreira (MVA)</b>	<b>Sem reativo de Pedreira (MVA)</b>
LT Henry Borden - Piratininga 230kV	311	373,0	385,9	368,7	372,3	359,5	378,6
Bco trafo Piratininga 230-88kV	100	88,9	90,7	88,2	89,7	86,8	89,5
Auto trafo Baixada 345-230kV	500	509,9	516,0	484,6	492,2	482,6	487,8

Pelas tabelas acima pode-se observar que com a geração de potência reativa pela Usina Elevatória de Pedreira ajuda a diminuir a sobrecarga na Linha 230kV Henry Borden – Piratininga e no autotransformador 345/230kV – 500MVA da SE Baixada Santista.

### 5.6.3 Perda de um banco de transformadores de 230/88KV - 100MVA da SE Piratininga

O desligamento de um banco de transformadores 230/88kV – 100MVA acarreta sobrecarga nos bancos remanescentes. O Caso nº 3 é o que apresenta maior influência.

Na Tabela 5.30 mostra os carregamentos e percentagem de sobrecarga dos bancos remanescentes.

Tabela 5.30 - Carregamento dos bancos remanescentes e percentagem de sobrecarga.

<b>Carga</b>	<b>FEVEREIRO</b>				<b>JULHO</b>				<b>AGOSTO</b>			
	<b>Com reativo de Pedreira</b>		<b>Sem reativo de Pedreira</b>		<b>Com reativo de Pedreira</b>		<b>Sem reativo de Pedreira</b>		<b>Com reativo de Pedreira</b>		<b>Sem reativo de Pedreira</b>	
	<b>MVar</b>	<b>%</b>	<b>MVar</b>	<b>%</b>	<b>MVar</b>	<b>%</b>	<b>MVar</b>	<b>%</b>	<b>MVar</b>	<b>%</b>	<b>MVar</b>	<b>%</b>
PESADA	131,9	31,9	136,8	36,8	133,0	33,0	137,4	37,4	133,4	33,4	137,2	37,2
MÉDIA	118,4	18,4	123,4	23,4	117,3	17,3	121,4	21,4	116,7	16,7	120,8	20,8

Observação: valores por banco.

Tabela 5.31 - Geração de potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira.

Carga	FEVEREIRO (MVA)	JULHO (MVA)	AGOSTO (MVA)
PESADA	58,5	62,1	60,7
MÉDIA	55,8	53,3	57,6

Pelas Tabelas acima pode-se observar que a potência reativa gerada pela Usina Elevatória de Pedreira ajuda a diminuir a sobrecarga nos bancos de transformadores remanescentes de 230/88kV – 100MVA da SE Piratininga.

O máximo de sobrecarga que suporta cada banco de transformadores é 20% durante 15 minutos, para sobrecargas maiores o tempo é bem inferior. No período de carga média sem a potência reativa gerada pela Usina Elevatória de Pedreira, as sobrecargas obtidas nos bancos de transformadores remanescentes são maiores que 20%, o que obriga a transferência imediata de cargas dessa subestação. Esta transferência de carga pode ocasionar problemas de tensão e carregamento em outros pontos do sistema.

#### 5.6.4 Perda de uma linha de 88kV Henry Borden – Pedreira

O desligamento de uma linha de 88kV Henry Borden – Pedreira acarreta sobrecarga na linha remanescente, o Caso nº 2 é o que apresenta maior influência.

A Tabela 5.32 mostra o carregamento da linha 88kV Henry Borden – Pedreira remanescente.

Tabela 5.32 - Carregamento da linha 88kV Henry Borden - Pedreira remanescente.

Carga	FEVEREIRO		JULHO		AGOSTO	
	Com reativo de Pedreira	Sem reativo de Pedreira	Com reativo de Pedreira	Sem reativo de Pedreira	Com reativo de Pedreira	Sem reativo de Pedreira
	MVAr	MVAr	MVAr	MVAr	MVAr	MVAr
PESADA	136,3	144,6	165,2	183,4	160,0	175,8
MÉDIA	87,2	91,9	102,2	110,3	94,7	100,8
LEVE	55,2	55,5	55,8	56,4	55,2	55,5

Tabela 5.33 – Tensão (PU) nas barras – Carga leve.

