

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ELETRICIDADE

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE UM
COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS NA
OPERAÇÃO DE SISTEMA ELÉTRICO
INDUSTRIAL COM COGERAÇÃO**

GILSON SOARES DA SILVA JÚNIOR

São Luís – MA
2008

GILSON SOARES DA SILVA JÚNIOR

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE UM COMPENSADOR
ESTÁTICO DE REATIVOS NA OPERAÇÃO DE SISTEMA
ELÉTRICO INDUSTRIAL COM COGERAÇÃO**

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia

Orientador: Prof. Dr. Vicente Leonardo Paucar Casas

São Luís
2008

Silva Júnior, Gilson Soares da

Análise da influência de um compensador estático de reativos na operação de sistema elétrico industrial com cogeração / Gilson Soares da Silva Júnior. — São Luis, 2008. 108 f.

Impresso por computador (fotocópia).

Orientador: Prof. Dr. Vicente Leonardo Paucar Casas

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Maranhão, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade, 2008.

1. Modelagem de carga – ALUMAR – ANAREDE – ANATEM.
2. Estabilidade no domínio do tempo 3. Cogeração 4. Compensador Estático de Reativos – SVC I. Título

CDU 621.311(812.1)

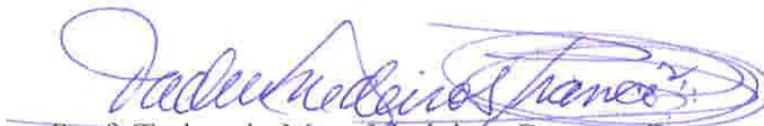
ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE UM COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS NA OPERAÇÃO DE SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL COM COGERAÇÃO

Gilson Soares da Silva Júnior

Dissertação aprovada em 15 de fevereiro de 2008.



Prof. Vicente Leonardo Paucar Casas, Dr.
(Orientador)



Prof. Tadeu da Mata Medeiros Branco, Dr.
(Membro da Banca Examinadora)



Prof. Lindomar Jacinto de Souza, Dr.
(Membro da Banca Examinadora)

A meus pais, Gilson e Teresinha e
às minhas irmãs Raquel e Karla

Agradecimentos

A Deus, pela presença constante em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais, Gilson e Teresinha, por tudo o que fizeram por mim, especialmente, por não terem medidos esforços para me garantir uma boa formação escolar e acadêmica. A eles, minha eterna gratidão.

À minha noiva, Keliny, pelo incentivo durante todo o período de elaboração desse trabalho.

Ao professor Leonardo Paucar, pela orientação segura e competente na elaboração desse trabalho.

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade. Agradecimento especial aos professores, Maria da Guia da Silva e José Eduardo Onoda Pessanha, pelos conselhos, ensinamentos e experiências trocadas durante todo o curso.

A todos os meus amigos do Grupo de Sistemas de Potência da Universidade Federal do Maranhão, em especial, a Fábio Mendes pela amizade e companheirismo.

A toda equipe técnica da ALUMAR, em especial ao Superintendente do Sistema de Força, Lucas Silva, pelo apoio necessário, o qual contribuiu bastante para a concretização deste trabalho.

Ao Engenheiro Venilton Oliveira da Gerência de Estudos Especiais, Proteção e Controle do Operador Nacional do Sistema (ONS) pelo apoio e incentivo na revisão e validação da modelagem da ALUMAR.

RESUMO

Análise da influência de um compensador estático de reativos (SVC) na estabilidade eletromecânica do sistema de energia elétrica do consumidor industrial ALUMAR o qual possui cogeração. Descrevem-se as principais particularidades sobre os sistemas de cogeração, os controladores FACTS e sobre os sistemas envolvidos na análise. Discute-se, ainda, a modelagem do sistema elétrico da ALUMAR, destacando-se a modelagem atualizada e validada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) e a modelagem dos cogeneradores.

Palavras-chave: Modelagem de carga. ALUMAR. ANAREDE. ANATEM. Estabilidade no domínio do tempo. Cogeração. Compensador Estático de Reativos – SVC

ABSTRACT

In this work is analyzed the influence of a static var compensator (SVC) on the electromechanical stability of the electrical energy system of the industrial consumer ALUMAR that has a cogeneration. The main considerations on cogeneration systems, the FACTS Controllers and the systems involved in the analysis are described. Moreover, it is discussed the modeling of electrical system of ALUMAR highlighting the modeling updated and validated by the National Electric System Operator (ONS) and the modeling of cogenerators.

SUMÁRIO

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Formulação do problema.....	1
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivos gerais	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Estrutura do trabalho	4
2. SISTEMAS DE COGERAÇÃO	6
2.1. Introdução.....	6
2.2. O desenvolvimento da cogeração.....	7
2.3. Centrais termoeletricas de cogeração	8
2.3.1. Cogeração com turbina a vapor	10
2.3.2. Cogeração com turbinas a gás	11
2.3.3. Cogeração com motores alternativos.....	13
2.3.4. Caldeira.....	13
2.4. Cogeração nas indústrias	15
2.4.1. Cogeração na indústria sucro-acooleira.....	16
2.4.2. Cogeração na indústria de papel e celulose	17
2.4.3. Cogeração nas agro-industrias.....	17
2.4.4. Cogeração na indústria metalúrgica e siderúrgica.....	18
2.4.5. Cogeração em outros setores da economia.....	19
3. CONTROLADORES FACTS	20
3.1. Introdução.....	20
3.2. Definições e Classificações	21
3.3. <i>Static Var Compensator</i> – SVC	25
3.3.1. Configurações do SVC	25
3.3.1.1. <i>Thyristor Controlled Reactor</i> – TCR	26
3.3.1.2. <i>Thyristor Switched Capacitor</i> – TSC	27
3.3.2. Princípio de operação do SVC	28
3.3.3. Sistema de controle do SVC.....	30
4. MODELAGEM DO SISTEMA.....	33
4.1. O consumidor industrial ALUMAR.....	33
4.1.1. Descrição da planta.....	33
4.1.1.1. Porto	34
4.1.1.2. Refinaria	34
4.1.1.3. Redução	36
4.2. O sistema elétrico da ALUMAR.....	38
4.2.1. A ALUMAR no Sistema Interligado Nacional Brasileiro.....	39
4.2.2. Características do sistema elétrico da ALUMAR.....	40
4.3. Modelagem do consumidor industrial ALUMAR.....	43
4.3.1. Modelo da ALUMAR anterior	43
4.3.2. Modelo da ALUMAR proposto.....	45
4.3.3. Validação do modelo proposto	49
4.4. Cogeração na ALUMAR.....	55
4.4.1. Aspectos técnicos	55

4.4.2. Modelagem dos geradores síncronos.....	58
4.4.2.1. Regulador de tensão.....	60
4.4.2.2. Regulador de fator de potência.....	61
4.4.2.3. Estabilizador.....	62
4.4.2.4. Regulador de velocidade.....	63
4.5. Controlador FACTS da subestação São Luís II.....	64
4.5.1. Características técnicas.....	65
5. SIMULAÇÕES.....	68
5.1. Introdução.....	68
5.2. Cenários analisados.....	68
5.2.1. Análise do SVC da subestação São Luís II.....	68
5.2.2. Análise dos geradores da ALUMAR.....	77
5.2.3. Análise da influência do SVC da subestação São Luís II na operação de geradores da ALUMAR.....	86
6. CONCLUSÕES.....	92
Anexos.....	94
Anexo A.....	95
Anexo B.....	97
Referências bibliográficas.....	105

LISTA DE TABELAS

	Pág.
4.1 – Parâmetros CC das Linhas de Cubas.....	47
4.2 – Parâmetros CC das Linhas de Cubas.....	48
4.3 – Parâmetros CA das Linhas de Cubas.....	48
4.4 – Comparação dos valores de tensão.....	49
4.5 – Dados técnicos dos tubo-geradores.....	59
4.6 – Parâmetros dos controles dos geradores.....	64
5.1 – Comparação das tensões com e sem o SVC.....	69
5.2 – Comparação dos fluxos de potência com e sem o SVC.....	69
5.3 – Comparação dos níveis de tensão.....	77
5.4 – Comparação dos fluxos de potência.....	78

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
2.1 – Instalação de cogeração do tipo <i>topping</i>	9
2.2 – Instalação de cogeração do tipo <i>bottoming</i>	9
3.1 – Diagrama esquemático de um controlador série.....	22
3.2 – Diagrama esquemático de um controlador em derivação.....	23
3.3 – Diagrama esquemático de um controlador combinado série-série.....	23
3.4 – Diagrama esquemático de um controlador combinado série-derivação.....	24
3.5 – Representação de um SVC	26
3.6 – Elementos básicos TCR.....	27
3.7 – Elementos básicos TSC	27
3.8 – Curva característica V/I de um SVC ideal.....	28
3.9 – Curva característica V/I de um TCR	29
3.10 – Curva característica V/I de um TSC.....	29
3.11 – Curva característica V/I do SVC	30
3.12 – Elementos básicos do SVC.....	30
3.13 – Diagrama de blocos do sistema de controle do SVC	31
4.1 – Vista aérea da ALUMAR	33
4.2 – Bauxita e Alumina.....	34
4.3 – Layout de uma cuba eletrolítica.....	36
4.4 – Ligação das cubas eletrolíticas	37
4.5 – Fluxograma da Redução	38
4.6 – Localização eletro-geográfica da ALUMAR no SIN.....	40
4.7 – Diagrama unifilar do sistema elétrico da ALUMAR	41
4.8 – Sistema elétrico da Linha de Cubas 2.....	42
4.9 – Modelo equivalente de uma Linha de Cubas.....	44
4.10 – Modelo equivalente de uma Linha de Cubas no programa	44
4.11 – Modelo equivalente do sistema elétrico da ALUMAR proposto pelo CEPEL ...	45
4.12 – Modelo equivalente proposto para o sistema elétrico da ALUMAR	46
4.13 – Tensão em São Luís II – 230 kV (Barra 5551).....	50

4.14 – Tensão do Circuito 1 (Barras 5551 e 8100).....	51
4.15 – Tensão na Refinaria (Barra 8005)	51
4.16 – Tensão CA da Linha de Cubas 1 (Barra 8001).....	52
4.17 – Tensão CC da Linha de Cubas 1 (Barra 8011).....	52
4.18 – Tensão CA da Linha de Cubas 2 (Barra 8002).....	52
4.19 – Tensão CC da Linha de Cubas 2 (Barra 8021).....	53
4.20 – Tensão CA da Linha de Cubas 3 (Barra 8003).....	53
4.21 – Tensão CC da Linha de Cubas 3 (Barra 8031).....	53
4.22 – Tensão em Presidente Dutra (Barra 5580)	54
4.23 – Tensão em Imperatriz (Barra 5590).....	54
4.24 – Configuração inicial do sistema elétrico da Refinaria da ALUMAR.....	56
4.25 – Configuração do sistema elétrico da Refinaria da ALUMAR.....	57
4.26 – Diagrama unifilar do sistema elétrico da ALUMAR com cogeração	58
4.27 – Curva de saturação dos geradores da ALUMAR	59
4.28 – Diagrama de blocos do regulador de tensão.....	61
4.29 – Curva de capacidade dos geradores da ALUMAR.....	62
4.30 – Diagrama de blocos do PSS	63
4.31 – Diagrama de blocos do regulador de velocidade.....	63
4.32 – Sistema elétrico que alimenta a ilha de São Luís	65
4.33 – Diagrama unifilar do SVC da SE São Luís II.....	66
5.1 – Ponto de operação do SVC em regime permanente	70
5.2 – Tensão na barra de 230 kV da SE São Luís II (5551)	70
5.3 – Tensão na barra de 34,5 kV da Linha de Cubas I da ALUMAR (8001).....	71
5.4 – Tensão na barra de 13,8 kV da Refinaria da ALUMAR (8020).....	71
5.5 – Tempo de resposta do SVC da SE São Luís II.....	72
5.6 – Fluxo de potência ativa no circuito de 500 kV entre as subestações de Presidente Dutra e São Luís II (5580 – 5550).....	72
5.7 – Fluxo de potência reativa no circuito de 500 kV entre as subestações de Presidente Dutra e São Luís II (5580 – 5550).....	73
5.8 – Tensão na barra de 500 kV da subestação Presidente Dutra (5580)	74
5.9 – Tensão na barra de 500 kV da subestação Imperatriz (5590).....	74
5.10 – Potência reativa da máquina UHE Tucuruí	75
5.11 – Ângulo da máquina UHE Tucuruí.....	75
5.12 – Frequência do sistema	76

5.13 – Tensão na barra de 230 kV da SE São Luís II (5551)	76
5.14 – Tensão na barra de 230 kV da SE São Luís II (5551)	79
5.15 – Tensão na barra de 34,5 kV da Linha de Cubas I da ALUMAR (8001)	79
5.16 – Tensão na barra de 13,8 kV do transformador T7 da Redução (8007)	80
5.17 – Tensão na barra de 500 kV da subestação Presidente Dutra (5580)	80
5.18 – Tensão na barra de 500 kV da subestação Imperatriz (5590)	81
5.19 – Tensão na barra de 13,8 kV da Refinaria da ALUMAR (8020).....	81
5.20 – Frequência do gerador 1 da ALUMAR	82
5.21 – Frequência do gerador 1 da ALUMAR	83
5.22 – Tensão nas barras de 13,8 kV da Refinaria da ALUMAR	84
5.23 – Frequência do gerador 1 da ALUMAR	84
5.24 – Tensão nas barras de 13,8 kV da Refinaria da ALUMAR	85
5.25 – Tensão nas barras de 13,8 kV da Refinaria da ALUMAR	85
5.26 – Tensão nas barras de 13,8 kV da Refinaria da ALUMAR	86
5.27 – Tensão na barra de 230 kV da SE São Luís II (5551)	87
5.28 – Tensão na barra de 34,5 kV da Linha de Cubas I da ALUMAR (8001)	87
5.29 – Tensão nas barras de 13,8 kV da Refinaria da ALUMAR	88
5.30 – Tensão nas barras de 500 kV da subestação Presidente Dutra (5580)	88
5.31 – Tensão nas barras de 500 kV da subestação Imperatriz (5590)	89
5.32 – Potência reativa do gerador 1 da Refinaria da ALUMAR (8030).....	89
5.33 – Tensão na barra de 230 kV da SE São Luís II (5551)	90
5.34 – Tensão na barra de 13,8 kV da Refinaria da ALUMAR (8020).....	90

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

A tendência geral, no desenvolvimento do sistema de potência, é o aumento da sua capacidade, tanto na geração quanto na transmissão, para atender às exigências da demanda de energia elétrica. Em sistemas de potência de pequeno porte, pouco complexos e com poucas interconexões, esse problema pode ser resolvido parcialmente através de projetos super-dimensionados em relação à capacidade de geração e aos limites de transmissão (WATANABE, 1998). Nos casos dos sistemas de grande porte, o aumento dos custos e das restrições ambientais torna impraticável a estratégia do super-dimensionamento ou de construção de novas unidades de geração e de linhas de transmissão.

Mediante esse novo cenário, houve a necessidade de aumentar a capacidade de transmissão e de melhorar o controle dos sistemas existentes. Logo, o conceito de sistemas com fluxos de potência controláveis pode ser implementado através da aplicação de Controladores FACTS (*Flexible AC Transmission System*), os quais são baseados em eletrônica de potência e em mais outros controladores estáticos (CIGRÉ, 2000; HINGORANI, 2000).

A estabilidade dos sistemas de potência passou a ter mais graus de liberdade com a utilização dos Controladores FACTS. Nos casos em que os sistemas de potência são submetidos a perturbações severas (estabilidade transitória eletromecânica), estes equipamentos podem propiciar o aumento do limite de transferência de grandes blocos de energia como, por exemplo, com o chaveamento de grandes capacitores em série em determinadas linhas de transmissão. Os Controladores FACTS também são de grande valia para melhorar a estabilidade a pequenas perturbações. Neste caso, por exemplo, o amortecimento das oscilações eletromecânicas de baixa frequência do sistema pode ser aumentado através da modulação de pequenos capacitores em série com as linhas de transmissão (WATANABE, 1998; CIGRÉ, 2000; GROETAERS, 1995).

1.2. Formulação do problema

Atualmente, no Brasil, há duas grandes redes interligadas: os sistemas interligados Sul/Sudeste/Centro-Oeste e Norte/Nordeste, tendo, este último, linhas de transmissão de mais de 2000 km, em 500 kV. A interligação dessas duas grandes redes é motivo de vários estudos de estabilidade angular, estabilidade de frequência e estabilidade de tensão, uma vez que qualquer instabilidade, nesse trecho, afeta principalmente as áreas do sistema Norte-Nordeste que possuem linhas de transmissão extensas. Uma dessas áreas afetadas é o sistema de transmissão que alimenta a ilha de São Luís, a capital do Estado do Maranhão.

Os problemas de instabilidade nessa região são decorrentes, principalmente, do carregamento das duas linhas de transmissão em 500kV que alimentam a ilha. Além da grande São Luís, com aproximadamente 200 MW e de alguns consumidores industriais, tais como a VALE (35 MW), essas duas linhas de transmissão em 500 kV alimentam uma das maiores plantas de produção de alumínio e alumina do mundo, a ALUMAR, com uma demanda total de 825 MW.

Quando há desligamento de uma das duas linhas de 500 kV, ocorrem problemas de instabilidade devido ao carregamento da linha que ficou em operação. Além disso, como essas linhas são muito longas, há uma queda de tensão considerável que, somada à queda de tensão em algumas linhas em 230 kV, reduzem o nível de tensão na região do Maranhão, comprometendo a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Como medida emergencial, quando há o desligamento de uma das linhas de 500 kV, a ALUMAR é obrigada a reduzir a sua carga de 825 MW para 790 MW. Essa redução, além de gerar perdas financeiras significativas, gera problemas de instabilidade no processo de produção de alumínio, devido à diminuição da temperatura interna das cubas.

Em função desses problemas de instabilidade e restrições operacionais no sistema de transmissão, a ALUMAR fez a opção pela instalação de dois cogeneradores, uma vez que o projeto de expansão estava sendo iniciado.

A Refinaria da ALUMAR, atualmente, produz 1,5 milhões de toneladas de alumina por ano. Como o mercado mundial de alumina está em crescimento, a ALUMAR decidiu expandir essa área da indústria, a qual irá produzir anualmente 2,7 milhões de toneladas de alumina. Como esse novo patamar de produção, será necessário instalar mais 2 caldeiras para gerar vapor ao processo. Após realização de estudos de viabilidade econômica, conclui-se que seria viável cogerar energia elétrica através dessas caldeiras térmicas, à carvão mineral, para suprir a demanda de energia elétrica de 70 MW e atender à demanda

de vapor de 450 ton/h. Nesse sentido, além de reduzir o custo de produção, o novo projeto iria minimizar as perdas ocasionadas por reduções de carga e oscilações no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Em virtude do aumento de carga da ALUMAR, dos problemas de instabilidade e da necessidade de aumentar a capacidade de transferência das duas linhas de transmissão, a concessionária ELETRONORTE instalou um Controlador FACTS do tipo SVC (*Static VAR Compensator*) na barra de 230 kV da subestação São Luís II. Logo, todo o sistema elétrico da área Maranhão, principalmente o que alimenta a capital do Estado, teve que ser analisado, a fim de avaliar quais os possíveis ganhos na estabilidade com esses novos sistemas e quais seriam os requisitos de cada um.

No entanto, os estudos referentes ao Controlador FACTS e à cogeração da ALUMAR estavam sendo realizados isoladamente, uma vez que a natureza dos investimentos é totalmente diferente. Sendo assim, houve a necessidade de analisar os dois sistemas operando em conjunto, a fim de garantir uma melhor estabilidade para cada sistema e para o SIN como um todo.

A análise da estabilidade de um grande sistema de potência frente à aplicação de Controladores FACTS envolve tanto a modelagem do Controlador FACTS quanto a modelagem da carga e dos componentes do sistema (linhas, transformadores, cargas, banco de capacitores, etc.). No primeiro caso, a modelagem deve ser formulada matematicamente, levando-se em consideração todos os parâmetros dos controladores bem como os parâmetros a serem controlados. A modelagem dos componentes e principalmente das cargas deve ser elaborada de forma precisa, de modo a deixar os resultados mais próximos possíveis da realidade. No caso da ALUMAR, essa precisão nos estudos da modelagem que envolve o sistema elétrico Norte-Nordeste é de extrema importância, em virtude da sua grande demanda e da localização SIN.

Atualmente o Operador Nacional do Sistema (ONS) é responsável por todos os estudos que envolvem o SIN, tendo, em sua base de dados, a modelagem completa de todos os sistemas. Ao se avaliar a modelagem da ALUMAR disponibilizada pelo ONS, verificou-se que ela estava desatualizada, elaborada em 1999. Desse ano até os dias atuais, a indústria sofreu modificações tais como mudança de parâmetros de processo e algumas expansões. Além disso, a necessidade de realização de simulações mais detalhadas, principalmente para os casos de defeitos internos à indústria, impôs a necessidade de implementar melhorias em alguns aspectos na modelagem.

Assim é que, visando a atualização e melhoria da modelagem da ALUMAR, este trabalho pretende propor um modelo mais preciso e que melhor represente o sistema de transmissão entre a ELETRONORTE e a ALUMAR e, os circuitos auxiliares da Redução e da Refinaria.

Após a remodelagem, pretende-se realizar a análise da estabilidade em regime permanente e em regime dinâmico para determinada perturbação no sistema, e comparar os resultados de simulações com e sem um Controlador FACTS, bem como sua operação conjunta com os dois cogeneradores da ALUMAR.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos gerais

Contribuir com estudos de estabilidade para o Sistema Interligado Nacional, através de melhorias na modelagem de carga do consumidor industrial ALUMAR.