Barra	FEVEREIRO		JULHO		AGOSTO	
	Com reativo de Pedreira	Sem reativo de Pedreira	Com reativo de Pedreira	Sem reativo de Pedreira	Com reativo de Pedreira	Sem reativo de Pedreira
3488-ETD Varginha II	0,974	0,961	0,989	0,960	0,974	0,961
3489-ETD Varginha I	0,975	0,963	0,990	0,962	0,975	0,963
3492- ETD Rio Bonito	0,974	0,960	0,991	0,960	0,974	0,960
3499-ETD Imigrantes	0,980	0,970	0,992	0,969	0,980	0,970

Tabela 5.34 – Tensão (PU) nas barras – Carga Média.

Barra	FEVEREIRO		JULHO		AGOSTO	
	Com reativo de Pedreira	Sem reativo de Pedreira	Com reativo de Pedreira	Sem reativo de Pedreira	Com reativo de Pedreira	Sem reativo de Pedreira
3488-ETD Varginha II	0,988	0,915	0,985	0,890	0,987	0,905
3489-ETD Varginha I	0,988	0,915	0,985	0,890	0,987	0,905
3492- ETD Rio Bonito	0,991	0,911	0,988	0,885	0,990	0,901
3499-ETD Imigrantes	0,992	0,931	0,988	0,910	0,991	0,923



Tabela 5.35 – Tensão (PU) nas barras – Carga Pesada.

Barra	FEVEREIRO		JULHO		AGOSTO	
	Com reativo de Pedreira	Sem reativo de Pedreira	Com reativo de Pedreira	Sem reativo de Pedreira	Com reativo de Pedreira	Sem reativo de Pedreira
<b>3488-ETD Varginha II</b>	<b>0,981</b>	<b>0,879</b>	<b>0,977</b>	<b>0,831</b>	<b>0,977</b>	<b>0,842</b>
<b>3489-ETD Varginha I</b>	<b>0,985</b>	<b>0,883</b>	<b>0,989</b>	<b>0,837</b>	<b>0,982</b>	<b>0,848</b>
<b>3492- ETD Rio Bonito</b>	<b>0,988</b>	<b>0,878</b>	<b>0,986</b>	<b>0,830</b>	<b>0,986</b>	<b>0,841</b>
<b>3499-ETD Imigrantes</b>	<b>0,986</b>	<b>0,902</b>	<b>0,981</b>	<b>0,861</b>	<b>0,982</b>	<b>0,871</b>

Pela Tabela 5.32 pode observar-se que a potência reativa gerada pela Usina Elevatória de Pedreira ajuda a diminuir ou eliminar a sobrecarga na linha remanescente.

Pelas Tabelas 5.33, 5.34 e 5.35 pode-se observar que, sem a utilização da potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira, as tensões nas barras: 3488 (ETD Varginha II), 3489 (ETD Varginha I), 3492 (ETD Rio Bonito) e 3499 (ETD Imigrantes), ficam com valores baixos quando da contingência da perda de uma linha de 88kV Henry Borden – Pedreira.

## **CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS**

### **6.1 Conclusões:**

Pelos resultados das simulações computacionais, nos quatro casos estudados, pode-se observar as modificações que ocorrem no sistema com a inserção de potência reativa gerada pela Usina Elevatória de Pedreira. Da análise dos resultados pode-se verificar que as melhorias foram além da simples correção da tensão no entorno da região da usina.

A quantidade de energia reativa gerada pela Usina Elevatória de Pedreira nas simulações ficou no máximo em 60% de sua capacidade de produção, o que facilitaria os impedimentos de manutenção de suas unidades de bombeamento. Pode-se inclusive bombear e gerar potência reativa simultaneamente.

As tensões nas ETD's Varginha, Rio Bonito e Imigrantes, ficaram por volta de 1,0pu nos períodos de carga média e pesada e de 0,977pu no período de carga leve. Este fato poderia resolver os problemas de reclamação de baixa tensão na região feitos pelos consumidores da AES - Eletropaulo.

Com a localização da Usina Elevatória de Pedreira e a inserção de sua potência reativa na área de 88kV, próxima às cargas, foi diminuída a necessidade de geração de potência ativa na usina termoeletrica Piratininga e na usina hidroelétrica Henry Borden. O custo de geração de energia elétrica para o sistema é reduzido e pode-se aumentar a disponibilidade da usina de Henry Borden para atender o sistema em ocasiões de grandes manutenções ou grandes contingências.

Os compensadores síncronos instalados na área em estudo ficaram menos solicitados, trabalhando com necessidade de geração de potência reativa mais próxima de zero ou em condições melhores para atender o sistema em caso de grandes contingências, como é o caso da

perda de um bi-pólo de CC de Itaipu, ou da perda de uma linha de 750kV de Itaipu. Esse alívio nos compensadores síncronos é mais significativo nos de Ibiúna e Tijuco Preto, conectados nos barramentos de 345kV, por estarem mais próximos eletricamente da Usina Elevatória de Pedreira. Essa redução foi maior no período de carga pesada.

Pelos resultados obtidos, pode-se concluir que a utilização da geração da potência reativa da Usina Elevatória Pedreira evitaria no sistema local, investimentos em compensadores estáticos da ordem de 60MVAR e em nível sistêmico (SIN) na ordem de 38MVAR. De acordo com a tabela de custos modulares da ELETROBRÁS de 2004, o custo estimado de equipamentos de controle de tensão através de capacitores é da ordem de R\$ 100 / KVAR. Pelos resultados obtidos poderia se evitar um custo de investimento para o sistema na ordem de R\$ 9.800.000,00.

Com a diminuição da necessidade de potência reativa vinda de regiões mais distantes para atender as cargas das ETD's Varginha, Rio Bonito, Imigrantes e da SE Piratinga, os equipamentos elétricos na região tiveram sua capacidade de transmissão e transformação de energia ativa aumentadas. Isto pode ser verificado nos bancos de Transformadores de 100MVA - 230/88kV da SE Piratininga, nos bancos de Transformadores de 400MVA - 345/88kV da SE Baixada Santista e nas linhas de transmissão de 88kV Henry Borden – Baixada circuitos de 1 a 4. Como consequência pode haver uma diminuição na geração de potência ativa das usinas da região, e reservá-las para eventuais contingências.

Os geradores da usina hidroelétrica Henry Borden e da usina termoeletrica Piratininga tiveram a geração de potência reativa diminuída o que aumentou a disponibilidade para a geração de potência ativa.

As perdas elétricas da região foram diminuídas no entorno da Usina Elevatória de Pedreira, tendo maior influência nas perdas reativas, como é o caso do mês de Julho, período de carga pesada, que passou de 62,1MVAR, sem a utilização da potência reativa da Usina Elevatória

de Pedreira, para 14,2MVAR com a utilização de sua potência reativa. Nas perdas ativas houve uma redução menor, como no caso do mês de Julho, período de carga pesada, que passou de 12,3MW, sem a utilização da potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira, para 4,1MW com a utilização de sua potência reativa.

Nas simulações de contingências foi verificado que a geração de potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira ajuda a diminuir a sobrecarga nos equipamentos remanescentes, evitando ou diminuindo o corte de carga, através dos esquemas controle de emergência estipulados pelo ONS em caso de contingências. A seguir são destacadas as contingências que mais seriam beneficiadas com a geração de reativos pela Usina Elevatória de Pedreira:

- Perda de um banco de transformadores de 400MVA, 345/88kV da SE Baixada Santista, diminuiria a atuação do ECE (Esquema Controle de Emergência) da SE Baixada Santista, cortando a carga da região em estágios menores.
- Perda dupla da linha de transmissão 230kV Piratininga – Interlagos circuitos 1 e 2, diminuiria a sobrecarga no auto transformador de 500MVA, 345/230 kV da SE Baixada Santista e da linha 230kV Henry Borden – Piratininga, evitando ou diminuindo a necessidade de transferência ou corte de carga na SE Piratininga.
- Perda de banco de transformadores de 100MVA, 230/88kV da SE Piratininga, diminui a sobrecarga nos bancos remanescentes, evitando ou diminuindo a necessidade de transferência ou corte de carga na SE Piratininga.

Dos casos estudados o Caso nº 3 apresentou melhor desempenho, em relação a todos os aspectos analisados, com bons resultados na correção de tensão, alívio dos compensadores síncronos, diminuição de geração de potência ativa e perdas na região.