Propor uma modelagem para os geradores e seus controles associados em regime permanente e dinâmico em plantas de cogeração.

1.3.2. Objetivos específicos

Aprofundar o conhecimento técnico sobre a aplicação de Controladores FACTS em sistemas de potência, dentro de um mercado elétrico competitivo e com restrições econômicas e ambientais.

Analisar os problemas de instabilidade e o carregamento das linhas de transmissão do sistema elétrico de potência que supre a capital do Estado do Maranhão.

Analisar, comparativamente, a estabilidade do sistema elétrico industrial da ALUMAR frente à operação conjunta de um Controlador FACTS do tipo SVC e de uma planta de cogeração.

1.4. Estrutura do trabalho

Para um melhor entendimento e desenvolvimento do assunto, dividiu-se o trabalho em 6 capítulos. O capítulo 1 corresponde à Introdução. No Capítulo 2, faz-se considerações gerais sobre sistemas de cogeração, abordando o seu desenvolvimento, os aspectos técnicos das centrais termoelétricas bem com sua aplicação nas indústrias.

No Capítulo 3, é apresentado o estado da arte dos Controladores FACTS, com enfoque particular para as definições e classificações. Faz-se ainda, algumas considerações sobre o Controlador FACTS do tipo SVC, o qual será objeto de estudo desse trabalho.

Após entendimento básico sobre os assuntos a serem abordados, o Capítulo 4 descreve a planta, os processos internos e o sistema elétrico da ALUMAR. Além disso, é apresentado, ainda, a modelagem do Controlador FACTS da subestação São Luís II e do consumidor industrial, destacando-se a modelagem atualizada e validada pelo ONS e a modelagem dos futuros cogeneradores.

No Capítulo 5, apresentam-se os resultados das simulações visando à melhoria da estabilidade do SIN na área Maranhão. Por fim, o Capítulo 6 faz uma conclusão geral do trabalho, ressaltando seus principais aspectos e descrevendo suas contribuições mais significativas.

Após os capítulos, são apresentadas as bibliografias consultadas durante a elaboração desse trabalho.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE COGERAÇÃO

2.1. Introdução

Nas últimas duas décadas, o consumo de energia elétrica aumentou consideravelmente impulsionado pelo crescimento econômico do Brasil. Tal aumento no consumo levou à necessidade de expansão da capacidade de geração e transmissão do sistema elétrico. No entanto, o aumento do consumo foi maior que os investimentos no sistema elétrico que, aliado a condições hidrológicas significativamente desfavoráveis, resultou em uma situação de racionamento de energia elétrica em 2001. Além da evidente falta de investimentos no setor elétrico, o racionamento de energia elétrica mostrou a vulnerabilidade do sistema elétrico brasileiro no que concerne aos níveis de água concentrada nos reservatórios, que varia de acordo com a época do ano (CLEMENTINO, 2000; LORA, 2004a).

A partir daí, investimentos foram direcionados para ampliação do parque gerador e de linhas de transmissão. No entanto, mais recentemente, novos aproveitamentos hidrelétricos e construção de linhas de transmissão estão se tornando cada vez mais distantes e escassos, devido a restrições ecológicas e econômicas. Aliado a esses fatores, a mudança de cenário, ao longo das duas últimas décadas, impôs dificuldades adicionais à expansão do sistema hidrelétrico, em função da escassez de recursos públicos, da falta de fontes alternativas de financiamento e da maior preocupação com as questões ambientais (CLEMENTINO, 2000; TOLMASQUIM, 2005).

A alternativa que se seguiu para reduzir o risco de suprimento, no caso de condições hidrológicas adversas, foi a de se reestruturar o setor elétrico de tal sorte a torná-lo atrativo aos investimentos privados e diversificar a matriz energética. O resultado dessa reestruturação foi a maior participação de usinas termoeletricas cujo papel principal foi o de compensar as variações da energia hidráulica (CLEMENTINO, 2000; TOLMASQUIM, 2005).

A expansão do parque de geração térmica nacional veio, portanto, cumprir a função de firmar a energia secundária capaz de garantir melhores níveis operativos ao longo do tempo, reduzindo o risco de insuficiência de suprimento. Logo, a geração térmica despertou maior interesse, mas como consequência, aumentaram as preocupações com o

meio-ambiente, uma vez que a grande maioria das usinas termoelétricas utilizam combustíveis fósseis e não-renováveis, geralmente derivados do petróleo (CLEMENTINO, 2000; TOLMASQUIM, 2005).

Na busca de um modelo sustentável de desenvolvimento, novas tecnologias foram surgindo a fim de tornar as usinas termoelétricas mais eficientes. Nesse contexto, é inserida a cogeração, que é a utilização de um mesmo combustível para obtenção conjunta de vapor, calor e energia elétrica.

2.2. O desenvolvimento da cogeração

Cogeração é a produção simultânea, de forma seqüenciada, de duas ou mais formas de energia a partir de um único combustível. O processo mais comum é a produção de energia térmica (vapor e calor) e elétrica, a partir do uso de gás natural ou carvão mineral (LORA, 2004a; TOLMASQUIM, 2005).

A cogeração não é uma tecnologia nova e tem sido utilizada em muitas unidades industriais, como meio econômico de satisfazer, parcial ou totalmente, suas necessidades térmicas e elétricas. Os primeiros sistemas de cogeração instalados ao redor do mundo datam do final do século XIX. Nessa época, era muito rara a produção centralizada de energia elétrica. Ainda não existiam as grandes centrais geradoras pela falta de uma tecnologia eficiente. Era comum que consumidores de energia elétrica de médio e grande porte instalassem sua própria central de geração de energia, principalmente nos sistemas de aquecimento distrital. Esta situação perdurou até a década de 40, sendo que, nos Estados Unidos, a cogeração chegou a ser responsável por cerca de 50% de toda a energia gerada e, na Europa, aproximadamente por 30% (CLEMENTINO, 2000; LORA, 2004a; TOLMASQUIM, 2005).

Com o avanço da tecnologia, surgiram novos conceitos de geração e de interligação de sistemas elétricos, otimizados de forma centralizada, e que, com o apoio das grandes centrais (hidrelétrica e termoelétrica – nuclear, carvão, gás natural e óleo combustível), conseguiam fornecer energia abundante e de baixo custo. Os sistemas de cogeração foram então, gradualmente, perdendo participação no mercado. Entretanto, com o aumento dos preços dos combustíveis e a valorização da eficiência energética, a partir da década de 80, a cogeração passou a ser encarada novamente como uma importante alternativa energética. Além disso, outros fatores influenciaram essa valorização, tais como a maior disponibilidade de gás natural, o desenvolvimento das turbinas e das máquinas geradoras, a perda de interesse por geração nuclear, e sobretudo a intensificação das

pressões por processos de conversão energética sustentável e com menor emissão de CO₂, para atenuar os impactos de caráter global como o efeito estufa (CLEMENTINO, 2000; LORA, 2004a; TOLMASQUIM, 2005).

No Brasil, a quase duas décadas, a cogeração é utilizada, ainda que em pequena escala, dentro da atividade de autoprodução nos setores da indústria de papel e celulose, sucro-alcooleira, siderurgia e petroquímica, pois a venda de excedente de energia elétrica era desfavorável pelas baixas tarifas oferecidas nos contratos e, também, pela ausência de regras que ordenassem a relação entre autoprodutor e a concessionária. A partir da década de 50, a cogeração perdeu mais ainda o seu interesse, provocado principalmente pela acentuada expansão da geração hidroelétrica. Com o crescimento da demanda industrial, a falta de investimentos no setor elétrico e as restrições ambientais, a geração térmica e, principalmente, a cogeração voltou a ser atrativa (CLEMENTINO, 2000; TOLMASQUIM, 2005).

As oportunidades criadas, nas últimas décadas, com o crescente mercado de equipamentos e de tecnologias adequadas para a geração distribuída, atraíram muitos investimentos em pesquisa e surgiram muitos fabricantes que, atualmente, oferecem tecnologias competitivas para a implantação dos sistemas de cogeração (TOLMASQUIM, 2005).

2.3. Centrais termoelétricas de cogeração

Os sistemas de cogeração mais utilizados são a turbina a gás, turbina a vapor, motor alternativo e célula de combustível, sendo as diferenças entre eles: a relação entre as necessidades em energia térmica e elétrica, os custos da instalação e da exploração e os níveis de emissões e de ruídos.

Em todos os sistemas de cogeração, existe, necessariamente, a rejeição de calor não convertido em potência elétrica que é utilizado para atender a uma demanda térmica. Quanto à disposição de demanda de calor em relação à geração de energia elétrica, existem dois tipos de sistemas de cogeração, que devem ser escolhidos conforme necessidades térmicas e elétricas de cada processo e, fundamentalmente, em função da temperatura desejada na demanda de calor. Assim, de acordo com a posição relativa da geração de energia elétrica na seqüência de utilização de calor, os sistemas de cogeração podem ser classificados de dois tipos: geração elétrica a montante (*topping*) ou a geração elétrica a jusante (*bottoming*) (CLEMENTINO, 2000; LORA, 2004a; TOLMASQUIM, 2005).

As instalações do tipo *topping* são mais usuais e consistem na produção de energia elétrica antes da demanda térmica ser utilizada por um determinado processo. A Figura 2.1 mostra o esquema de uma instalação do tipo *topping*. Um exemplo de aplicação deste tipo é quando o combustível é queimado em uma caldeira de vapor que é utilizada para gerar potência em um gerador e o calor rejeitado pela turbina é empregado no processo produtivo (CLEMENTINO, 2000).

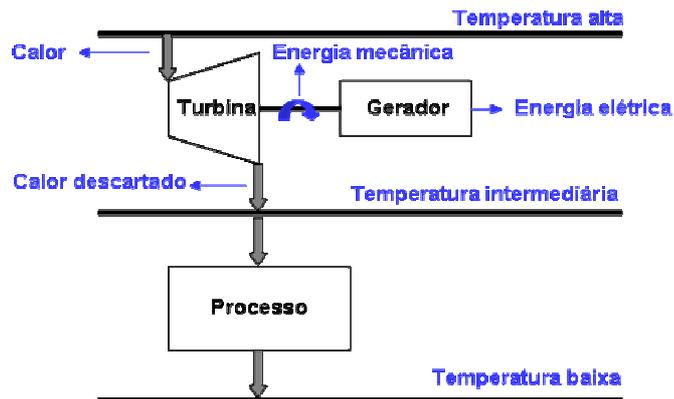


Figura 2.1 – Instalação de cogeração do tipo *topping*

As instalações *bottoming* são de emprego mais restrito, pois o calor rejeitado em processos industriais está em níveis de temperatura relativamente baixos para produção de potência, uma vez que a geração elétrica está situada após o processo, conforme é mostrado na Figura 2.2. Uma aplicação para este ciclo ocorre na indústria cimenteira, onde o calor primeiramente aquece uma fornalha e o calor residual de baixa temperatura é utilizado para gerar eletricidade (CLEMENTINO, 2000).

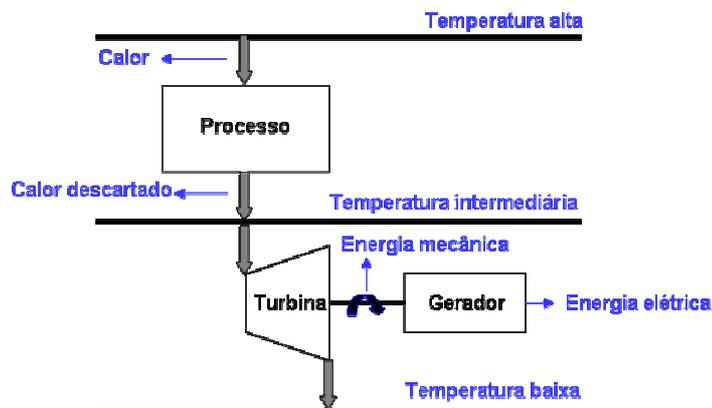


Figura 2.2 – Instalação de cogeração do tipo *bottoming*

Nas plantas de cogeração, vários arranjos de equipamentos podem ser adotados, desde simples turbinas a vapor acopladas a caldeiras convencionais, até sistemas mais

complexos. As plantas de cogeração recebem denominações de acordo com os dispositivos, arranjos, equipamentos e combustíveis utilizados com o objetivo de obter maior rendimento energético. A seguir, são apresentados os principais aspectos construtivos dos sistemas de acionamento primário.

2.3.1. Cogeração com turbina a vapor

O emprego de turbinas a vapor é a opção tecnológica mais difundida em indústrias e em sistemas de rede de calor. O vapor produzido em caldeiras é utilizado no acionamento de turbinas a vapor para geração de potência e o vapor de escape é empregado como calor de processo.

A cogeração com turbinas a vapor tem-se difundido, principalmente, na produção centralizada de energia elétrica nas grandes instalações (acima de 20MW) e em indústrias nas quais são indispensáveis elevadas quantidades de vapor para o processo. Destacam-se, dentre outras, as indústrias de pasta de papel, refinação de petróleo e química pesada. A grande difusão dos sistemas de cogeração com turbinas a vapor pode ser parcialmente atribuída às vantagens de longa vida útil e de adequação desses equipamentos ao uso de uma grande variedade de combustíveis. Incluem-se, nesse grupo, o carvão, os recursos florestais (madeira, etc.), e também o gás natural (LORA, 2004a).

Os sistemas de cogeração com turbina a vapor são, de uma forma geral, constituídos por cinco grandes módulos: pré-aquecedor, caldeira, turbina, condensador e gerador.

O funcionamento deste sistema começa com o pré-aquecimento da água, no pré-aquecedor. Em seguida, esta água é direcionada para a caldeira, onde a energia extraída do combustível é absorvida pela água fazendo com que esta atinja temperaturas suficientes para produzir vapor de altíssima pressão. Este vapor de água entra na turbina, onde sofre uma poderosa expansão que faz com que a energia do vapor se transforme em energia mecânica, através da rotação da turbina, produzindo, assim, trabalho útil. Depois de produzir trabalho na turbina, o vapor já a uma pressão inferior, mas mesmo assim considerável, denominado de vapor exausto, dirige-se para a etapa seguinte, que consiste num condensador. Nesse condensador, o vapor é liquefeito, transformando-se uma vez mais em água, que retorna ao princípio do ciclo, ou seja, à caldeira. Já nesse ponto, não é necessário usar o pré-aquecedor, uma vez que esta água encontra-se a uma temperatura já aceitável pela caldeira. Acoplado ao eixo da turbina, encontra-se o gerador que transforma a energia mecânica recebida em energia elétrica, para ser distribuída conforme as

necessidades. O vapor depois de acionar a turbina ainda se encontra a uma pressão considerável, sendo que, parte deste vapor é direcionada para o processo e a outra parte vai para o condensador, como fonte de vapor de alta ou baixa pressão. Esta diferenciação na pressão do vapor é conseguida extraíndo o vapor antes ou depois de estar completamente expandido. As turbinas a vapor são máquinas de grande velocidade e trabalham em condições bastantes críticas de pressão e temperatura (BAZZO, 1995; CLEMENTINO, 2000; LORA, 2004a).

As turbinas a vapor são, ainda, máquinas de combustão externa, pois os gases resultantes da queima do combustível não entram em contato com o fluído de trabalho que escoar no interior da máquina e realizam os processos de conversão da energia do combustível em potência de eixo. Logo, o calor necessário para a ebulição do condensador e para o superaquecimento posterior deve ser transferido do combustível para a água através das serpentinas no interior da caldeira. Em virtude disso, as turbinas a vapor apresentam uma flexibilidade em relação ao combustível a ser utilizado, podendo usar, inclusive, aqueles que deixam resíduos sólidos (cinzas) durante a queima (LORA, 2004a).

As turbinas a vapor são também classificadas em dois grandes grupos, de acordo com a pressão de saída do vapor: turbinas de condensação e turbinas de contra-pressão. As turbinas de condensação são turbinas onde a pressão de saída do vapor é menor que a atmosférica, sendo, neste caso, necessário o acréscimo de um condensador. A aplicação desse sistema ocorre em indústria que tenha combustível barato e não tenha necessidade de vapor no processo. Já as turbinas de contra-pressão, basicamente, são turbinas onde a pressão do vapor de saída é superior à pressão atmosférica, não sendo necessário o condensador. As turbinas de contra-pressão são utilizadas em indústrias em que, além de gerar sua própria energia elétrica, precisam de vapor a pressões moderadas para utilização industrial. É também utilizada para aumentar a potência de uma central de vapor já construída, denominada, nesse caso, de turbina superior (LORA, 2004a).

2.3.2. Cogeração com turbina a gás

A cogeração com turbina a gás é uma tecnologia que tem despertado grande interesse, uma vez que possui uma boa capacidade de expansão modular, simplicidade na implantação, menor tempo de comissionamento, investimento reduzido e alto fator de disponibilidade. Um dos fatores que tornam as turbinas a gás muito adequadas à cogeração é que os gases de escape, além de apresentarem grandes volumes e temperaturas elevadas, possuem alto teor de oxigênio (CLEMENTINO, 2000; LORA, 2004a; OLIVEIRA, 2003).

No entanto, as turbinas a gás apresentam baixo rendimento e alta rotação, o que as torna desfavoráveis no caso de aplicação industrial. Os gases de escape da turbina podem ser aproveitados diretamente para processos térmicos, ou de modo indireto, na produção de vapor ou água quente, utilizando uma caldeira de recuperação, ou utilizando os gases como comburente nos queimadores de caldeiras convencionais. O calor de escape frequentemente, é utilizado para produção de vapor, um vetor energético de amplo uso na indústria (CLEMENTINO, 2000; LORA, 2004a; OLIVEIRA, 2003).

Basicamente, os elementos que constituem uma turbina a gás são: o compressor, a câmara de combustão e a turbina propriamente dita. Em seu funcionamento, o ar é aspirado da atmosfera e comprimido, passando para a câmara de combustão, onde se mistura com o combustível. Nessa câmara, ocorre a reação de combustão, produzindo gases quentes, que escoam através da turbina, onde se expandem, movendo rodas com palhetas e produzindo potência mecânica para acionar o eixo do gerador elétrico (CLEMENTINO, 2000; LORA, 2004a).

A principal característica da turbina a gás é a exigência de um combustível nobre, que tanto pode ser gasoso, como o gás natural, ou líquido, como o diesel. Esses óleos devem entrar na máquina isentos de contaminantes, uma vez que atravessam a turbina. Caso contrário, esses contaminantes abreviam o intervalo de paradas, reduzindo a disponibilidade da unidade. Outra característica da turbina a gás é a grande quantidade de trabalho necessário no compressor que pode chegar à 40% da potência desenvolvida na turbina (LORA, 2004a).

As turbinas a gás podem ser classificadas em dois grupos, de acordo com o tipo de ciclo: ciclo aberto e ciclo fechado. Nas turbinas a ciclo aberto, o fluido de trabalho não retorna ao início do ciclo. O ar, retirado da atmosfera, é comprimido, levado à câmara de combustão onde, juntamente com o combustível, recebe uma faísca, provocando a combustão da mistura. Os gases desta combustão, então, se expandem, fornecendo potência à turbina e ao compressor, e, finalmente, saem pelo bocal de exaustão. Nas turbinas a ciclo fechado, o fluido de trabalho permanece no sistema. Para isso, o combustível é queimado fora do sistema, utilizando-se um trocador de calor para fornecer a energia da combustão ao fluido de trabalho. O ciclo fechado possui algumas vantagens sobre o ciclo aberto, tais como a possibilidade de se utilizar combustíveis sólidos e, a possibilidade de altas pressões em todo o ciclo, reduzindo o tamanho da turbomáquina em relação a uma potência útil requerida. Evita-se, assim, o desgaste das palhetas da turbina, elimina-se o uso de filtros, aumenta a transferência de calor devido à alta densidade do

fluido de trabalho sob alta pressão e utiliza-se de gases com propriedades térmicas desejáveis (BAZZO, 1995; CLEMENTINO, 2000; LORA, 2004a; OLIVEIRA, 2003).

2.3.3. Cogeração com motores alternativos

Os motores alternativos de combustão interna são máquinas que transformam a energia térmica de um combustível em energia mecânica através do acionamento de pistões confinados em cilindros. Os ciclos de operação mais comumente utilizados são os motores a combustão interna, de ignição por centelha (Otto) ou de ignição por compressão (Diesel), sendo esses últimos mais usados em instalações de cogeração (CLEMENTINO, 2000; LORA, 2004a; OLIVEIRA, 2003).

O motor alternativo é de todas as máquinas térmicas conhecidas para geração de eletricidade a que melhor converte a energia contida em combustíveis líquidos e gasosos em potência mecânica. Com a crescente participação do gás natural na matriz energética mundial, os motores alternativos começaram a serem desenvolvidos especialmente para a utilização desse insumo. Atualmente, esses equipamentos apresentam uma alta performance elétrica, térmica e baixo nível de emissões utilizando sistemas de controle e geração elétrica totalmente integrados. Este tipo de equipamento pode alcançar rendimentos, em determinadas condições, superiores a 45%, conseguindo mantê-lo praticamente constante em uma faixa de 50 a 100% de carga (OLIVEIRA, 2003).

Nos motores alternativos, a câmara de combustão é constituída por um cilindro, duas válvulas, sendo uma de admissão e outra de escape, uma vela de ignição e pistões. O pistão que se move no interior do cilindro é acoplado à biela que se articula com a cambota. A cambota transforma o movimento de vaivém num movimento rotativo, fazendo girar um eixo onde está acoplado o gerador de energia elétrica (LORA, 2004b).

2.3.4. Caldeira

Caldeira é um equipamento que, utilizando a energia química liberada durante a combustão de um combustível, promove a mudança de fase de um fluido do estado líquido para o de vapor, a uma pressão elevada várias vezes maior que a atmosférica. O vapor resultante é utilizado para o acionamento de máquinas térmicas, para a geração de potência mecânica e elétrica, bem como para o aquecimento de processos industriais (LORA, 2004b).