Cabe ressaltar que, pelos resultados obtidos, é possível corrigir o problema original de tensão baixa no sistema, como também obter uma nova forma de operação mais eficaz, mais

estável, com menores perdas elétricas. Tudo isto pode ser realizado sem investimento adicional para o sistema, apenas mudando a sua forma de operação, utilizando as unidades de bombeamento da Usina Elevatória de Pedreira, que ficam mais de 97% do tempo desligadas.

### 6.2 Propostas para futuros trabalhos

Podem ser desenvolvidos outros trabalhos de estudo na área, auxiliando a operação do sistema e indicando possíveis trocas de equipamentos, como por exemplo: os que têm valores elevados de impedâncias, obtendo como consequência a melhora no desempenho do sistema.

Com o intuito de originar novas contribuições, cita-se a seguir algumas idéias percebidas no decorrer do desenvolvimento desse trabalho.

Pode-se continuar o desenvolvimento desse trabalho, fazendo um estudo sob o ponto de vista de estabilidade transitória. As máquinas da Usina Elevatória de Pedreira estão conectadas às suas turbinas quando em funcionamento como compensadores síncronos o que, provavelmente devido à sua inércia, resultará em um comportamento diferente dos demais compensadores síncronos existentes no sistema.

Outro estudo seria a análise de despacho econômico do sistema através de lógica nebulosa, incluindo a geração de potência reativa da Usina Elevatória de Pedreira.

Existem, no sistema estudado, alguns equipamentos antigos, transformadores e linhas com alta impedância. Outra sugestão seria um estudo econômico de troca desses equipamentos e com recondução e reisolamento de linhas de transmissão para modernização do sistema.

Pode-se fazer uma análise do impacto econômico de custo de modificação da configuração da rede do sistema para a melhoria de tensão, sem a utilização das máquinas síncronas da Usina Elevatória de Pedreira como compensadores síncronos.

Outra proposta seria a análise do ganho econômico com menor geração de potência ativa pelos geradores do sistema estudado, devido às menores perdas resultantes da utilização da geração de potência reativa em Pedreira. Poder-se-ia também fazer um estudo sobre a influência na vida útil das máquinas síncronas da usina elevatória de Pedreira, quando despachadas como compensadores síncronos.

**BIBLIOGRAFIA**

- [ 1 ] Alvarado, F.; Borissov, B.; Kirsch, L.D.; Reactive Power as an Identifiable Ancillary Service, Transmission Administrator of Alberta, Ltd., Alberta, Canada, March 2003.
- [ 2 ] ELGERD, OLLE I. Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica. Tradução: Ademaro A. M. B. Cotrim. São Paulo: Editora Mcgraw Hill, 1976.
- [ 3 ] FITZGERALD, AE.; KINGSLEY, CHARLES JR.; KUSKO, ALEXANDER. Máquinas Elétricas. Tradução: Josafá Neves. São Paulo.
- [ 4 ] JORDÃO, RUBENS GUEDES. Máquinas Síncronas. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. 1980.
- [ 5 ] Kirby, B.; Hirst, E.; Ancillary Service Details: Voltage Control, National Regulatory Research Institute, December 1997, Columbus, Ohio, USA.
- [ 6 ] KOSOW, IRVING I. Máquinas Elétricas e Transformadores. Tradução: Felipe Luiz Ribeiro Daiello e Percy Antônio Pinto Soares. São Paulo: Editora Globo, 14º ed.
- [ 7 ] KOSTENKO, M.; PIOTROVSKI, L. Máquinas Elétricas de Corrente Alternada. Tradução: Antônio Fernandes Magalhães. Porto Portugal: Editora Lopes da Silva, 1979.
- [ 8 ] Manhire, B. On Three-Phase Reactive Power, Proceedings of the 2004 American Society for Engineering Education Annual Conference and Exposition, Section 1793, USA..
- [ 9 ] Milano, F.; PSAT 1.3.1(MatLab/Power System Analysis Toolbox), Universidade de Waterloo, Canadá, 2004.
- [10] Miller, T.J.E.. Reactive Power Control in Electric Systems. John Wiley & Sons, 1982.
- [11] MONTICELLI, ALCIR.; GARCIA, ARIovaldo. Introdução a Sistemas de Energia Elétrica. São Paulo: Editora Unicamp, 2003.
- [12] MURTY, P.S.R. Power System Operation and Control, McGraw-Hill, 1984.
- [13] NASAR, SYED A. Máquinas Elétricas. São Paulo: Editora Mcgraw Hill, 1980
- [14] ROBBA, ERNESTO JOÃO. Introdução a Sistemas de Potência. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. 1972.

## Bibliografia

---

- [15] SEPÚLVEDA, HUGO LUIZ. Máquinas Síncronas, apostila. Edições Engenharia 61/77, Universidade Federal de Minas Gerais, 1967.
- [16] STEVENSON, WILLIAN D.JR. Elementos de Análise de Sistemas de Potência. São Paulo: Editora Mcgraw Hill, 2º ed. Em português
- [17] TAYLOR, C.W. Power System Voltage Stability, McGraw-Hill, 1994.
- [18] VIEIRA FILHO, XISTO. Operação de Sistemas de Potência Com Controle Automático de Geração. Eletrobrás – Editora: Campus: Rio de Janeiro.
- [19] WEEDY, B. M. Sistemas Elétricos de Potência. Editora Polígono. São Paulo.
- [20] WOOD, A. J.;WOLLENBERG, B. F. Power Generation, Operation, and Control, John Wiley & Sons, 1984.
- [21] EMAE. IEO 002 - Instrução Específica de Operação da Usina Termoelétrica Piratininga.
- [22] EMAE. IEO 005 - Instrução Específica de Operação da Usina Termoelétrica Nova Piratininga.
- [23] EMAE. IEO 001 - Instrução Específica de Operação da Usina Hidroelétrica Henry Borden.
- [24] EMAE. – Relatórios de ensaios nas unidades reversíveis da Usina Elevatória de Pedreira.
- [25] ONS. Instrução de Operação – IO-CG.Br.01- Controle de Geração em Condições Normais
- [26] ONS. Instrução de Operação – IO-OC.SE.3SP- Operação em Contingência da Área de 345kV de São Paulo.
- [27] ONS. Instrução de Operação – IO-OC.SE.4SP- Operação em Contingência da Área de 440kV de São Paulo.
- [28] ONS. Instrução de Operação – IO-ON.SE.3SP- Operação Normal da Área de 345kV de São Paulo.
- [29] ONS. Instrução de Operação – IO-ON.SE.4SP- Operação Normal da Área de 440kV de São Paulo.