As caldeiras podem apresentar variações construtivas que permitem a obtenção de ciclos de vapor com características diversas. Quanto à posição dos gases quentes e do

fluido de trabalho, existem dois tipos: flamotubulares ou aquatubulares. Nas caldeiras chamadas flamotubulares, também conhecidas como fogotubulares ou pirotubulares, os gases fluem por dentro de tubos imersos em água. Esse tipo de caldeira é frequentemente usado em aplicações de pequeno porte, como indústrias, lavanderias e aquecimentos distritais. São caldeiras com capacidade de produção de vapor geralmente de até 20 ton/h. Nas caldeiras aquotubulares, ao contrário das flamotubulares, a água circula pelo interior dos tubos e os gases trocam calor com a água através de suas próprias paredes. As superfícies de troca de calor das caldeiras aquotubulares são arranjadas em forma de um conjunto de tubos verticais que revestem a fornalha, bem como de superfícies radiantes e convectivas dispostas nos dutos de passagem dos gases da combustão. As caldeiras aquotubulares são empregadas nas centrais termoelétricas e industriais que consomem grandes quantidades de vapor ou que necessitem de vapor superaquecido. A taxa de produção de vapor por área de troca de calor é maior que nas caldeiras flamotubulares (BAZZO, 1995; LORA, 2004a; LORA, 2004b).

As caldeiras são formadas por vários componentes. A fornalha é o principal equipamento para a queima do combustível. Entre as suas funções estão incluídas: a mistura ar-combustível, vaporização do combustível e a conservação de uma queima contínua da mistura. Encontram-se, ainda, outros componentes como: o cinzeiro – local de deposição das cinzas e restos de combustível que caem da fornalha; a câmara de combustão que é um volume que tem a função de manter a chama numa temperatura elevada com duração suficiente para que o combustível queime totalmente antes dos produtos alcançarem os feixes (dutos) de troca de calor; a caldeira de vapor (tambor de vapor), constituída por um vaso fechado à pressão contendo água que será transformada em vapor; o superaquecedor que consiste de um ou mais feixes tubulares, destinados a aumentar a temperatura do vapor gerado na caldeira; o reaquecedor que, tendo função equivalente a dos superaquecedores, sua presença torna-se necessária quando se deseja elevar a temperatura do vapor proveniente de estágios intermediários de uma turbina; as grelhas que são utilizadas para amparar o material dentro da fornalha, podendo ser fixas, rotativas e inclinadas; o economizador que, utilizando o calor residual dos gases para aquecer a água de alimentação, é normalmente instalado após os superaquecedores e melhora o rendimento da unidade, ou seja, sua instalação minimiza o choque térmico entre a água de alimentação e a já existente no tambor e, por último, o aquecedor de ar que, ao aproveitar o calor residual dos gases de combustão, pré-aquecendo o ar utilizado na queima

de combustível, aquece o ar entre 120 e 300 °C, dependendo do tipo de instalação e do tipo de combustível queimado (BAZZO, 1995; LORA, 2004a; OLIVEIRA, 2003).

Nas caldeiras aquatubulares, a água a ser aquecida passa no interior de tubos que, por sua vez, são envolvidos pelos gases de combustão. Os tubos podem estar organizados em feixes como nos trocadores de calor apresentam a forma de um corpo cilíndrico ou em paredes de água como nas caldeiras maiores. Uma caldeira aquatubular pode custar até 50% mais que uma caldeira flamotubular de capacidade equivalente (BAZZO, 1995). Apresenta, porém, algumas vantagens, entre elas, a maior capacidade de produção de vapor por unidade de área de troca de calor e a possibilidade de utilização de temperaturas superiores a 450°C com pressões acima de 60 kgf/cm². A partida deste tipo de caldeira é relativamente rápida, em razão do volume reduzido de água que ela contém. A limpeza dos tubos é mais simples que a flamotubular e pode ser feita automaticamente através de sopradores de fuligem. A vida útil destas caldeiras pode chegar a 30 anos (BAZZO, 1995).

Nas caldeiras flamotubulares, os gases quentes da combustão circulam no interior de tubos que atravessam o reservatório de água a ser aquecida para produzir vapor. Esse tipo de caldeira, geralmente de pequeno porte, apresenta baixa eficiência e é utilizada apenas para pressões reduzidas. Apesar disso, continua em uso em razão do seu baixo valor de investimento comparado com as caldeiras aquatubulares e da facilidade de manutenção, além de apresentar a vantagem de utilizar qualquer tipo de combustível, líquido, sólido ou gasoso e de ser comum o seu uso com óleo e gás (BAZZO, 1995; LORA, 2004a).

2.4. Cogeração nas indústrias

São muitas as atividades industriais que fazem uso de grandes quantidades de energia térmica, podendo ser fria ou quente. A necessidade de calor sempre é maior, sobretudo na agroindústria e na indústria de transformação – açúcar e álcool, sucos de frutas, beneficiamento de arroz e de madeira, extração de óleo vegetal, papel e celulose, petroquímica, têxtil, tinturaria, cervejaria, cimento, vidro, cerâmica, produtos químicos e alimentos em geral.

O interesse do setor industrial por cogeração tem crescido, pois a parcela de custo financeiro da geração térmica é menor do que a parcela correspondente a uma geração hidrelétrica. A energia térmica de cogeração é competitiva com a energia hidrelétrica, porque tem sua parcela de custo do combustível absorvido quase totalmente e muitas vezes, integralmente, pela indústria ou atividade a que serve. Ou seja, em muitos

casos de cogeração pode não ser necessário gasto adicional de combustível. Em determinados níveis tarifários, a geração de excedentes de cogeração é uma opção bastante lucrativa. Outro fator que está impulsionando o crescimento da cogeração nas indústrias é a busca da auto-suficiência, com vistas a minimizar a dependência energética na produção industrial (CLEMENTINO, 2000).

Nesse sentido, destaca-se a participação da cogeração nos principais setores industriais.

2.4.1. Cogeração na indústria sucro-acooleira

Tem-se no bagaço da cana-de-açúcar sua matéria-prima, um combustível anteriormente considerado um resíduo incômodo e que tinha que ser removido com despesas que penalizavam o produtor de álcool ou açúcar.

Atualmente, nas indústrias sucro-acooleiras, o bagaço da cana-de-açúcar é utilizado como combustível para a fornalha das caldeiras. O vapor gerado nas caldeiras fornece o calor ao processo e energia mecânica para movimentar as turbinas para geração de energia elétrica. O vapor primário produzido é empregado diretamente para o acionamento de equipamentos através de turbinas a vapor, normalmente de simples estágio e contrapressão, dentre os quais: picadores, desfibradores, ternos da moenda, bomba de alimentação da caldeira e os geradores de energia elétrica. O vapor de contrapressão proveniente das turbinas, chamado de vapor de escape, tem a pressão em torno de 0,25 MPa e é utilizado no processo produtivo propriamente dito fornecendo-lhe o calor necessário (CLEMENTINO, 2000; OLIVEIRA, 2003).

A queima do bagaço da cana-de-açúcar tem sido parcialmente usada em cogeração há muito tempo, mas em virtude das crises energéticas dos últimos anos, tornou-se uma fonte significativa de energia para o mercado pela possibilidade de gerar sobras de energia além da necessária para acionar a indústria. Essas sobras podem ser muito importantes para a matriz energética por estarem disponíveis em períodos de menor oferta de energia hidrelétrica – fonte básica de energia. Entretanto, essa geração extra de energia exige investimentos além daqueles necessários à finalidade básica da indústria e, por isso, ainda não foi feita na maioria das usinas (CLEMENTINO, 2000; OLIVEIRA, 2003).

As destilarias são praticamente autônomas em termos do atendimento de suas necessidades energéticas, sendo pequena a parcela de energia elétrica consumida da rede das distribuidoras locais ao longo do ano, predominantemente nos períodos da entressafra.

2.4.2. Cogeração na indústria de papel e celulose

O segmento de papel e celulose apresenta características particularmente interessantes para a viabilização da cogeração, pois apresenta um elevado consumo de vapor de processo e eletricidade. Assim sendo, seu potencial de cogeração é expressivo, podendo as indústrias atingir a auto-suficiência ou mesmo gerarem excedentes, com as tecnologias disponíveis comercialmente no país.

O segmento de papel e celulose está dividido em três grupos, sendo eles: indústrias que fabricam apenas celulose, aquelas que produzem apenas papel e as que produzem tanto a celulose quanto o papel, chamadas também de integradas. Durante o processo de fabricação de celulose, vários subprodutos na forma de biomassa (entre eles as cascas e a lixívia) são formados e, portanto, as indústrias produtoras de celulose apresentam uma maior porcentagem de eletricidade proveniente da cogeração, sendo praticamente auto-suficientes. Já as indústrias integradas, a auto-suficiência não é possível, porém é cogerada, aproximadamente, 60% da eletricidade do processo, considerando que, durante a obtenção do papel, uma grande quantidade de energia é consumida. Quanto às indústrias fabricantes de papel, devido à inexistência de subprodutos de processo, há necessidade de comprar combustível, em sua maior parte de origem hidrelétrica (CLEMENTINO, 2000; OLIVEIRA, 2003).

As indústrias integradas e as de papel precisam comprar combustível complementar (gás natural para alimentar sistemas de turbinas a gás adaptados à turbina a vapor existente) e a análise econômica indicou a não-viabilidade do processo, face às tarifas praticadas pelo setor elétrico na ocasião. Já nas indústrias produtoras de celulose, como são formados subprodutos de biomassa - lixívia e resíduos de madeira - no processo produtivo, elas possuem potencial para o implemento de uma planta de cogeração (CLEMENTINO, 2000; OLIVEIRA, 2003).

2.4.3. Cogeração na agro-indústria

Utilizando resíduos sólidos do beneficiamento de cereais e de serragem das serrarias e das oficinas moveleiras, nesse tipo de indústria, a cogeração também pode ser utilizada para a produção de parte da energia necessária para o seu processo de produção. Indústrias de sucos, além de usar seus resíduos de produção, têm utilizado, também, de bagaço de cana para cogerar energia (LIMA, 2002).

2.4.4. Cogeração nas indústrias metalúrgica e siderúrgica

Na indústria siderúrgica, a cogeração pode ser feita através do aproveitamento dos gases em altas temperaturas dos seus fornos. No entanto, esse potencial não tem sido inteiramente aproveitado. A oferta ampla de energia elétrica das concessionárias com tarifas favoráveis foi uma das principais causas da falta de investimento em cogeração nesse tipo de indústria. Apesar disso, desde o racionamento de energia que resultou em escassez e aumento das tarifas de energia elétrica, há uma tendência em se reconsiderar os projetos de cogeração anteriormente inviáveis.

Geração própria de energia é uma outra proposta que também minimiza a dependência energética do consumidor de energia com intensidade acima da média, geralmente de energia elétrica. É o caso dos consumidores eletrointensivos como os produtores de alumínio e ferro-ligas que podem instalar geradores próprios e ficam independentes dos fornecedores no caso de racionamento, assim como da variação de preços das tarifas (LIMA, 2002).

Na indústria metalúrgica, a cogeração não é muito utilizada, embora possua um grande potencial, como é o caso das indústrias que necessitam de grande quantidade de energia térmica nos seus processos internos. Como exemplo, pode-se citar as indústrias de produção de alumina, que necessitam de grande quantidade de vapor para que ocorra a dissociação das moléculas de alumina (LIMA, 2002).

A exemplo, o processo Bayer, universalmente utilizado para a produção de alumina, consiste em dissolver o tri-hidrato de alumínio da bauxita em uma solução cáustica aquecida a uma temperatura de 150 ou 180 graus centígrados com uso de vapor (LIMA, 2002).

Faz parte deste processo o aquecimento da solução cáustica seguida de um resfriamento produzido pela diluição dessa solução, o que vai exigir uma fase de evaporação para que ela possa voltar ao ciclo do processo. Assim, o aquecimento e a evaporação são duas operações que consomem calor usualmente obtido de caldeiras de baixa pressão em vista das temperaturas acima indicadas (LIMA, 2002).

A cogeração pode ser realizada, simplesmente, usando caldeiras de alta pressão com superaquecimento, as quais alimentam conjuntos de turbinas a vapor de extração acoplados a geradores elétricos cujo vapor da extração em pressão baixa adequada, por sua vez, alimenta os equipamentos de aquecimento e de evaporação citados acima. A potencialidade de produzir energia mecânico-elétrica com o vapor necessário ao processo é

aproveitada na cogeração. O nível de pressão da extração deve ser definido pela temperatura de aquecimento necessária (LIMA, 2002).

O custo dos investimentos necessários à cogeração é o diferencial de custos das caldeiras de alta pressão com superaquecedores e o das de baixa pressão acrescidos dos conjuntos de turbinas com geradores elétricos. A ordem de grandeza desse custo é uma parcela importante e precisa, portanto, ser bem avaliada pelos critérios de rentabilidade que vão ser definidos em função dos custos de combustível a ser usado, das tarifas de energia elétrica disponível e, principalmente, do custo do financiamento (LIMA, 2002).

2.4.5. Cogeração em outros setores da economia

Após a crise de 2001, evidenciada pelo racionamento de energia, a cogeração tem se expandido no Brasil, principalmente, nos consumidores que possuem capacidade financeira bem estabelecida e cuja demanda de energia elétrica é alta em virtude de necessidades de aquecimento ou de refrigeração.

Assim é que algumas empresas, quando podem, passam a cogerar energia para não reduzir, em período de racionamento, seus consumos de energia, evitando perdas importantes de confiabilidade de suas operações ou de sua rentabilidade. Nesse caso, estão os *shoppings centers*, grandes supermercados, hotéis, hospitais, aeroportos e fabricantes de bebidas, como cerveja e refrigerantes, em localizações onde existem possibilidades de suprimento por gás natural como combustível. O recurso da cogeração tem permitido garantia de suprimento e, às vezes, redução de custo de energia e melhoria da produtividade (CLEMENTINO, 2000).

CAPÍTULO 3

CONTROLADORES FACTS

3.1. Introdução

Capacitores série têm sido usados com sucesso para aumentar a estabilidade de redes de transmissão de alta tensão há muitos anos. O princípio de funcionamento é o de compensar a queda de tensão indutiva da linha de transmissão, pela inserção de queda de tensão capacitiva. Estes capacitores são conectados em série com as linhas, de modo a compensar a reatância indutiva inerente do sistema de transmissão. Este fato reduz a reatância de transferência entre as barras nas quais a linha está conectada. Como consequência imediata, ocorre um aumento da máxima potência que pode ser transmitida e a redução das perdas reativas (GROETAERS, 1995).

Uma completa compensação da linha não é aconselhável, pois problemas graves decorrem desta compensação total. Nesta situação, a reatância efetiva da linha será zero e a corrente e o fluxo de potência na linha serão extremamente sensíveis às variações da tensão terminal. Além disso, altos níveis de compensação aumentam a complexidade do sistema de proteção e a probabilidade de ocorrência do fenômeno da ressonância subsíncrona. Geralmente, o nível de compensação máximo é cerca de 80% (GROETAERS, 1995; TARANTO, 2007).

A tendência geral, no desenvolvimento do sistema de potência, é o aumento da capacidade para atender às exigências da demanda de energia. Devido a razões econômicas e ecológicas, esta tendência está se acelerando, uma vez que a construção de novas linhas está se tornando mais e mais difícil. Mediante esse novo cenário, houve a necessidade de aumentar a capacidade de transmissão e de melhorar o controle dos sistemas existentes. Essa necessidade foi suprida pela rápida evolução da eletrônica de potência, que possibilitou o controle dos capacitores séries, evoluindo para o Controlador FACTS (*Flexible AC Transmission System*) (HINGORANI, 2000; CIGRÉ, 2000).

Nesta nova situação do sistema de potência, a aplicação dos dispositivos FACTS permitiram maior flexibilidade na operação e controle dos sistemas de potência, de forma a melhorar o uso dos sistemas de transmissão existentes. Os FACTS controlam o fluxo de carga, a tensão em condições de regime permanente e aumentam o limite de

estabilidade, bem como o amortecimento de oscilações de potência em regime transitório, seguidas de diferentes contingências de falta (HINGORANI, 2000; WATANABE, 1998).

Os Controladores FACTS também são de grande valia nos estudos de estabilidade a pequenas perturbações. Neste caso, por exemplo, o amortecimento das oscilações do sistema pode ser aumentado através da modulação de pequenos capacitores em série com as linhas de transmissão. Com isso, a estabilidade dos sistemas de potência passou a ter mais graus de liberdade com a utilização dos equipamentos FACTS. Nos estudos de estabilidade transitória, estes equipamentos podem propiciar o aumento do limite de transferência de grandes blocos de energia como, por exemplo, com o chaveamento de grandes capacitores série em determinadas linhas de transmissão. Podem ainda, melhorar consideravelmente a regulação de tensão próxima aos grandes centros consumidores (HINGORANI, 2000; WATANABE, 1998).

3.2. Definições e classificações

O IEEE (*The Institute of Electrical and Electronics Engineers*) em conjunto com o CIGRÉ (*Conseil International des Grands Réseaux Electriques*) definem os Controladores FACTS como “sistemas de transmissão de corrente alternada que incorporam controladores baseados em eletrônica de potência e mais outros controladores estáticos, para melhorar a controlabilidade e aumentar a capacidade de transferência de potência”. (EDRIS, 2000; HINGORANI, 2000; CIGRÉ, 2000).

Os Controladores FACTS foram introduzidos por N. Hingorani, em 1980, e desde, então, vários equipamentos baseados na eletrônica de potência foram desenvolvidos e instalados nos sistemas de energia elétrica (MATHUR, 2002). Essa boa aceitação deu-se em virtude dos benefícios que os Controladores FACTS trazem ao sistema, dentre os quais se podem ser citados:

- Controla diretamente o fluxo de potência em rotas específicas de transmissão;
- Amplia a capacidade de transmissão de potência das redes até seu limite térmico;
- Aumenta a capacidade de transferência de potência entre áreas controladas, reduzindo a margem de reserva da geração consideravelmente;
- Aumenta a segurança do sistema, ao aumentar o limite de estabilidade transitória, limitando as correntes de curto-circuito e sobrecarga, assim como o efeito de outras falhas nos outros equipamentos;

- Amortece oscilações eletromecânicas;
- Melhora o controle de emergência de forma rápida durante contingência;
- Aumenta a flexibilidade na localização de novas usinas geradoras.

Uma propriedade única dos Controladores FACTS é a grande flexibilidade que representa nos três estados operativos do sistema: pré-falta, falta e pós-falta. A capacidade para controlar transitórios e atuar rapidamente no período pós-falta, torna-os atrativos.

Existem várias formas de classificar os Controladores FACTS, uma delas é em função da conexão dos equipamentos no sistema, podendo ser: série, derivação, combinado série-série ou combinado série-derivação.

Os controladores série consistem em uma impedância variável, como um capacitor, reator, etc., ou como fontes variáveis baseadas em eletrônica de potência (ver Figura 3.1). O princípio de funcionamento de todos os controladores série é inserir uma tensão em série à linha de transmissão. Uma impedância variável multiplicada pela corrente que flui através da linha representa a tensão em série inserida nela própria. Enquanto a tensão estiver em quadratura com a corrente, o controlador está consumindo potência reativa e qualquer outro ângulo de fase representa a variação da potência ativa (CÁRDENAS, 2005; PAUCAR, 2004).

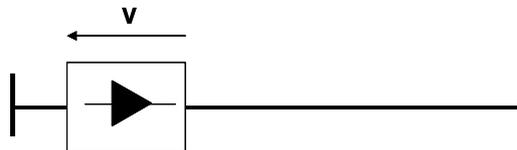


Figura 3.1 - Diagrama esquemático de um controlador série

O controlador em derivação, assim como os controladores série, são impedâncias variáveis, fontes variáveis, ou a combinação destes (ver Figura 3.2). O princípio de funcionamento de todos os controladores em derivação é injetar uma corrente no ponto de conexão. Uma impedância variável submetida a uma tensão resulta em um fluxo de corrente variável e, dessa maneira, representa uma injeção de corrente no sistema. Enquanto a corrente injetada estiver em quadratura com a tensão, o controlador em derivação consome potência reativa e em qualquer outro ângulo de fase ocorre variação de potência ativa (CÁRDENAS, 2005; PAUCAR, 2004).

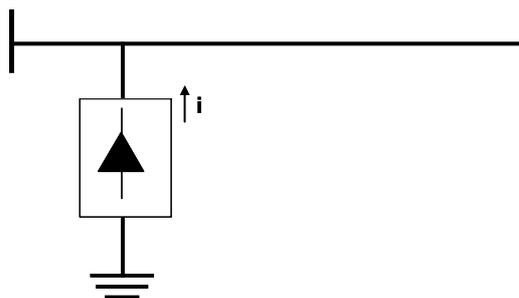


Figura 3.2 - Diagrama esquemático de um controlador em derivação

Já o controlador combinado série-série é uma combinação de controladores série coordenados em um sistema de transmissão com várias linhas. Na Figura 3.3, é mostrado um diagrama esquemático do Controlador FACTS combinado série-série. Esse controlador pode ser, ainda, um controlador unificado no qual os controladores em série realizam uma compensação série reativa independente para cada linha, mas também transferem potência ativa entre as linhas via o enlace de potência. A capacidade de transferência de potência ativa que apresenta o controlador série-série unificado – controlador de fluxo entre linhas – permite um balanço de fluxo de potência ativa e reativa entre as linhas, maximizando o uso dos sistemas de transmissão (CÁRDENAS, 2005; PAUCAR, 2004).

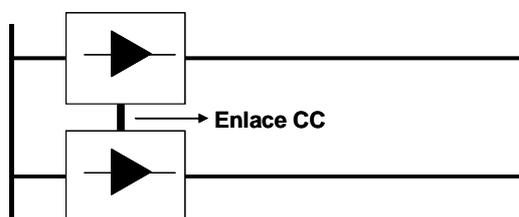


Figura 3.3 - Diagrama esquemático de um controlador combinado série-série

O controlador combinado série-shunt é uma combinação separada de controladores série e derivação, os quais são controlados de forma coordenada ou trata-se de um controlador de fluxo de potência unificado com elementos em série e em derivação (ver Figura 3.4). Seu princípio de funcionamento é injetar corrente no sistema através de uma componente em derivação do controlador e de uma tensão em série com a linha, utilizando a componente em série. Quando os controladores em série e em derivação estão unificados, pode haver um intercâmbio de potência ativa entre os elos através de um enlace (CÁRDENAS, 2005; PAUCAR, 2004).

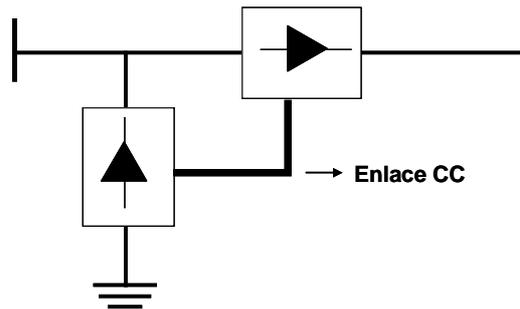


Figura 3.4 - Diagrama esquemático de um controlador combinado série-derivação

Os principais Controladores FACTS são: compensador estático variável (SVC - *static VAR compensator*); capacitor série controlado por tiristores (TCSC - *thyristor controlled series capacitor*); transformador defasador controlado por tiristores (TCPST - *thyristor controlled phase shifting transformer*); controlador universal de fluxo de potência (UPFC - *unified power flow controller*); compensador estático síncrono (STATCOM - *static synchronous compensator*); compensador estático em série síncrono (SSSC - *static synchronous series compensator*); resistor de freado controlado por tiristores (TCBR - *thyristor controlled braking resistor*); controlador de potência entre fases (IPC - *interphase power controller*); capacitor série comutado por tiristores ou mecanicamente (TSSC/MSSC - *thyristor/mechanically switched series capacitor*) e elo de corrente contínua de alta tensão (HVDC - *high voltage direct current*); este último nem sempre a maioria considera como sendo um Controlador FACTS. Além dele, considera-se que os dispositivos, a seguir, não são estritamente Controladores FACTS: transformador defasador (PST - *phase shifting transformer*), capacitor comutado mecanicamente (MSC - *mechanically-switched capacitor*), capacitor série (SC - *series capacitor*) e compensador estático convertível (CSC - *convertible static compensator*) (CÁRDENAS, 2005; EDRIS, 2000; HINGORANI, 2000; PAUCAR, 2004; SOOD, 2004).

As primeiras aplicações dos Controladores FACTS utilizavam a tecnologia SVC, baseada em TCR (*thyristor-controlled reactor*). No entanto, avanços recentes da eletrônica de potência permitiram a utilização de uma nova geração de Controladores FACTS, como os baseados em conversores de fontes de tensão (VSC - *voltage source converter*), com o uso de tiristores com tecnologia GTO (*gate-turn-off*). Dentro dessa geração, encontra-se o STATCOM, o SPS (*static phase shifter*) e o UPFC, dentre outros (HINGORANI, 2000).

Atendendo-se aos objetivos propostos neste trabalho, as discussões irão se restringir apenas sobre o Controlador FACTS do tipo SVC.

3.3. Static Var Compensator (SVC)

De acordo com (HINGORANI, 2000) e (EDRIS, 1997), o *IEEE PES Task Force of the FACTS Working Group* definiu os termos e descrições para cada tipo de Controladores FACTS. Dentre todos eles, o *Static Var Compensator (SVC)* foi classificado como um Controlador FACTS de primeira geração, sendo descrito da seguinte forma:

“Static Var Compensator (SVC) é um gerador ou absorvedor de Var estático, conectado em shunt, cuja saída é ajustada para o intercâmbio de corrente reativa capacitiva ou indutiva para manter o controle de um específico parâmetro do sistema de potência, geralmente a tensão de uma barra”.

O SVC foi desenvolvido no início dos anos 70, sendo concebido, inicialmente, para aplicações industriais, como controle de *flicker* (oscilações rápidas de tensão) e para regulação de tensão na presença de fornos a arco ou durante partida de grandes motores. Posteriormente, os SVC passaram a ser utilizados em sistemas de potência. Existem, atualmente, mais de dez SVC's instalados no Sistema Interligado Nacional, com maior concentração nas regiões Centro-Oeste e Nordeste. O SVC é utilizado, principalmente, em situações onde existe a necessidade de um controle rápido e contínuo de potência reativa, sendo aplicado principalmente para atingir os seguintes objetivos:

- Controlar sobretensões temporárias à frequência industrial;
- Prevenir colapso de tensão;
- Melhorar a estabilidade transitória e pequenas oscilações;
- Amortecer oscilações subsíncronas;
- Reduzir os desbalanços de tensão e de corrente.

Para que o SVC seja eficiente, no amortecimento de oscilações eletromecânicas de baixa frequência, sinais adicionais devem ser aplicados ao regulador de tensão do SVC, de maneira semelhante aos PSS (*Power System Stabilizer*) utilizados em reguladores automáticos de tensão dos geradores síncronos (TARANTO, 2007).

3.3.1. Configurações do SVC

O SVC é um equipamento composto por reatores e capacitores ligados em derivação que, juntamente com transformadores e dispositivos de chaveamento e controle, formam um sistema de compensação reativa que pode ser controlado dentro de um limite específico e manter a tensão de uma determinada barra controlada dentro de uma

determinada faixa. O termo “estático” é usado para indicar que, diferentemente dos compensadores síncronos, o SVC não possui componente principal girante ou rotativo.

Na Figura 3.5 mostra-se o diagrama esquemático de um SVC.

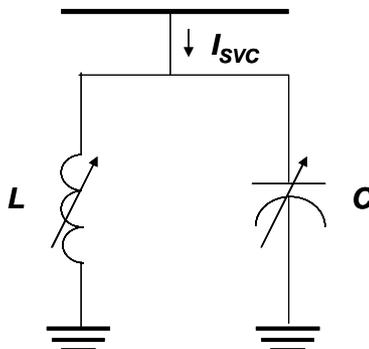


Figura 3.5 – Representação de um SVC

Nos arranjos de SVC mais comuns, os capacitores podem ser fixos (FC – *Fixed Capacitor*) ou chaveáveis a tiristores (TSC – *Thyristor Switched Capacitor*), provendo compensação constante ou com variação discreta. Da mesma forma, o SVC pode conter reatores fixos (FR – *Fixed Reactor*) ou chaveáveis a tiristores (TSR – *Thyristor Switched Reactor*). O elemento mais importante do SVC é o reator controlado a tiristores (TCR – *Thyristor Controlled Reactor*), responsável pelo controle contínuo da potência reativa do SVC, através do controle do ângulo de disparo das válvulas tiristorizadas (PEREZ, 2000; CÁRDENAS, 2005).

3.3.1.1. *Thyristor Controlled Reactor* (TCR)

O TCR é constituído por um reator fixo de indutância L em série com uma chave tiristorizada bidirecional. Na prática, a válvula tiristorizada é constituída por vários tiristores conectados em série para atender às restrições de isolamento para um determinado nível de potência. Uma válvula tiristorizada é disparada pela aplicação simultânea de um pulso no terminal de gatilho (*gate*) de todos os tiristores da mesma polaridade. A válvula é bloqueada sempre que a corrente CA passa por zero, até que o pulso do gatilho seja reaplicado. A corrente no reator pode ser controlada desde zero, quando a válvula está bloqueada, até um valor máximo, quando a válvula está conduzindo, através do controle do ângulo de disparo α , que representa o atraso no disparo da válvula e é medido em relação ao pico da tensão aplicada ao TCR em cada semi-ciclo. Na Figura 3.6, são mostrados os elementos básicos do TCR.

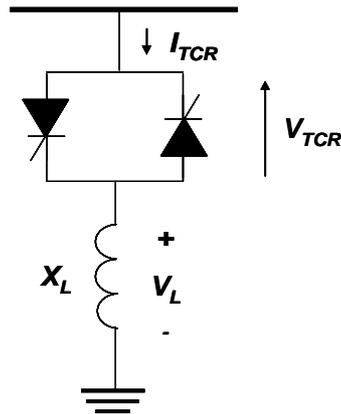


Figura 3.6 – Elementos básicos do TCR

Quando $\alpha = 0^\circ$, os tiristores são disparados no pico da tensão aplicada, conduzindo por todo o semi-ciclo, resultando em uma corrente essencialmente senoidal e reativa. Para α entre 0° e 90° , a condução é parcial e a componente fundamental da corrente no TCR reduz-se com o aumento do ângulo de disparo. Isso equivale a aumentar a reatância efetiva do TCR, reduzindo a corrente e potência reativa absorvida. Desta forma, conclui-se que o TCR se comporta como uma susceptância controlável (PEREZ, 2000; CÁRDENAS, 2005; HINGORANI, 2000).

3.3.1.2. Thyristor Switched Capacitor (TSC)

O TSC é constituído por um banco de capacitores separados em unidades de tamanho adequado, sendo que cada uma dessas unidades chaveadas utilizam chaves tiristorizadas. Cada unidade monofásica é composta de um capacitor em série com uma chave tiristorizada bidirecional e um pequeno indutor, cujo objetivo é limitar os transitórios de chaveamento, amortecer as correntes de energização e prevenir ressonâncias com a rede (TARANTO, 2007). Na Figura 3.7, mostra-se um esquema com os elementos do TSC (PEREZ, 2000; CÁRDENAS, 2005; TARANTO, 2007).

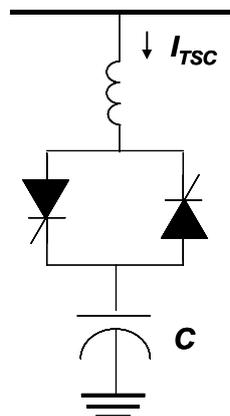


Figura 3.7 – Elementos básicos TSC

O TSC apresenta um circuito, no qual os tiristores são usados para conectar e desconectar o banco de capacitores do sistema de potência. Conseqüentemente, a potência reativa é inserida pelo banco chaveado de forma descontínua. Outra característica é que, como o chaveamento é feito em baixa frequência, os harmônicos gerados não representam um problema importante para o sistema.

Tiristores do TSC operam apenas em dois estados: bloqueado ou em condução total. No TSC, só há circulação de corrente no capacitor, caso os tiristores estejam em condução total. Caso contrário, o circuito estará aberto. O chaveamento do capacitor é feito quando a tensão na barra passar por zero, com a finalidade de evitar sobrecorrentes de chaveamento nos tiristores. Verifica-se que, no TSC, ou o capacitor está inserido totalmente ao sistema ou está fora dele, ou seja, não há controle de reatância capacitiva e sim, chaveamento. Quando se necessita variar a capacitância, uma alternativa é utilizar vários capacitores chaveados em paralelo (banco de capacitores). Esta solução consiste em se selecionar o valor da capacitância através do chaveamento de blocos de capacitores, de acordo com a necessidade do sistema (PEREZ, 2000; CÁRDENAS, 2005; TARANTO, 2007).

3.3.2. Princípio de funcionamento do SVC

Do ponto de vista do sistema, um SVC é equivalente a um capacitor e um indutor em derivação, os quais podem ser ajustados para controlar a tensão e a potência reativa em uma determinada barra.

Na Figura 3.8, é mostrada a característica tensão versus corrente de um SVC ideal. Como se pode notar, um SVC ideal apresenta uma capacidade ilimitada de geração ou absorção de reativos, pois o capacitor e o indutor podem variar infinitamente (TARANTO, 2007).

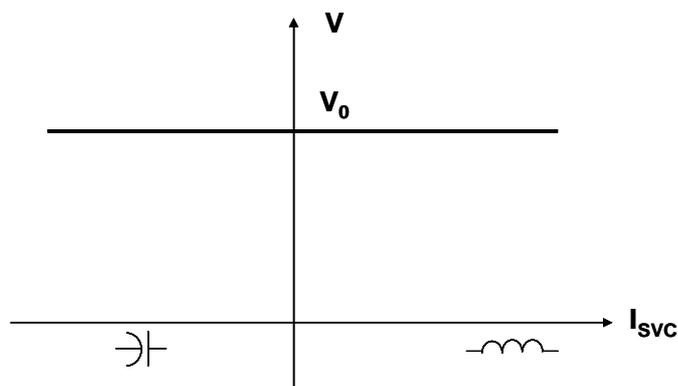


Figura 3.8 – Curva característica V/I de um SVC ideal

Considerando um TCR real, a corrente no reator é variada através do controle do ângulo de disparo da válvula tiristorizada, ou seja, a curva característica V/I do TCR se evidencia como mostrada na Figura 3.9.

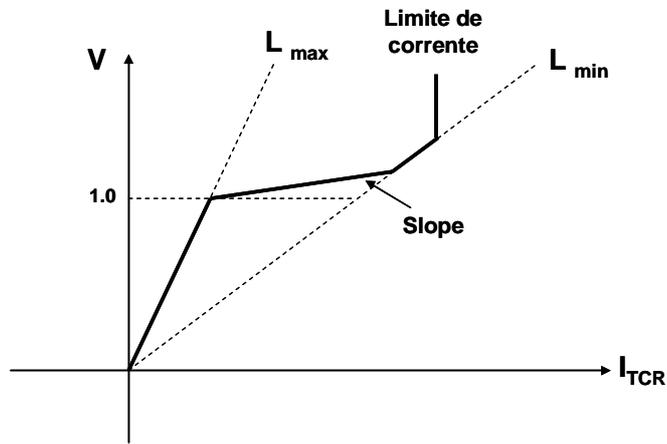


Figura 3.9 – Curva característica V/I do TCR

No caso do TSC, a curva característica de tensão versus corrente varia de acordo com o número de capacitores em paralelo (TARANTO, 2007), conforme é mostrado na Figura 3.10:

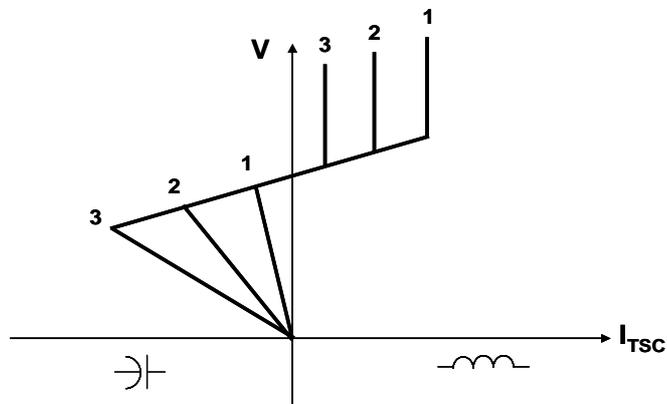


Figura 3.10 – Curva característica V/I do TSC

A curva característica tensão versus corrente para esse tipo de SVC é obtida através da composição das curvas características individuais do TCR e do TSC (TARANTO, 2007). O resultado é mostrado na Figura 3.11:

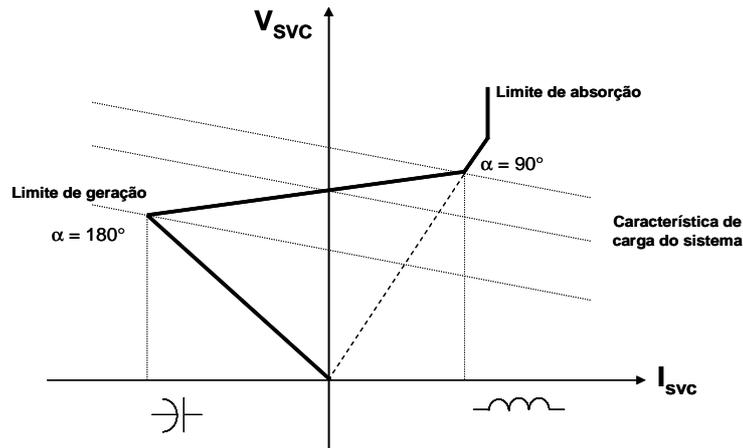


Figura 3.11 – Curva característica V/I do SVC

A máxima geração de potência reativa é obtida bloqueando o TCR, o que equivale a $\alpha = 90^\circ$. Reduzindo o ângulo de disparo, a corrente no TCR é aumentada, reduzindo a potência reativa gerada pelo SVC. Existe um determinado valor de α em que a potência reativa absorvida pelo TCR se iguala à potência reativa gerada pelo TSC, resultando em uma saída líquida nula no SVC. Supondo que a potência nominal do reator seja superior à do capacitor, reduções adicionais em α fazem com que a saída líquida do SVC passe a ser indutiva e determinada pela diferença entre as potências reativas do TCR e TSC. Com $\alpha = 0^\circ$, o TCR conduz por todo o semi-ciclo, resultando na máxima absorção de potência reativa pelo SVC (CÁRDENAS, 2005; TARANTO, 2007).

3.3.3. Sistema de controle do SVC

O sistema de controle de um SVC em nada difere de um sistema de controle convencional constituindo-se, basicamente, de um sistema de medição, um regulador e um atuador. Na Figura 3.12, tem-se um diagrama com os elementos básicos do SVC.

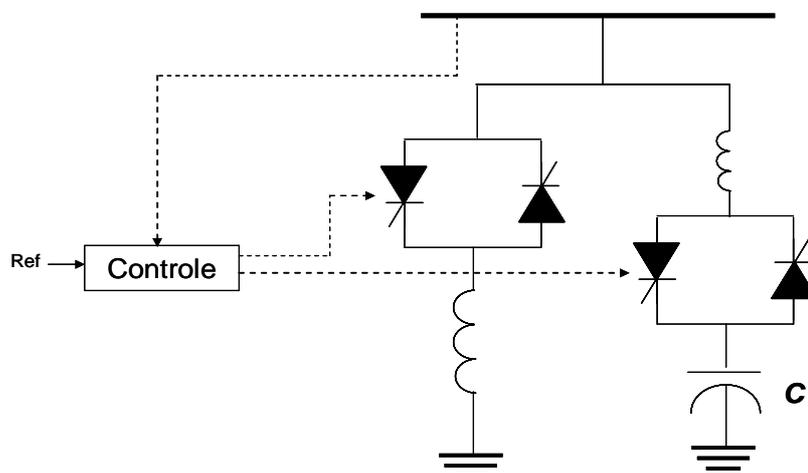


Figura 3.12 – Elementos básicos do SVC

A Figura 3.13 apresenta-se o diagrama de blocos do sistema de controle do SVC, incorporando as malhas de regulação de tensão e de controle do ângulo de disparo do TCR.

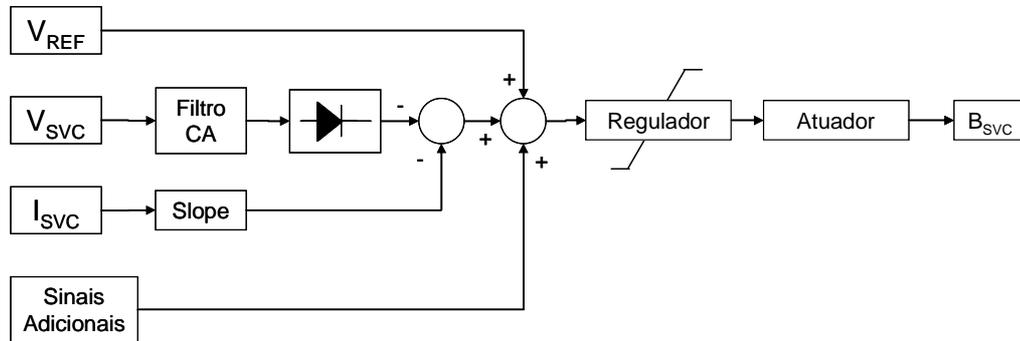


Figura 3.13 – Diagrama de blocos do sistema de controle do SVC

Os sinais instantâneos de tensão e corrente CA são medidos a partir de TP's e TC's, respectivamente, podendo ser medido na barra do SVC ou na barra de alta a ser controlada. Os filtros CA são utilizados para eliminar componentes de frequência correspondentes a possíveis ressonâncias paralelas no sistema vista pelos terminais do SVC. O sinal resultante V_{CA} é, então, retificado e filtrado. A tensão retificada e filtrada V_m é comparada a um valor de referência V_{REF} e o sinal de erro é aplicado à entrada de um regulador de tensão do tipo proporcional-integral, cuja função é manter constante a tensão controlada do SVC. Os sinais adicionais referem-se a quaisquer funções suplementares atribuídas ao controle do SVC, como por exemplo, sinais utilizados para o amortecimento de oscilações eletromecânicas. Por fim, o sinal de saída do regulador é enviado para o atuador (HINGORANI, 2000; PAUCAR, 2004; TARANTO, 2007).