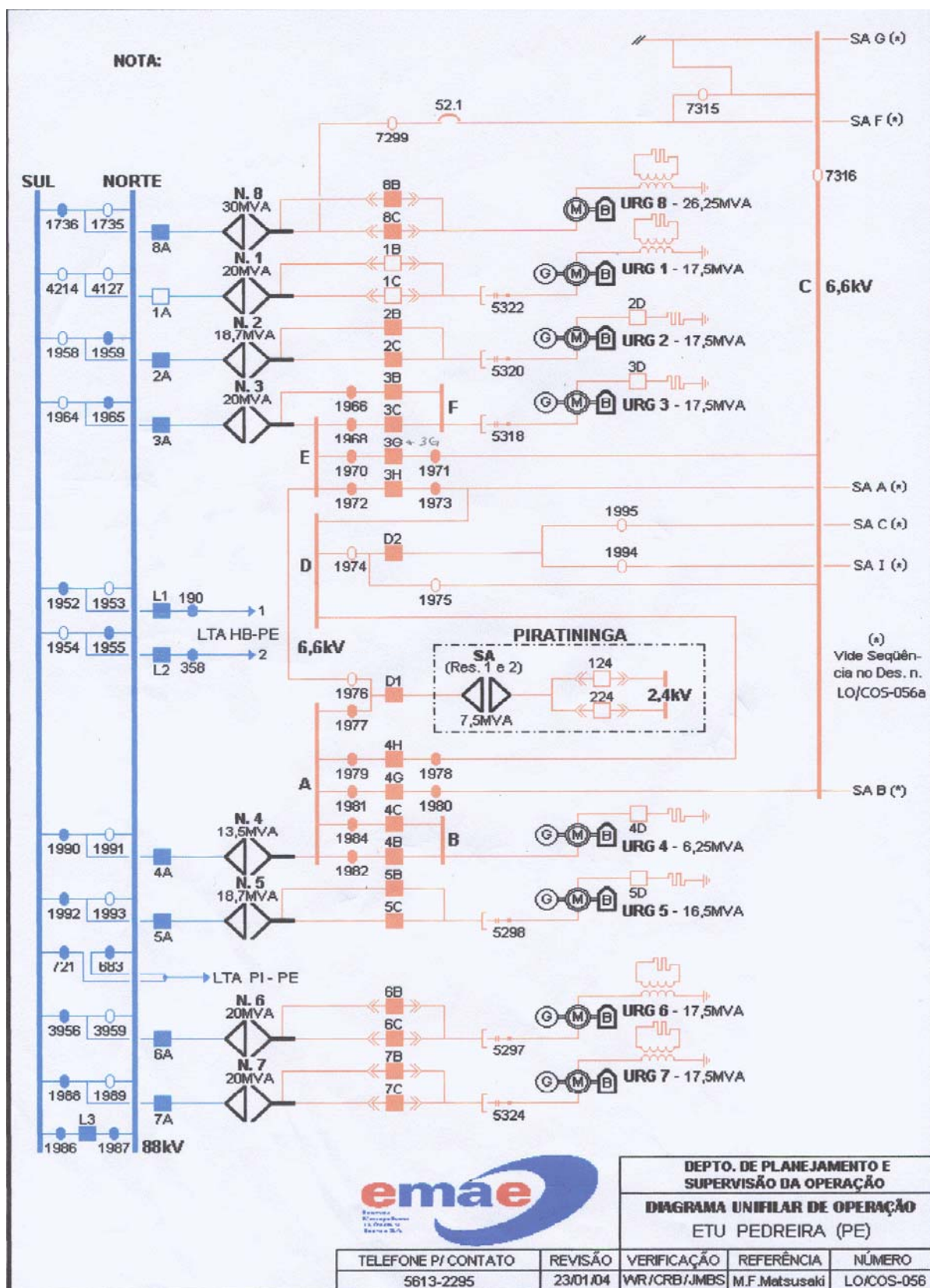


Figura A1- Diagrama elétrico ETU Pedreira 88kV

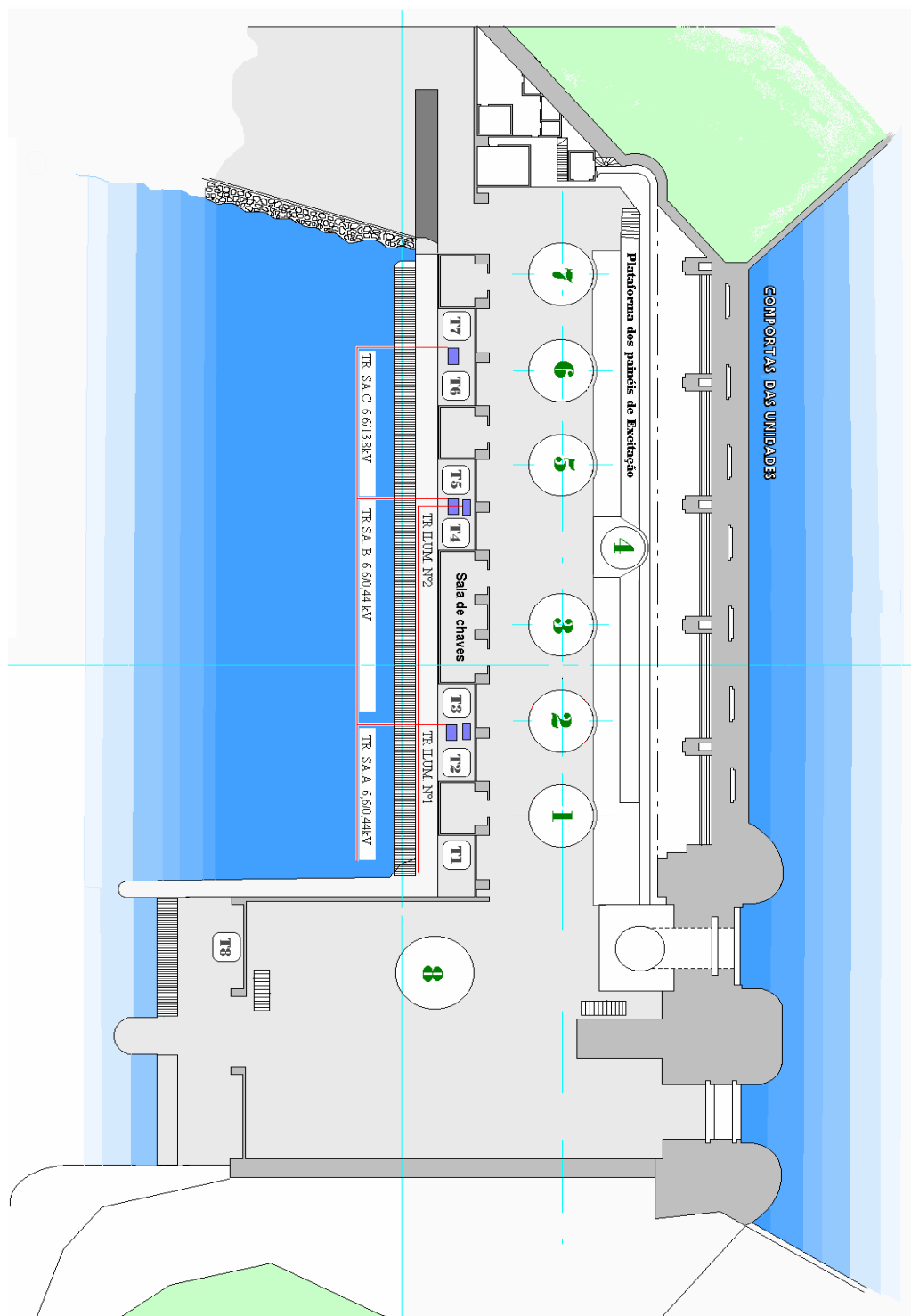


Figura A2 - Vista Superior da Usina Elevatória de Pedreira

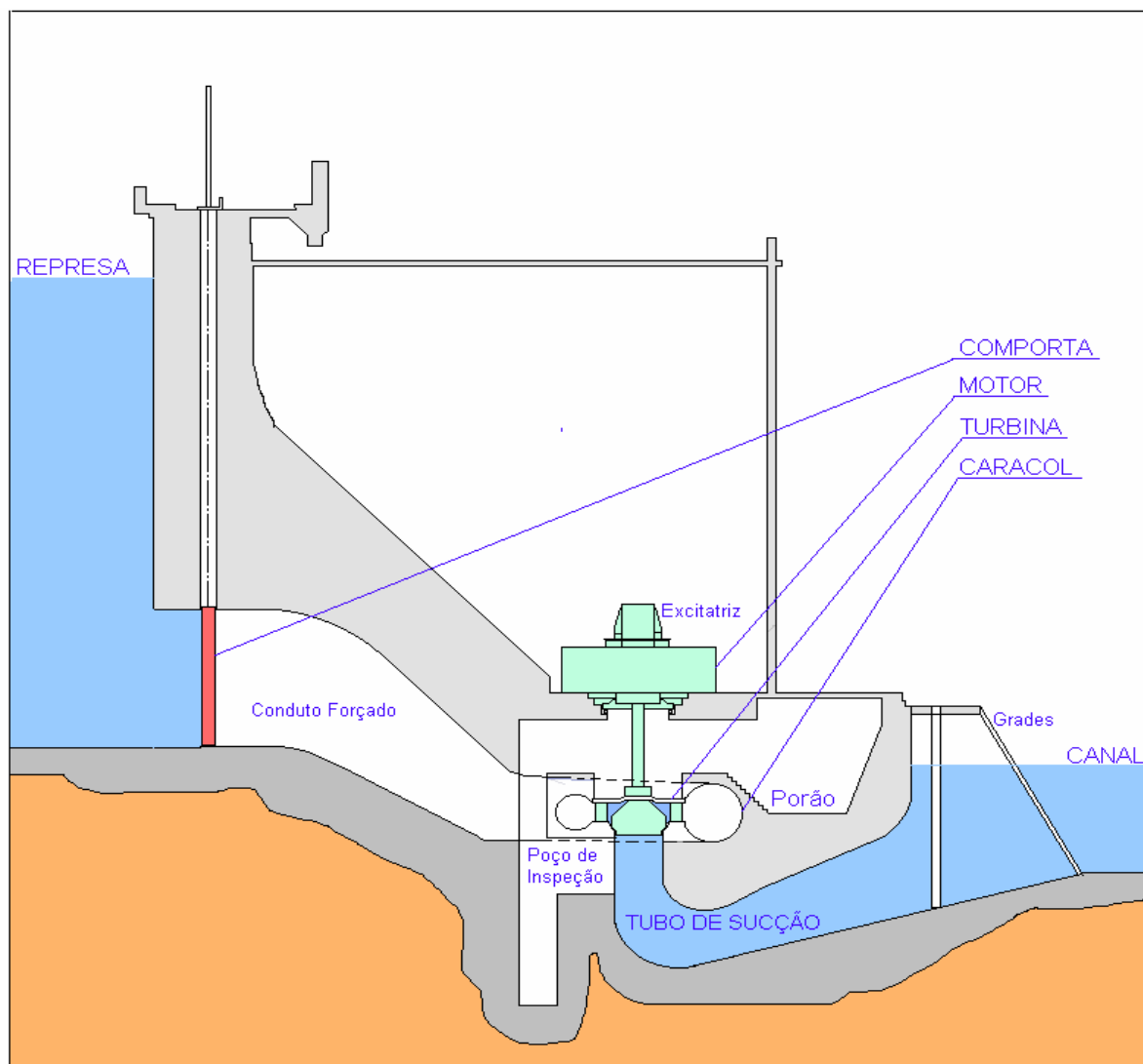


Figura A3 - Vista em corte das unidades reversíveis da Usina