O controle do ângulo de disparo do TCR e do TSC é realizado normalmente por meio de quatro funções. A primeira consiste na geração de pulsos sincronizados em relação ao pico da tensão CA do sistema, funcionando como um sincronizador para o SVC. A segunda função baseia-se em um conversor de corrente reativa (ou susceptância) para o ângulo de disparo. Essa conversão pode ser realizada através da implementação de um circuito que compute a relação matemática entre a amplitude da corrente fundamental do TCR e o ângulo, conforme a equação 3.1:

$$I_{LF}(\alpha) = \frac{V}{\omega L} \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right) \quad (3.1)$$

Onde:

$I_{LF}(\alpha)$ - amplitude da corrente fundamental em função do ângulo de disparo;

α - ângulo de disparo das válvulas

V - amplitude da tensão aplicada

ωL - reatância indutiva do reator fixo do TCR

A terceira função consiste na determinação do valor solicitado para a corrente fundamental, obtida através da diferença entre a corrente reativa total do SVC e a corrente no TSC. A quarta função consiste na produção dos pulsos de disparo dos tiristores do TCR, que é feita pela unidade geradora de pulsos de disparo, que, por sua vez aplica os pulsos no terminal de gatilho para fazer com que os tiristores entrem em condução em resposta ao sinal de saída, vindo do conversor de corrente reativa para o ângulo de disparo (HINGORANI, 2000; PAUCAR, 2004; TARANTO, 2007).

CAPÍTULO 4

MODELAGEM DO SISTEMA

4.1. O consumidor industrial ALUMAR

A ALUMAR – Consórcio de Alumínio do Maranhão – é um dos maiores complexos industriais na produção de alumínio e alumina do mundo. Fundada em julho de 1980, pelas empresas Alcoa, BHPBilliton, Alcan, e Abalco, entrou em operação em 1984. Atualmente, a ALUMAR tem uma produção anual de alumina de aproximadamente 1,5 milhões de toneladas e de 450 mil toneladas de alumínio. O complexo foi instalado na Ilha de São Luís - MA, em uma área de aproximadamente 5300 hectares. Na Figura 4.1, é mostrada uma foto aérea do complexo da ALUMAR.



Figura 4.1 – Vista aérea da ALUMAR

4.1.1. Descrição da planta

O complexo industrial está subdividido basicamente em três áreas: o Porto, a Refinaria e a Redução. O Porto recebe a matéria-prima, a Refinaria extrai a alumina da bauxita e envia para a Redução que transforma a alumina em alumínio.

4.1.1.1. Porto

O Porto da ALUMAR está situado na baía de São Marcos, a oeste da Ilha de São Luís, 10 km ao sul do Porto do Itaqui, principal porto de São Luís. O terminal foi construído na confluência do Rio dos Cachorros com o Estreito dos Coqueiros, o qual foi dragado a fim de permitir acesso à Baía de São Marcos. Além de exportar a produção de alumina, o Porto da Alumar recebe a maior parte da matéria prima necessária, onde atracam os navios que trazem bauxita, carvão mineral, piche e coque. São cerca de 4.200.000 t/ano movimentadas no Porto da ALUMAR.

4.1.1.2. Refinaria

Na Refinaria, ocorre o processo de refino da bauxita, principal matéria-prima, tendo como produto final a alumina. A alumina é um pó branco, seco, de consistência similar à areia fina de praia. Mais de 90% da alumina produzida no mundo é utilizada para produção de alumínio. A bauxita é um minério que contém aproximadamente 50% de gibsite ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$), também conhecida como alumina tri-hidratada. O método utilizado para separar a alumina tri-hidratada dos demais componentes da bauxita, tais como: sílica, ferro, titânio, cálcio, fosfato, etc., é conhecido como “Processo Bayer”. Na Figura 4.2, é mostrada uma foto da bauxita e outra da alumina.

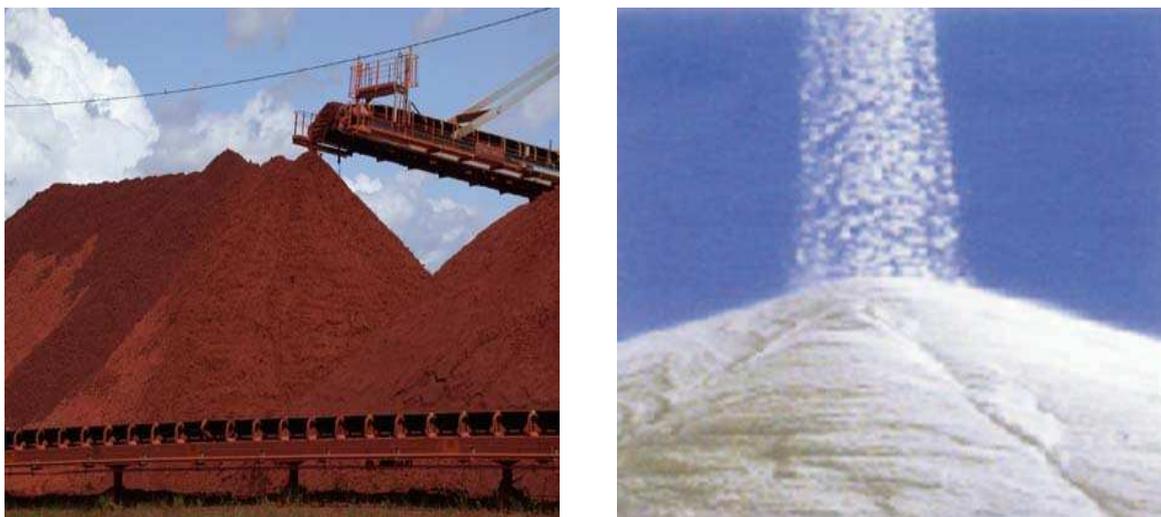
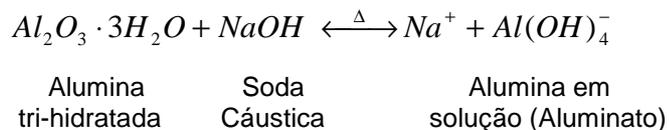


Figura 4.2 – Bauxita e Alumina

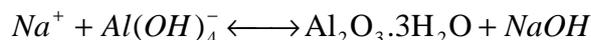
O Processo Bayer consiste basicamente em três etapas: a digestão, a clarificação e a precipitação. Na digestão, a bauxita é moída e misturada a uma solução de soda cáustica (NaOH) que reage da seguinte forma:



Essa reação é considerada a reação básica do processo Bayer. Nessa etapa, a alumina presente na bauxita está sob a forma do tri-hidrato ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) e é mais conhecida como hidrato. Para aumentar a eficiência da reação, o hidrato é aquecido em grandes tanques chamados digestores, os quais recebem vapor proveniente das caldeiras.

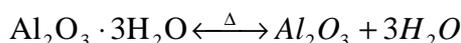
O produto resultante da reação de Digestão é uma pasta composta por resíduos sólidos (impurezas) e licor (solução contendo principalmente aluminato de sódio e soda cáustica dissolvidos). Os resíduos sólidos são separados do licor através de decantação e filtração. Essa etapa do processo é chamada Clarificação.

Como a solubilidade do hidrato em soda cáustica aumenta com a temperatura, a reação pode ser facilmente reversível pelo resfriamento da solução, recuperando a alumina:



Além da reação se voltar ao sentido da formação do hidrato, ela também serve para recuperar a soda cáustica do processo. Esta etapa do processo é conhecida como Precipitação.

Concluído o Processo Bayer, o hidrato é, então, enviado a um forno de calcinação, onde é submetido a uma temperatura de 1100 °C para remover as moléculas de água, resultando na alumina (Al_2O_3):



Cerca 60% da alumina produzida na ALUMAR é enviada para a área da Redução, aonde é transformada em alumínio, e o restante da produção é comercializado e exportado pelo próprio Porto da ALUMAR.

Em vários processos internos da cadeia de produção de alumina, é necessário utilizar vapor para que a alumina seja extraída da bauxita. Para gerar o vapor necessário ao processo, a ALUMAR possui atualmente três caldeiras instaladas com uma produção conjunta máxima de 210 ton/h. Essas caldeiras são do tipo aquatubulares e utilizam como combustível o carvão mineral e óleo BPF (baixo ponto de fluidez). Cada caldeira tem capacidade para 70 ton/h de vapor a uma pressão de 17,6 kgf/cm² e temperatura em torno

de 235°C (sendo 25°C de superaquecimento). A temperatura máxima do vapor superaquecido, a qual não é controlada, é de 250°C.

4.1.1.3. Redução

A Redução é a parte final da cadeia produtiva da ALUMAR. Essa área da fábrica recebeu esse nome devido ao processo de redução eletrolítica da alumina para a produção de alumínio que ocorre no local.

A alumina produzida na Refinaria é reduzida para alumínio em um banho eletrolítico fundido a 950 °C dentro das cubas eletrolíticas, onde estão mergulhados os anodos de carbono pré-cozidos (pólo positivo) que reagem com o oxigênio liberado pela dissolução da alumina. O alumínio líquido, resultante da eletrólise, é depositado sobre o revestimento catódico (pólo negativo) constituído de carbono que é, então, retirado das cubas e transportado para ser resfriado em moldes refrigerados a água na área denominada Lingotamento. Na figura 4.3, é mostrado o layout de uma cuba eletrolítica.

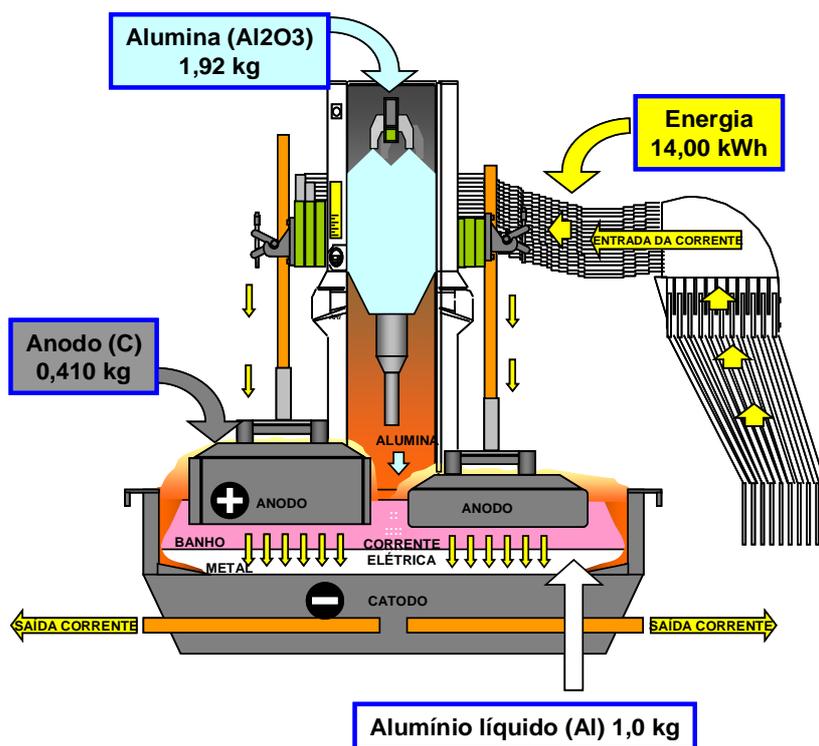


Figura 4.3 – Layout de uma cuba eletrolítica

As cubas eletrolíticas são ligadas em série (ver Figura 4.4) por corrente contínua de aproximadamente 230 kA e alimentadas por tensão de apenas 4,5 V, sendo 2 V para o processo eletrolítico e 2 V para manter a temperatura da cuba.

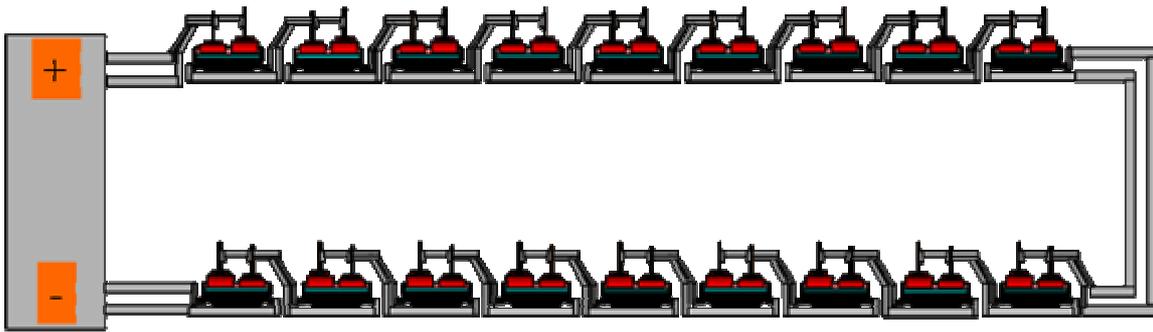


Figura 4.4 – Ligação das cubas eletrolíticas

A Redução da ALUMAR é dividida em três principais áreas operacionais: Linhas de Cubas, Eletrodos e Lingotamento. A área de Eletrodos fabrica os anodos para as cubas e as Linhas de Cubas transformam a alumina em alumínio líquido, enviado em seguida ao Lingotamento para solidificação e expedição.

A área de Eletrodos é responsável por produzir os anodos (pólo positivo da cuba eletrolítica) que é uma mistura de coque, piche e ‘butts’ (anodo usado). A essa mistura, depois de cozida, é chumbado uma haste de cobre para ser ligada no circuito elétrico.

O Lingotamento é a área responsável em receber o alumínio líquido vindo da Linha de Cubas e preparar os lingotes de alumínio primário ou ligas metálicas de 25 kg ou 350 kg conforme a solicitação do cliente. No Lingotamento, o alumínio puro vai para os fornos, onde é adicionado ou não outros metais como ferro e cobre, daí segue para formas e é resfriado com água formando os lingotes de alumínio que depois são empilhados e amarrados com cintas metálicas.

O Sistema de Força é responsável pelo fornecimento de energia elétrica à toda a planta da ALUMAR. A subestação 112Y, principal subestação da Redução, é o ponto de conexão do Sistema Elétrico da Alumar à Rede Básica do ONS (Operador Nacional de Sistema). Nesta subestação, é realizado o rebaixamento da tensão de transmissão (230 kV) da concessionária e a regulação de tensão e retificação da corrente a valores adequados ao processo de eletrólise do alumínio. Além do que, a subestação 112Y alimenta todos os serviços auxiliares da Redução. Todo o sistema elétrico da ALUMAR será descrito no próximo capítulo, bem como sua modelagem.

Na Figura 4.5, é mostrado um fluxograma completo da Redução.

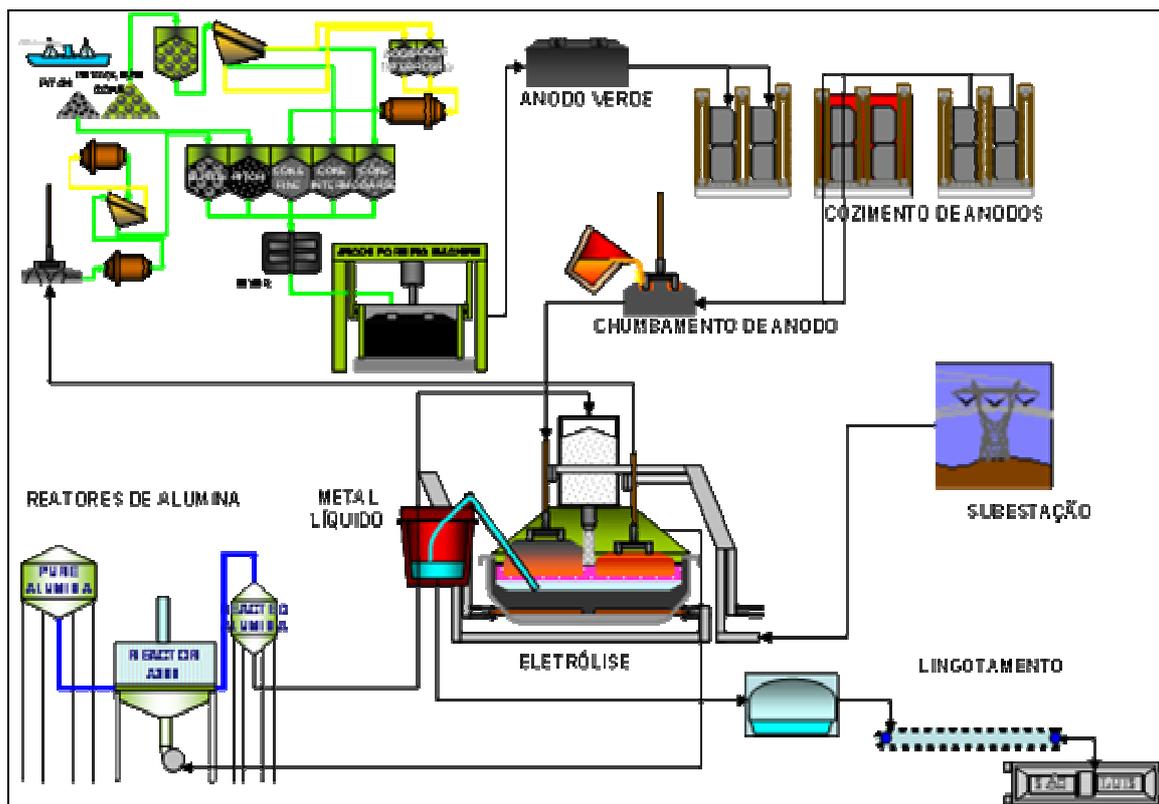


Figura 4.5 – Fluxograma da Redução

4.2. O sistema elétrico da ALUMAR

No Brasil, um país de dimensão continental, os primeiros sistemas de potência supriam apenas os pequenos centros de carga regionais e operavam de modo isolado. A partir dos anos 60, com o grande desenvolvimento industrial, começaram a ser construídas grandes usinas, fazendo com que os sistemas de potência fossem interligados.

Como decorrência das interligações entre as redes regionais bem como do aumento da demanda de energia elétrica, surgiu um grande número de problemas que tiveram de ser analisados, a fim de que se obtivessem melhores soluções técnicas e econômicas. As análises eram necessárias para avaliar os efeitos das falhas em linhas de transmissão, a perda da geração ou de um grande bloco de carga, que provocavam grandes variações de tensão, além de grandes excursões nos ângulos das máquinas síncronas.

Atualmente, no Brasil, há duas grandes redes interligadas: os sistemas interligados Sul/Sudeste/Centro-Oeste e Norte/Nordeste, tendo este último, linhas de transmissão de mais de 2000 km, em 500 kV. A interligação dessas duas grandes redes tem sido objeto de vários estudos de estabilidade de tensão, transitória e de frequência, uma vez que qualquer instabilidade nesse trecho afeta, principalmente, a área do sistema Norte-Nordeste, que possui linhas de transmissão bastante extensas. Além disso, algumas dessas

linhas estão sobrecarregadas, como acontece com o sistema de transmissão que alimenta a Ilha de São Luís, a capital do Estado do Maranhão. Os problemas de instabilidade, nessa região, são decorrentes, principalmente, do carregamento das duas linhas de transmissão em 500kV que alimentam a Ilha. Além da grande São Luís, com aproximadamente 200 MW e de alguns consumidores industriais, tais como a VALE (35 MW), essas duas linhas de transmissão em 500 kV alimentam uma das maiores plantas de produção de alumínio e alumina do mundo, a ALUMAR, com uma demanda total de 825 MW.

4.2.1. A ALUMAR no Sistema Interligado Nacional Brasileiro

O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil, denominado Sistema Interligado Nacional (SIN), é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de grandes usinas hidrelétricas e com centenas de agentes geradores, transmissores, distribuidores e consumidores livres, divididos nas regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte do país.

Um dos sistemas interligados que compõe o SIN é o Sistema Norte-Nordeste que se estende por toda a região Nordeste e alcança áreas limítrofes das regiões Norte e Centro-Oeste. A área situada na região Norte compreende a área de atuação da ELETRONORTE, sendo o restante, o Nordeste, área de atuação da CHESF.

Na região Norte, no rio Tocantins, está localizada a maior usina hidrelétrica em funcionamento totalmente brasileira, a Usina de Tucuruí, possuindo, atualmente, 24 turbinas em operação, as quais são capazes de gerar aproximadamente 8 GW. Essa hidrelétrica fornece energia a grandes consumidores industriais, tais como a ALUMAR e a ALBRAS, além de outros consumidores industriais, tais como a VALE e as concessionárias de energia locais.

Conforme mostrado na Figura 4.6, grande parte da energia elétrica fornecida à ALUMAR provém da UHE de Tucuruí em linhas de transmissão de 500 kV e, passando pelas SE's Marabá, Imperatriz, Acailândia e Presidente Dutra, chegando finalmente à subestação da ELETRONORTE chamada São Luís II. Nessa subestação, é realizada a redução do nível de tensão para 230 kV e transmitida para a ALUMAR através de duas linhas de transmissão, chamadas de Circuito 1 (C1) e Circuito 2 (C2).

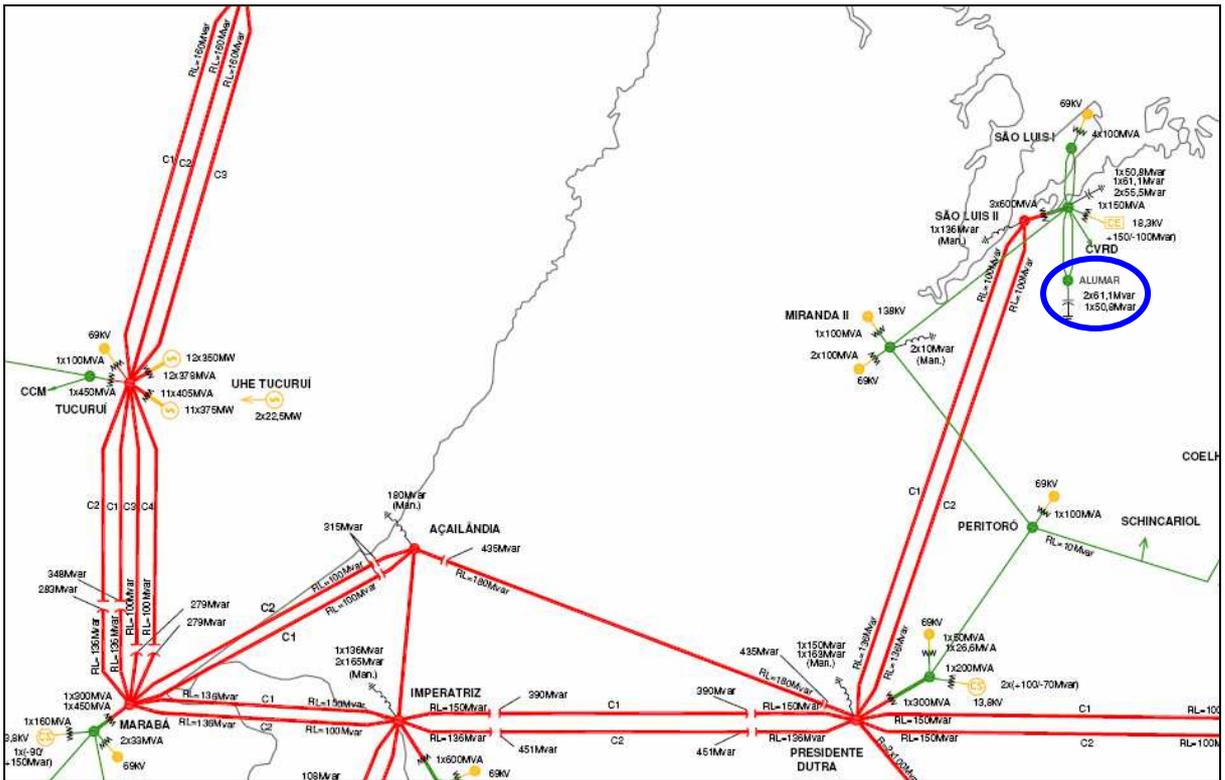


Figura 4.6 – Localização eletro-geográfica da ALUMAR no SIN

4.2.2. Características do sistema elétrico da ALUMAR

A energia elétrica fornecida à ALUMAR provém da subestação São Luís II, conforme comentado anteriormente. No trecho entre a SE São Luís II e a ALUMAR, há uma bifurcação dos dois circuitos, indo dois para a Redução (Linha 1 e 2) e dois para a Refinaria (Linha 4 e 5). As Linhas 1 e 2 vão para a subestação principal da Redução, chamada de SE-112Y, e as Linhas 4 e 5 vão para a subestação principal da Refinaria chamada SE-112X.

A SE-112Y é responsável pelo fornecimento de energia às Linhas de Cubas, aos circuitos auxiliares da Redução e aos seus próprios circuitos auxiliares (iluminação, ventiladores, carregador de baterias, bombas, etc.). Todos os circuitos auxiliares são alimentados por dois transformadores de 50MVA de 230 kV/ 13,8 kV. Na Figura 4.7 é mostrado o diagrama unifilar geral da ALUMAR.

SISTEMA DE FORÇA ALUMAR

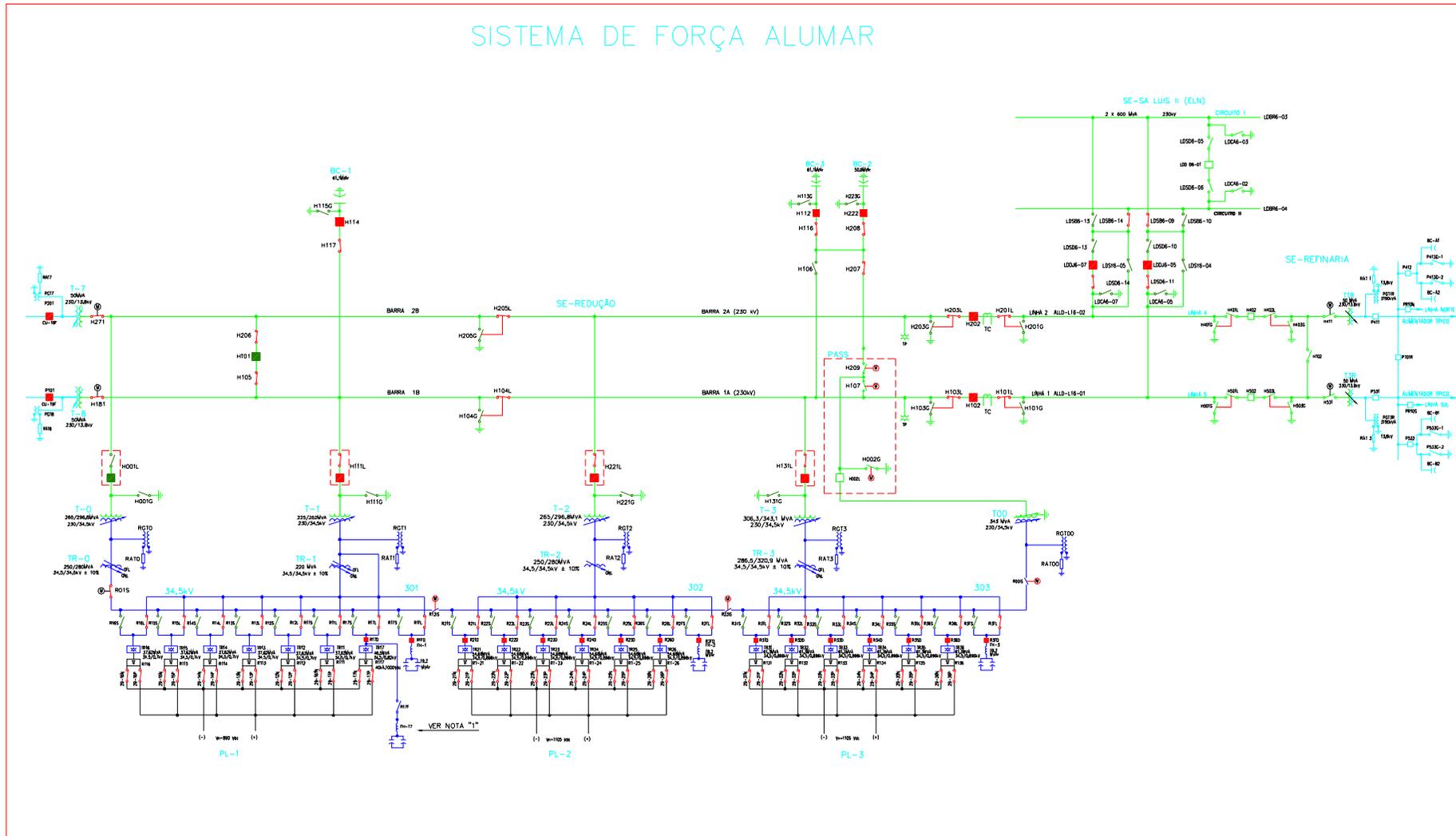


Figura 4.7 – Diagrama unifilar do sistema elétrico da ALUMAR

As Linhas de Cubas são as principais cargas da indústria, correspondendo a aproximadamente 92% do consumo total. Como já citado anteriormente, o processo de eletrólise necessita de corrente contínua e como o fornecimento para a ALUMAR é em corrente alternada, é necessário fazer o rebaixamento, regulagem e retificação. Para cada Linha de Cubas existe um transformador abaixador de 230kV para 34,5kV, com potências variando de 225 MVA até 343 MVA. Normalmente, as Linhas de Cubas 1, 2 e 3 são alimentadas pelos transformadores T1, T2 e T3, respectivamente. Entretanto, no caso de uma eventual falha ou necessidade de manutenção em um deles, um dos dois transformadores reservas (T0 e T00) passa a substituí-los. Os transformadores T1 e T3 estão conectados à Linha 1 de 230kV e o transformadores T2 e o T0 estão conectados à Linha 2. O T00 é uma exceção, pois possui um sistema que permite sua alimentação ou pela Linha 1 ou pela Linha 2. Conectados em série com cada transformador abaixador, os transformadores reguladores (TR) de 34,5 kV / 34,5 kV \pm 10% têm a função de controlar a tensão e a corrente na Linha de Cubas. Após o rebaixamento e a regulagem, é feita a retificação através de 6 pontes retificadoras de 6 pulsos com capacidade de corrente de 38kA, 45kA e 48kA, dependendo da Linha de Cubas, conectadas em paralelo de forma a garantir uma menor corrente circulando em cada ponte. Na Figura 4.8, tem-se o diagrama unifilar do sistema de alimentação da Linha de Cubas 2.

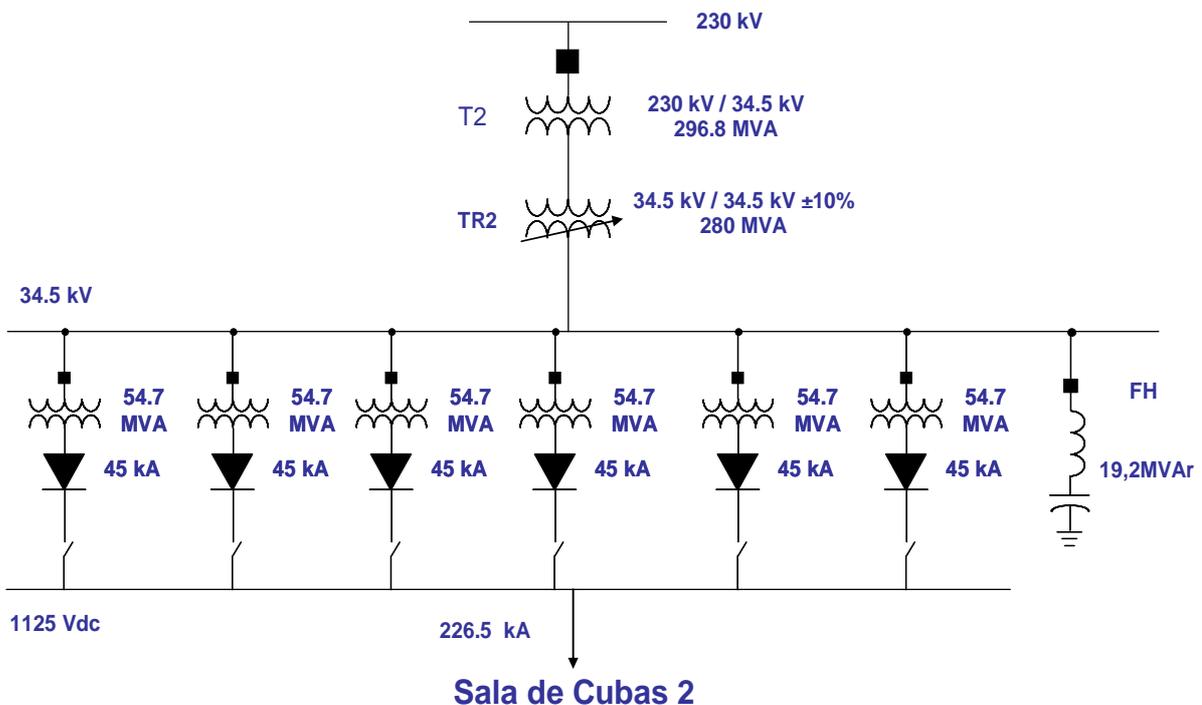


Figura 4.8 - Sistema elétrico da Linha de Cubas 2

As unidades retificadoras utilizam transformadores com conexões especiais (Zig-Zag ou delta expandido) para fornecer diferentes defasagens o que resulta em um cancelamento harmônico de corrente no primário. Além disso, paralelo aos retificadores, existe um filtro de harmônicos de 19,2 MVAR sintonizado para a 5ª ordem, cuja função é melhorar o fator de potência além da sua principal função.

Para regulação do nível de tensão nas barras da ALUMAR e de algumas SE's da área do Maranhão, estão instalados na SE-112Y três bancos de capacitores em 230kV. Cada um deles solidário a uma Linha de Cubas, sendo o BC-1 e BC-3 conectados ao Circuito 1 e o BC-2, conectado ao Circuito 2. Existe ainda, na barra de 230 kV da SE São Luís II, mais dois bancos.

A alimentação elétrica da Refinaria é feita através da subestação SE-112X que, por sua vez, alimenta cubículos de 13,8 kV, fornecendo, assim, energia elétrica aos transformadores das subestações de unitárias da Refinaria, Porto e Retroporto. Para correção do fator de potência da Refinaria, estão instalados, na barra de 13,8 kV, dois bancos de capacitores, totalizando 24 MVAR.

4.3. Modelagem do consumidor industrial ALUMAR

Em virtude da grande demanda e da localização da ALUMAR no Sistema Interligado Nacional, torna-se necessário modelar suas cargas com bastante precisão, nos estudos que envolvem o sistema elétrico Norte-Nordeste. Além disso, a necessidade de realização de simulações mais detalhadas, principalmente para os casos de defeitos internos à indústria, tornou-se necessário implementar melhorias em alguns aspectos ainda deficientes na modelagem disponível no arquivo de dados disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema. Esse modelo foi proposto em 1999, sendo que, ao longo dos anos, a indústria sofreu várias modificações tais como mudança de parâmetros de processo e algumas expansões.

4.3.1. Modelo da ALUMAR anterior

A atual modelagem da ALUMAR, disponibilizada pelo ONS para os programas ANAREDE e ANATEM, fornece uma representação do sistema CC das Linhas de Cubas baseada em modelos de conversores CA-CC para transmissão em corrente contínua, sendo modelado tanto o comportamento estático quanto o dinâmico das cubas.

As cubas são ligadas em série, conforme citado anteriormente, a fim de garantir a mesma corrente em todas elas. Sendo assim, a tensão na saída das pontes retificadoras

deve ser suficiente para garantir a tensão necessária em cada cuba. O comportamento dinâmico de cada cuba é basicamente representado por um circuito RL em série e por uma fonte de tensão constante. A resistência corresponde à dissipação de energia durante o processo de redução do alumínio, a indutância é responsável (junto com a resistência) pela constante de tempo de decaimento da corrente CC, quando a cuba é desenergizada, e a fonte de tensão representa a tensão residual (V_{res}), após a interrupção de corrente pelos diodos (chamado efeito “pilha” decorrente do processo de eletrólise). O modelo equivalente para toda a Linha de Cubas é mostrado na Figura 4.9.

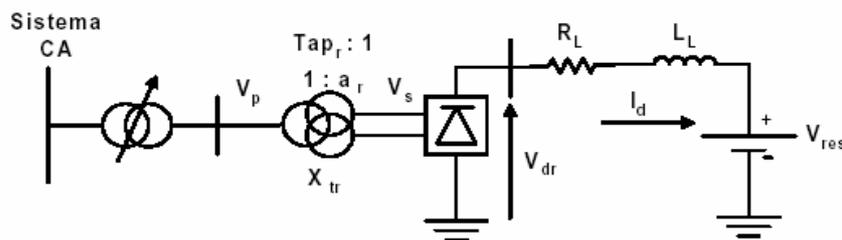


Figura 4.9 - Modelo equivalente de uma Linha de Cubas

A tensão residual total é sempre constante, independentemente do ponto de operação em carga, variando somente com o número de células conectadas em cada Linha de Cubas.

Como os modelos de elo CC disponíveis nos programas ANAREDE e ANATEM foram desenvolvidos para transmissão em corrente contínua, é exigido que cada sistema CC tenha pelo menos um retificador e um inversor. Desta forma, foi utilizado um inversor para representar a tensão residual existente em cada Linha de Cubas. Foi necessário, também, criar uma barra CA “swing” para o sistema CA dos inversores fictícios (barra 8004). Os inversores foram colocados no fluxo de potência, controlando a tensão CC no terminal inversor no valor da tensão residual. Na Figura 4.10, mostra-se o modelo do sistema CC de uma Linha de Cubas.

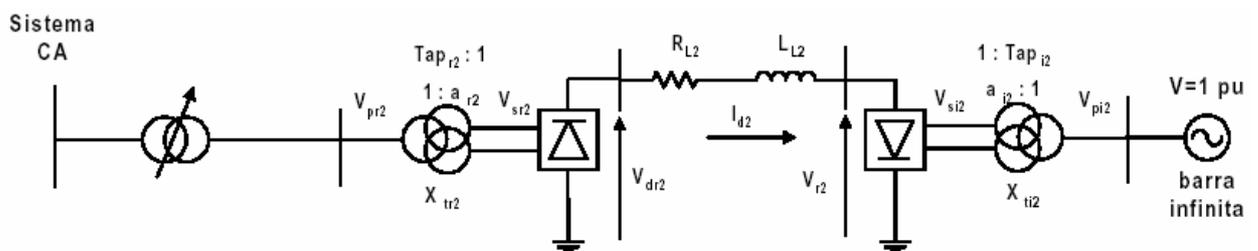


Figura 4.10 - Modelo equivalente de uma Linha de Cubas no programa

O sistema CA foi modelado considerando várias simplificações, principalmente, nas linhas de transmissão entre a SE São Luís II e a ALUMAR. As barras de São Luís II 230 kV e ALUMAR 230 kV são eletricamente muito próximas e, portanto, foram representadas por uma única barra (5551). Assim, os bancos de capacitores presentes nas duas barras mencionadas foram somados e colocados como um “shunt” total na barra 5551. Foram criadas, no sistema CA, as barras de 34,5 kV de números 8001, 8002 e 8003, além da barra fictícia 8004. Nas barras 8001, 8002 e 8003, foram colocados os filtros de harmônicos (19,2 MVar para cada linha de cubas, na tensão de 1,0 pu). A Refinaria e os circuitos auxiliares da Redução foram modelados como potência constante, ou seja, com P e Q fixos.

Na Figura 4.11 mostra-se o diagrama unifilar do modelo da ALUMAR tal como foi proposto pelo CEPEL.

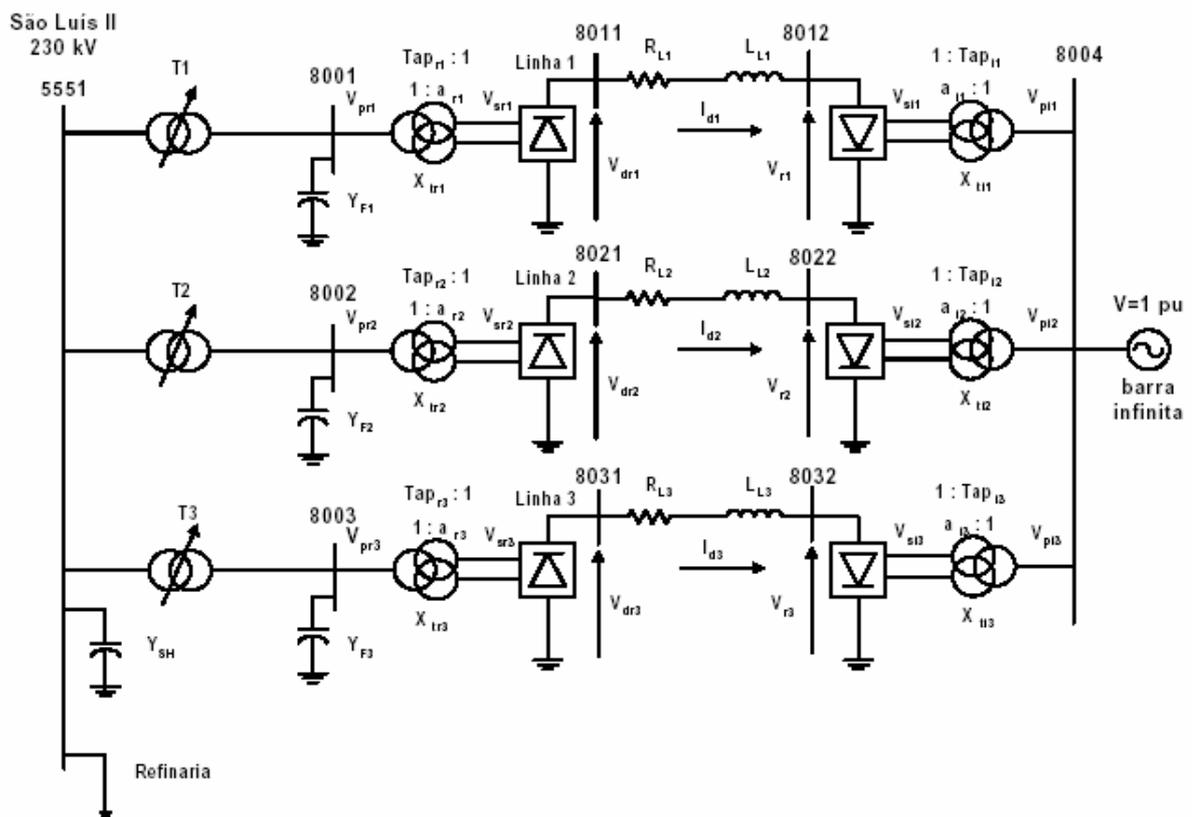


Figura 4.11 - Modelo equivalente do sistema elétrico da ALUMAR proposto pelo CEPEL

4.3.2. Modelo da ALUMAR proposto

As melhorias consistiram, basicamente, em modelar com mais detalhes o sistema de transmissão entre a ELETRONORTE e a ALUMAR e inserir um modelo mais adequado à Refinaria e aos circuitos auxiliares da Redução. No sistema CC, não houve

alterações na arquitetura do sistema, no entanto, foi necessário atualizar vários parâmetros de processo, tais como: corrente CC nas Linhas de Cubas, tensão especificada nos barramentos, resistência dos elos CC, cargas na barras, etc.

No sistema de transmissão, embora as barras da SE São Luís II e ALUMAR sejam eletricamente muito próximas, foi criado mais duas barras (8100 e 8200), separando os circuitos que alimentam cada Linha de Cubas. O Circuito 1 foi modelado como a barra 8100 e o Circuito 2 como a barra 8200. Os bancos de capacitores foram separados, de acordo com a potência em cada barra. Sendo assim, foram conectados a essas barras os circuitos das Linhas de Cubas, conforme mostrado na Figura 4.12.