Elevatória de Pedreira

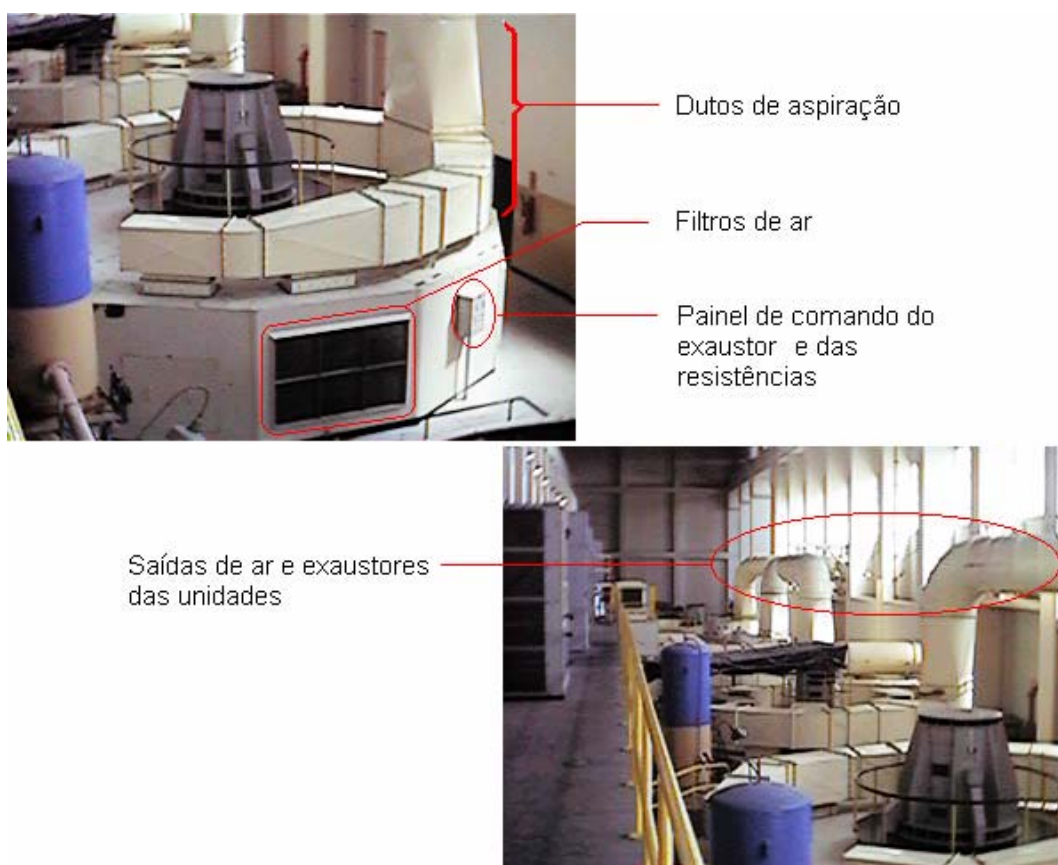


Figura A4 - Detalhes do sistema de refrigeração e aquecimento das unidades da UEP