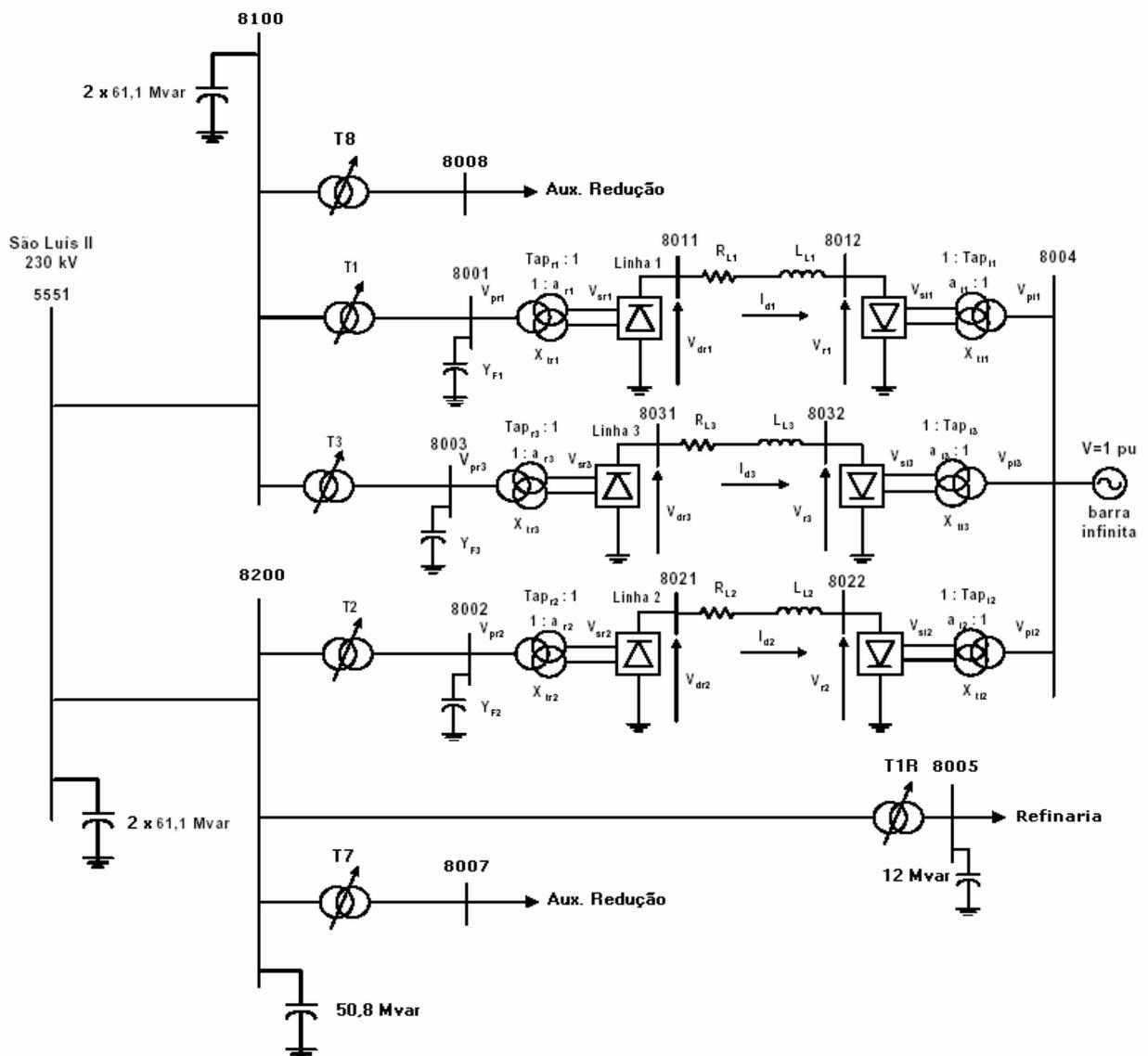


Figura 4.12 - Modelo equivalente proposto para o sistema elétrico da ALUMAR

A carga da Refinaria e dos circuitos auxiliares da Redução é constituída, na sua grande maioria, por motores de indução com potências elevadas. Logo, a modelagem

utilizada para a Refinaria e para os circuitos auxiliares da Redução foi representada por cargas tipo motores de indução, e não como modelos de potência constantes. Esse modelamento é de essencial importância na análise do comportamento do sistema, uma vez que os motores de indução apresentam alto consumo de potência reativa durante as condições em que há queda de tensão e, portanto, merecem cuidadosa consideração nos estudos de estabilidade, principalmente, quando parcelas significativas deste tipo de carga estão presentes em áreas críticas.

Em virtude da grande quantidade e diversidade de motores de indução na área da Refinaria e dos circuitos auxiliares da Redução, não foi possível modelá-los individualmente. Para garantir uma modelagem mais precisa, foram realizadas algumas medições em campo, avaliados os diagramas unifilares, pesquisados os dados de placa dos principais motores e comparados com dados da literatura disponível sobre o tema (KUNDUR, 2000; SILVA, 2006). De posse desse levantamento, foram inseridos os dados nos modelos disponíveis na biblioteca do ANATEM.

Durante simulações com os dados da modelagem anterior, foi observado que os valores de correntes nos elos CC e de potência em cada Linha de Cubas estavam incoerentes com os valores reais. Ao avaliar todos os dados da modelagem, foi verificado que os principais parâmetros tiveram que ser modificados. Primeiramente, foram feitas várias medições em situações normais de operação para avaliar os dados. Os parâmetros medidos são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1
Parâmetros CC das Linhas de Cubas

	Linha de Cubas 1		Linha de Cubas 2		Linha de Cubas 3	
	Anterior	Medido	Anterior	Medido	Anterior	Medido
Número de cubas	204	204	250	250	156	256
Correntes CC (kA)	216,4	230	217	230	218	230
Tensão CC (V)	918	918	1125	1125	700	1152
Tensão por cuba (V)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Potência (MW)	201	216	245	265	153	271

Através de ensaios de desligamentos foi determinada a tensão residual por cuba v_r e a indutância por cuba L_l , sendo encontrados os seguintes valores:

$$v_r = 1,44V / cuba$$

$$L_l = 4,964\mu H / cuba$$

A partir desses dados e das equações 4.1 a 4.4, pode-se calcular a resistência total (R_L), a indutância total (L_L), a constante de tempo (τ_L) e a tensão residual total (V_r) para cada linha de cubas, cujos resultados são dados na Tabela 4.2:

$$V_r = n_c \cdot v_r \quad (4.1)$$

$$R_L = \frac{V_d - V_r}{I_d} \quad (4.2)$$

$$L_L = n_c \cdot L_l \quad (4.3)$$

$$\tau_L = \frac{L_L}{R_L} \quad (4.4)$$

Tabela 4.2
Parâmetros CC das Linhas de Cubas

Linha de Cubas	V_r (V)	R_L (Ω)	L_L (mH)	τ_L (ms)
1	293,8	0,002714	1,0127	373
2	360,0	0,003326	1,2410	373
3	293,8	0,003406	1,2708	373

Logo, a tensão no primário do transformador do conversor pode ser calculada pela equação 4.6, onde a_r é a relação de transformação e α_r o ângulo de defasagem. Os parâmetros são dados na Tabela 4.3.

$$V_{pr} = \frac{V_r + I_d \left(R_L + \frac{3}{\pi} X'_{tr} \right)}{\frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_r \cos \alpha_r} \quad (4.6)$$

Tabela 4.3
Parâmetros CA das Linhas de Cubas

Linha de Cubas	V_{pr} (kV)	V_{pr} (pu)
1	34,52	1,001
2	33,12	0,960
3	33,89	0,982

De posse de todos esses dados, foram modificados os arquivos do ANAREDE e ANATEM. Os resultados poderão ser vistos nas seções posteriores.

4.3.3. Validação do Modelo Proposto

A partir desses dados, foram modificados os arquivos do ANAREDE e ANATEM. Todas essas melhorias foram apresentadas à Diretoria de Planejamento e Programação da Operação e Gerência de Estudos Especiais, Proteção e Controle do ONS em reunião na sede do Rio de Janeiro, no final do mês de março de 2006. Todas as melhorias foram validadas e aprovadas e já estão disponíveis na nova revisão dos arquivos de dados disponibilizados pelo ONS.

Em estudos envolvendo o SIN, a fim de evitar problemas de convergência, devido à grande quantidade de barras do SIN, o ONS irá adotar o modelo proposto sem as alterações na arquitetura do sistema. Para estudos que necessitem de mais precisão ou estudos envolvendo diretamente o consumidor ALUMAR, será adotado o modelo com a nova arquitetura. Os resultados comparativos apresentados durante a validação serão apresentados a seguir.

Primeiramente, simularam-se os dois casos em regime permanente através do ANAREDE. A comparação dos resultados obtidos com valores medidos em campo é apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4
Comparação dos valores de tensão

Grandeza	Barra	Anterior	Proposto	Medido
V_{CA} São Luís II	5551	1,021	1,022	1,021
V_{CA} Redução C1	8100	-	1,022	1,022
V_{CA} Redução C2	8200	-	1,022	1,022
V_{CA} Auxiliar Red T7	8007	-	1,022	1,022
V_{CA} Auxiliar Red T7	8008	-	1,022	1,022
V_{CC} Linha de Cubas 1	8001	1,027	1,001	1,001
V_{CC} Linha de Cubas 2	8002	0,971	0,961	0,960
V_{CC} Linha de Cubas 3	8003	0,651	0,983	0,982
V_{CA} Refinaria	8005	-	1,022	1,022

Como se pode observar existem diferenças entre os três resultados, sendo que o modelo proposto apresentou resultados muito mais aproximados dos medidos em campo. As diferenças entre os resultados do modelo anterior e o proposto devem-se, principalmente, à modificação nos parâmetros CC das Linhas de Cubas, uma vez que as tensões e correntes aumentaram. Os dados de algumas barras não puderam ser comparados uma vez que o modelo anterior é simplificado.

Em seguida, foram feitas algumas simulações em regime transitório através do programa ANATEM. O caso escolhido foi a saída de um dos dois circuitos de 500 kV

entre as SE's de Presidente Dutra e São Luís II. Na Figura 4.13, tem-se o comportamento dinâmico da tensão no barramento São Luís II.

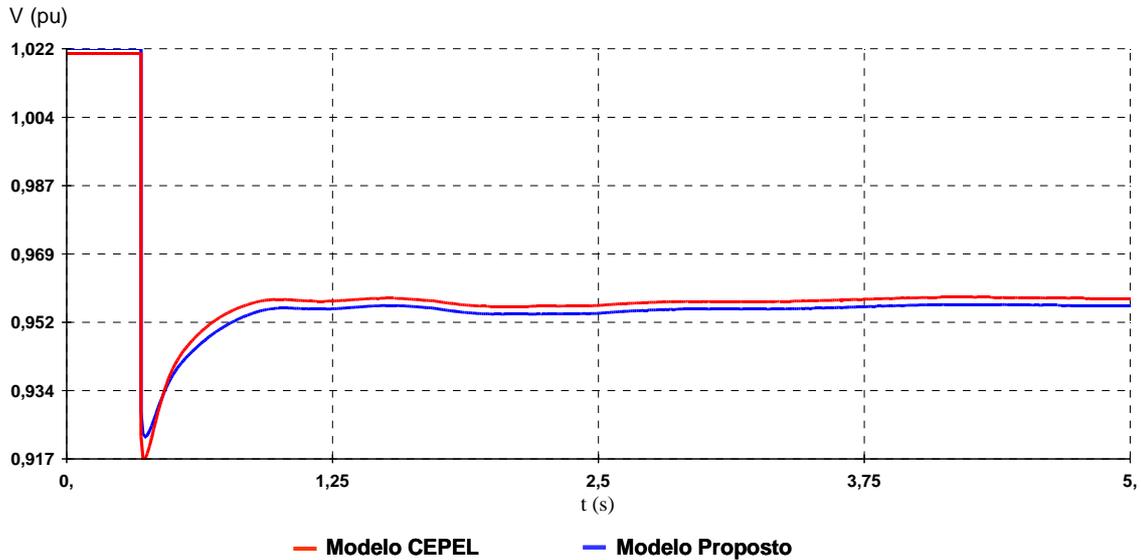


Figura 4.13 - Tensão em São Luís II – 230 kV (Barra 5551)

Nesse caso mostrado na Figura 4.13, observou-se uma pequena diferença entre os resultados dos dois modelos, sendo que, durante o transitório, o perfil de tensão para o modelo anterior atingiu valores menores do que o modelo proposto. No entanto, após o transitório, a tensão para o modelo anterior estabilizou-se com valores mais elevados que os do modelo proposto. Essas diferenças são ocasionadas pela contribuição da potência reativa dos motores de indução durante o transitório e, também, pela redução do valor do banco de capacitores *shunt* instalado na barra, uma vez que, no modelo anterior, todos os bancos foram conectados nessa barra e, no modelo proposto, foram distribuídos os bancos em cada barra de acordo com o físico. O mesmo comportamento ocorreu nas barras dos Circuitos 1 e 2 da Redução e a de alimentação da Refinaria, conforme as Figuras 4.14 e 4.15.

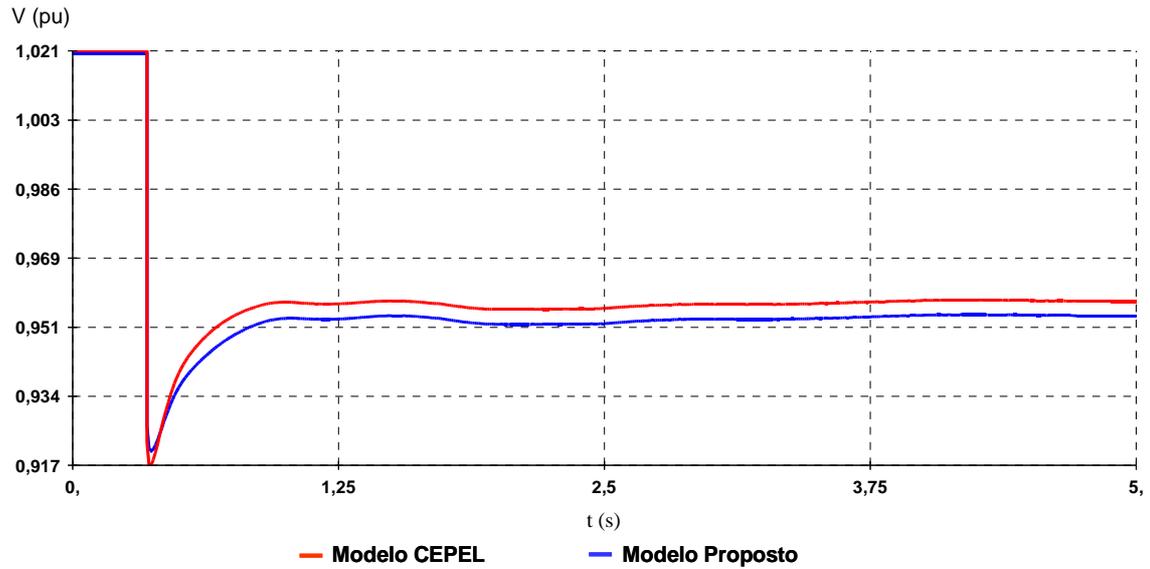


Figura 4.14 - Tensão do Circuito 1 (Barras 5551 e 8100)

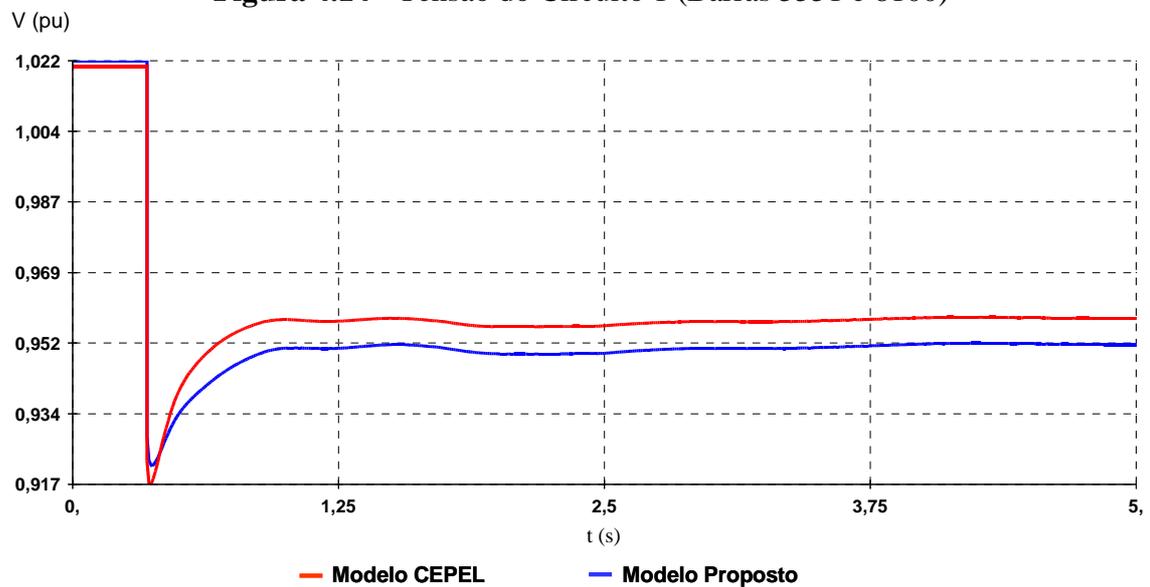


Figura 4.15 - Tensão na Refinaria (Barra 8005)

Nas barras de alimentação das Linhas de Cubas e no sistema CC, houve também diferenças entre os dois modelos. Nesse caso, o comportamento da tensão manteve-se, uma vez que a modelagem não foi modificada, no entanto observou-se uma grande diferença entre os níveis de tensão, ocasionada pela modificação dos parâmetros CC das três Linhas de Cubas. Nas Figuras 4.16 a 4.21 são mostradas as simulações do comportamento dinâmico da tensão CA e CC das Linhas de Cubas 1, 2 e 3.

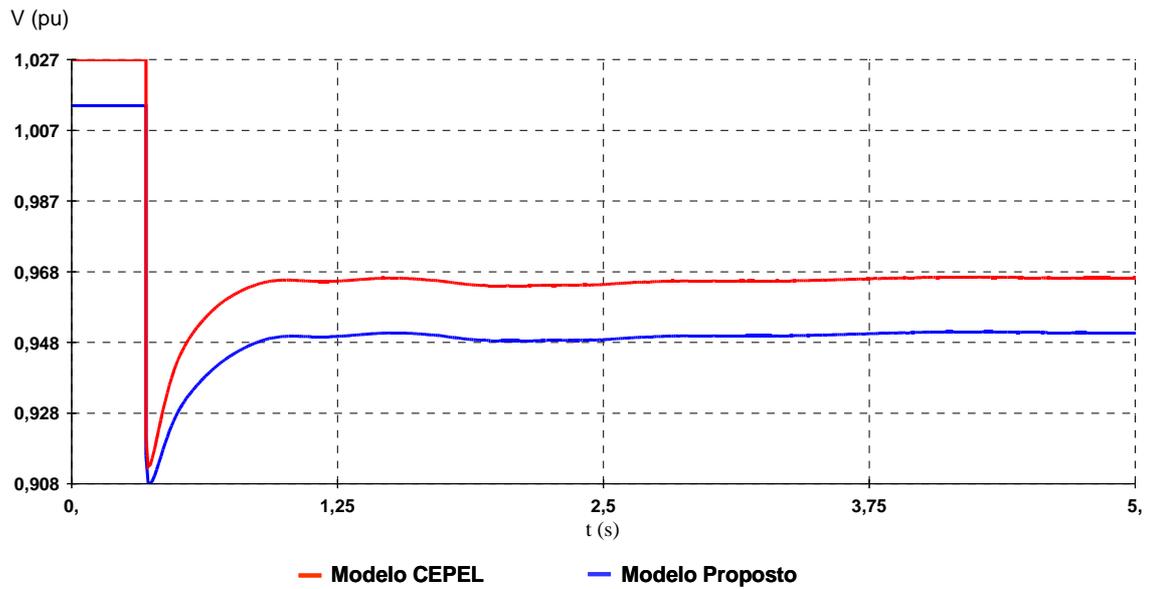


Figura 4.16 - Tensão CA da Linha de Cubas 1 (Barra 8001)

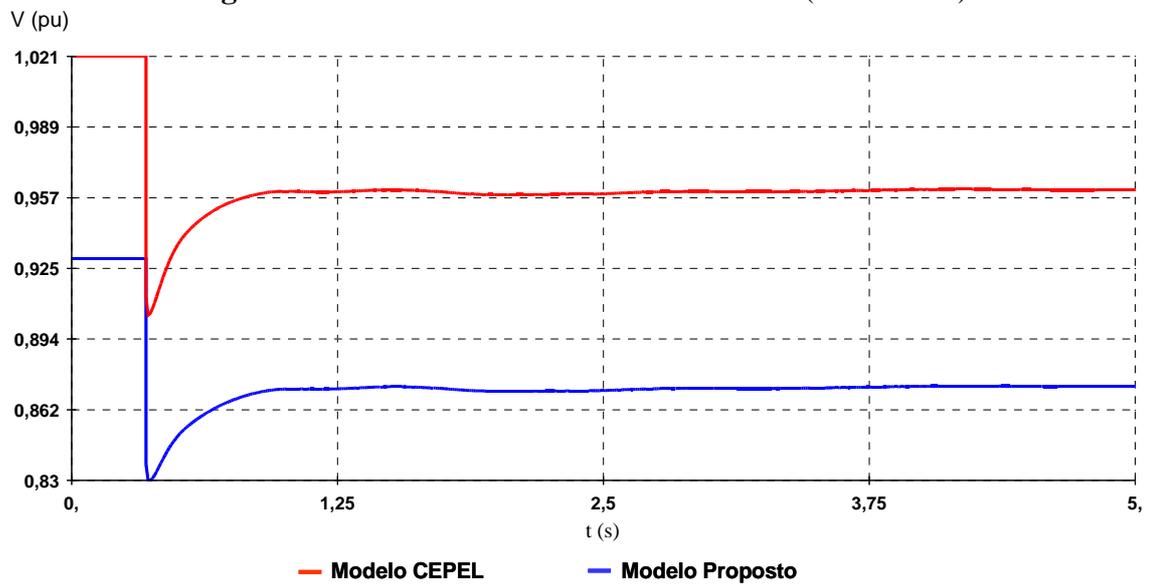


Figura 4.17 - Tensão CC da Linha de Cubas 1 (Barra 8011)

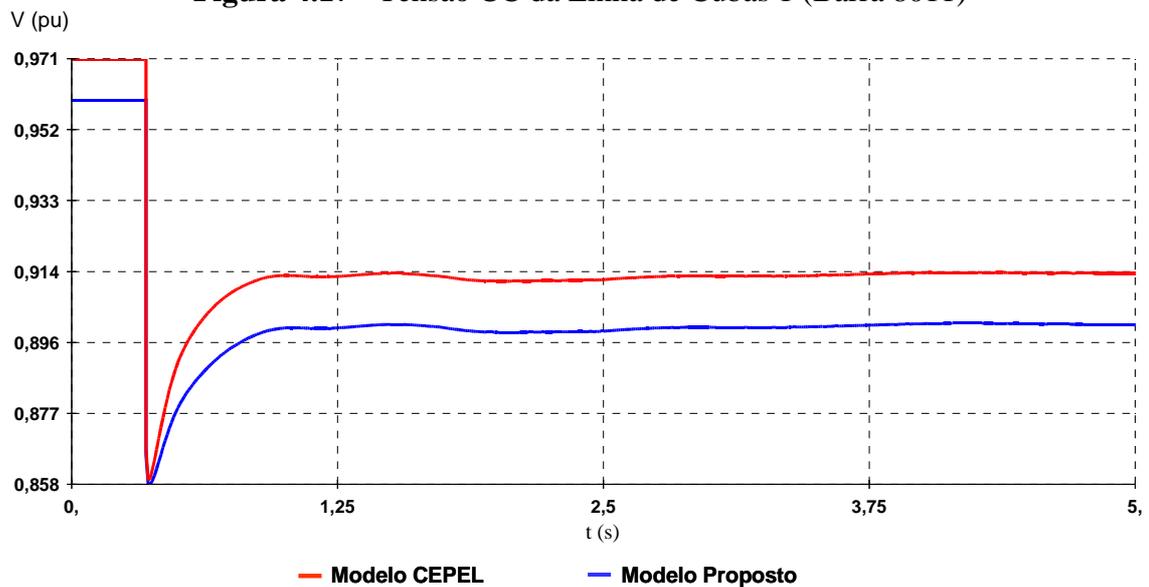


Figura 4.18 - Tensão CA da Linha de Cubas 2 (Barra 8002)

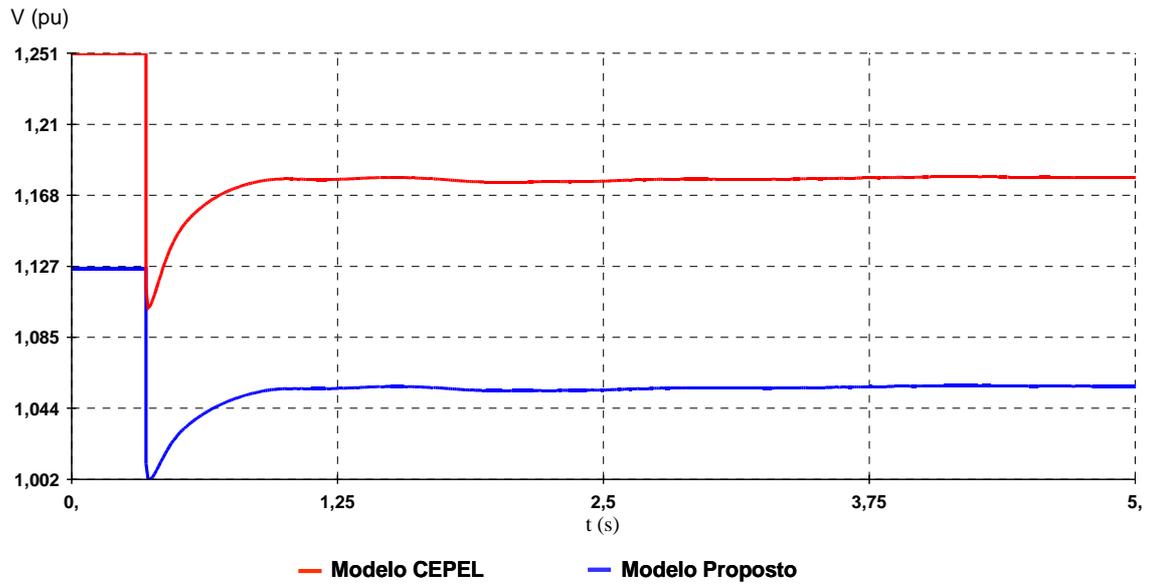


Figura 4.19 - Tensão CC da Linha de Cubas 2 (Barra 8021)

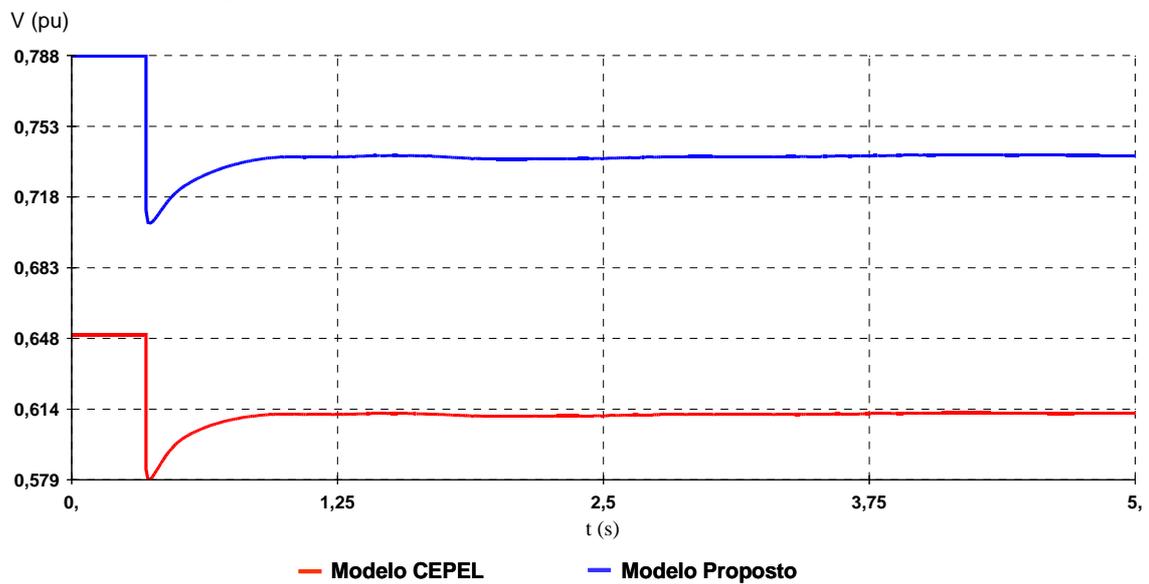


Figura 4.20 - Tensão CA da Linha de Cubas 3 (Barra 8003)

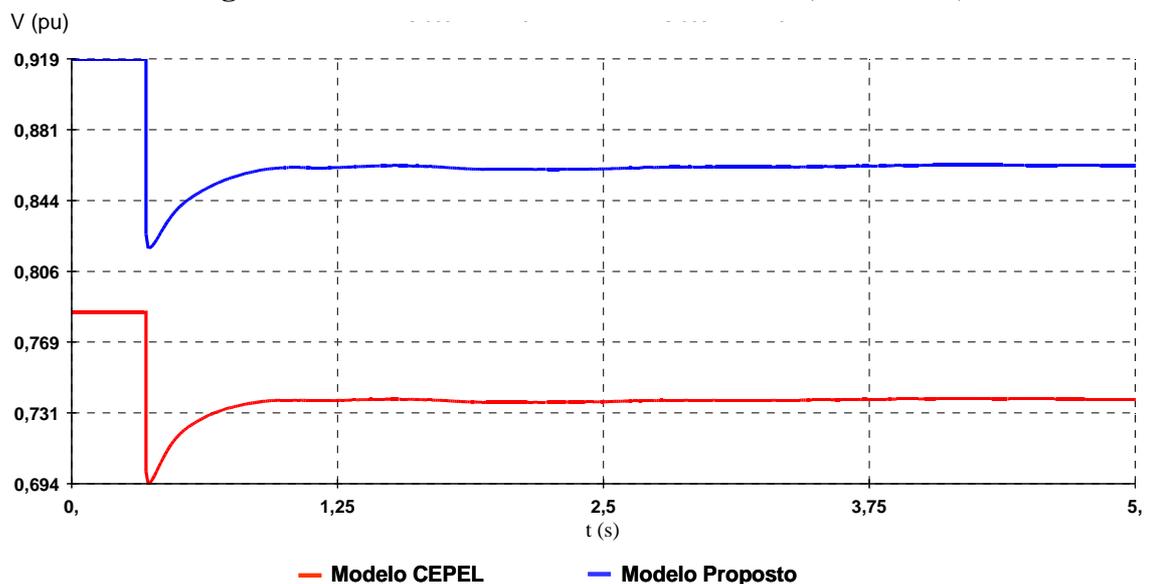


Figura 4.21 - Tensão CC da Linha de Cubas 3 (Barra 8031)

Para a Linha de Cubas 3, essa diferença foi mais acentuada que das outras duas Linhas de Cubas, conforme Figuras 4.20 e 4.21. Tal diferença deve-se à ampliação da Linha de Cubas 3 que acrescentou 100 cubas, aumentando a tensão CC e, conseqüentemente, a tensão CA, além de apresentar significativa variação no valor da resistência e reatância indutiva dessas cubas.

Identificou-se ainda, o perfil de tensão nas SE's de Presidente Dutra (5580) e Imperatriz (5590). Nessas duas subestações, também, houve diferenças entre os dois modelos, conforme mostrado na Figura 4.22.

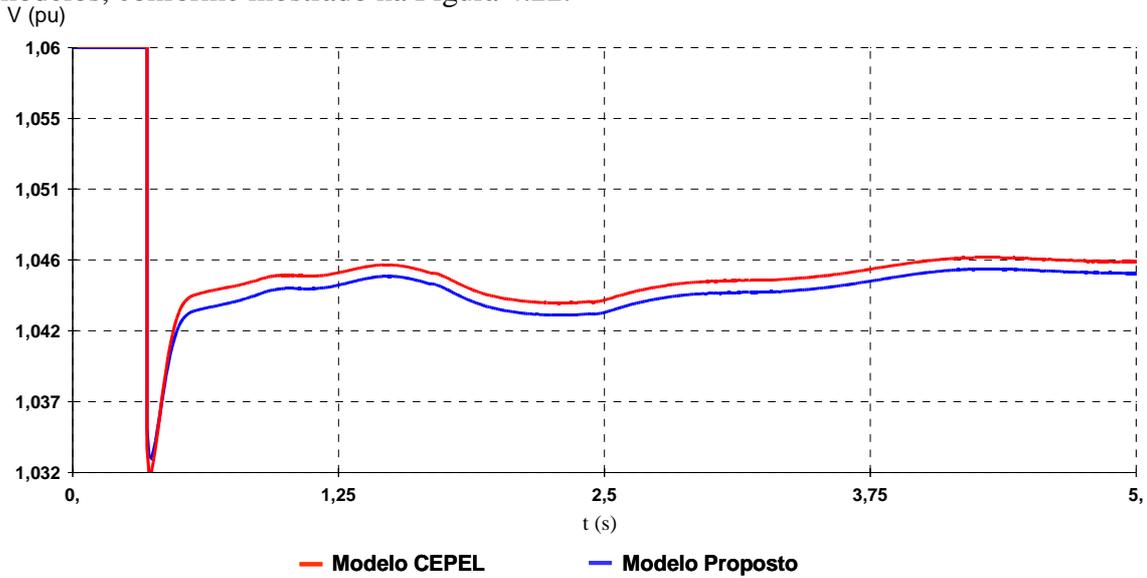


Figura 4.22 - Tensão em Presidente Dutra (Barra 5580)

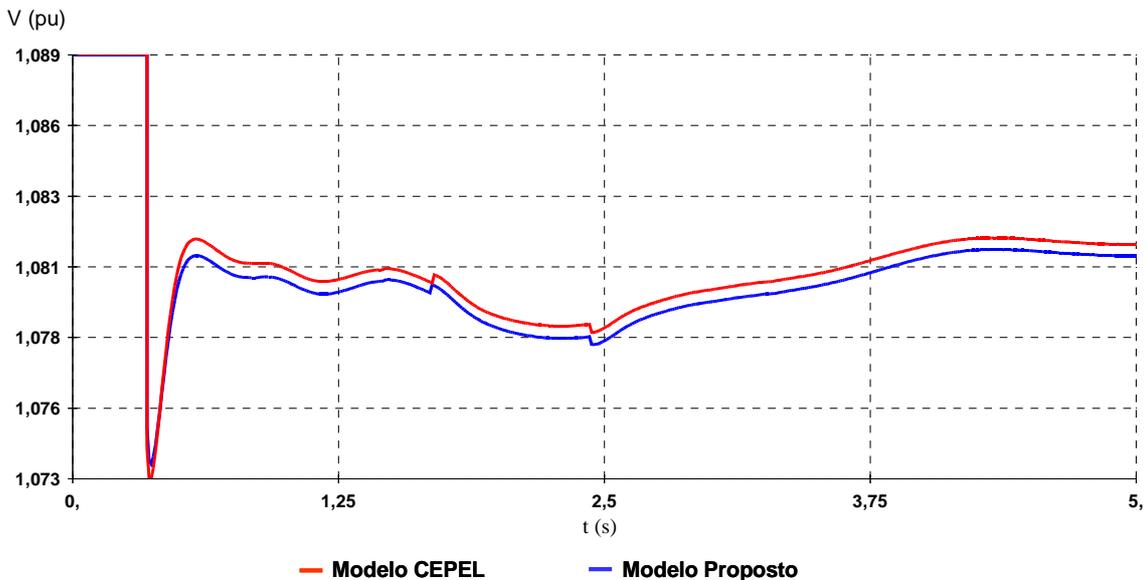


Figura 4.23 - Tensão em Imperatriz (Barra 5590)

Em todos os gráficos mostrados, nesta seção foram observadas diferenças consideráveis entre os resultados do modelo anterior e o modelo proposto. Em algumas barras, foi possível monitorar e comparar esses resultados com valores medidos em campo

sendo constatado que os resultados do modelo proposto estão mais aproximados que os do modelo anterior.

4.4. Cogeração na ALUMAR

Conforme já foi evidenciado, anteriormente, em vários processos internos da cadeia de produção de alumina, é necessário utilizar vapor para que a alumina seja extraída da bauxita. A demanda de vapor para o processo da Refinaria é atendida por três caldeiras, queimando carvão mineral, com capacidade total para gerar 210 ton/h de vapor a 1760 kpa a uma temperatura de aproximadamente 235°C.

A Refinaria da ALUMAR, atualmente, produz 1,5 milhões de toneladas de alumina por ano. Como o mercado mundial de alumina está em crescimento, a ALUMAR decidiu expandir essa área da indústria, a qual irá produzir, anualmente, 2,7 milhões de toneladas de alumina. Para atingir esse novo patamar de produção, será necessário instalar mais 2 caldeiras para gerar vapor ao processo. Assim é que, durante a etapa do Projeto de Expansão da Refinaria, foi realizado um estudo de viabilidade econômica para instalar avaliar a instalação de cogeração em duas novas caldeiras.

Os estudos concluíram que seria viável cogerar energia elétrica através de caldeiras com cogeração térmica, à carvão mineral, para suprir a demanda de energia elétrica de 70MW e atender à demanda de vapor de 450 ton/h a 1822 kPa, a uma temperatura de aproximadamente 235°C. Além de reduzir o custo de produção, o novo projeto viria minimizar as perdas ocasionadas por oscilações no SIN.

4.4.1. Aspectos técnicos

Após conclusão dos estudos de viabilidade econômica, foi iniciado o projeto para instalar os cogeradores. Realizados os estudos elétricos prévios, foi definida a potência dos referidos equipamentos. Por razões de estabilidade, confiabilidade e disponibilidade do fornecedor, ficou decidido que seriam instalados dois cogeradores de 47 MVA conectados ao barramento de 13,8kV da subestação principal.

Além dos estudos para definição da potência das máquinas, vários levantamentos foram realizados, nessa etapa, para definir a configuração a ser implementada. Na Figura 4.24, é mostrada a configuração inicial do projeto para o sistema elétrico da Refinaria.

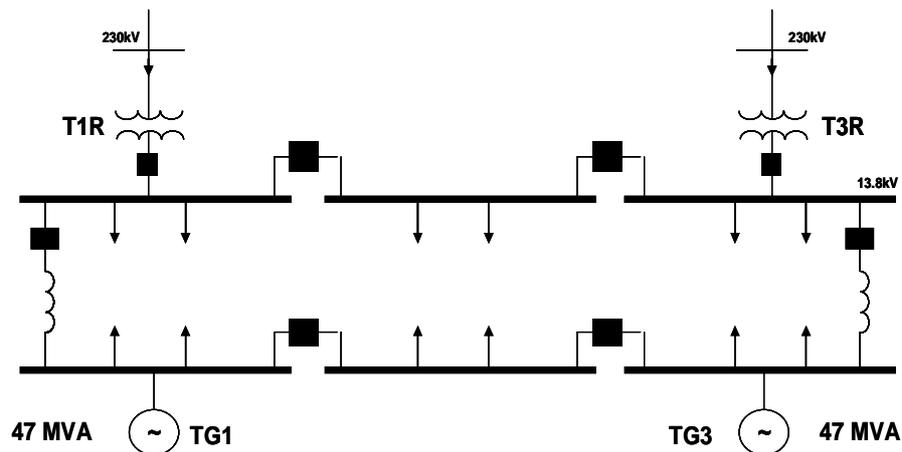


Figura 4.24 - Configuração inicial do sistema elétrico da Refinaria da ALUMAR

Definida a potência dos geradores e a configuração inicial do projeto, novos estudos foram realizados, tais como fluxo de potência e curto-circuito. Nesses estudos, foi verificado que essa configuração possuía algumas desvantagens, tais como elevado nível de curto-circuito nas barras de 13,8kV, em torno de 67 kA e restrições operacionais durante algumas etapas de transição do antigo sistema para o novo sistema. Para reduzir o nível de curto-circuito nessas barras, seria necessário instalar reatores limitadores de corrente. O problema dessa alternativa são as perdas inseridas no sistema, além da necessidade de grandes espaços requeridos no interior da subestação. A alternativa técnica encontrada foi a utilização de um sistema do fabricante ABB denominado *ISLimiter*. Tecnicamente, a alternativa atendia, no entanto apresentava desvantagens como custo de manutenção e confiabilidade, fazendo com que essa alternativa fosse descartada.

Diante desse problema, a equipe de engenharia do projeto teve que elaborar uma nova configuração do sistema elétrico da Refinaria. Após alguns meses, chegou-se a uma configuração adequada, na qual foi utilizado um barramento de sincronismo, conforme demonstra o diagrama da Figura 4.25.

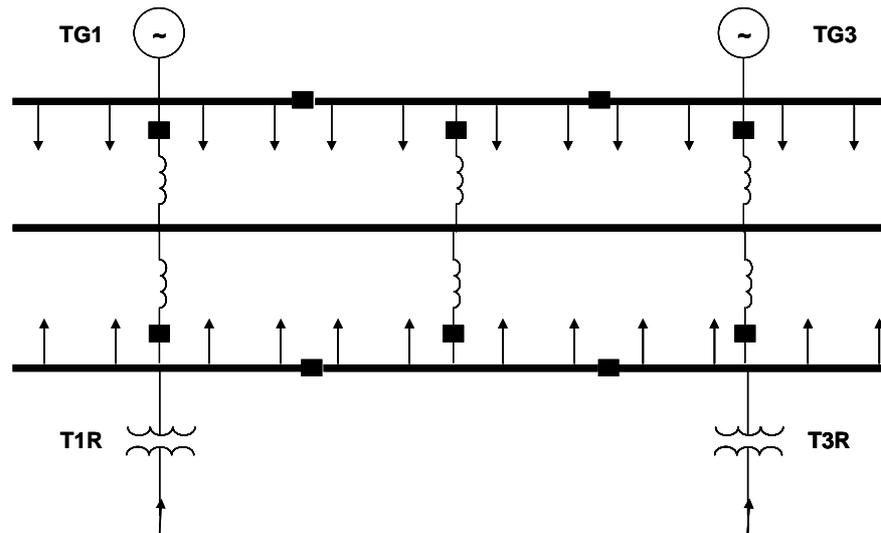


Figura 4.25 - Configuração do sistema elétrico da Refinaria da ALUMAR

A nova configuração apresenta algumas vantagens em relação à configuração inicial, como a redução do nível de curto-circuito para 40kA e, conseqüentemente, a redução dos reatores necessários. Embora a quantidade de reatores tenha aumentado, o valor da indutância pode ser reduzida consideravelmente, diminuindo, substancialmente, as perdas. Além disso, essa nova configuração, aumenta a flexibilidade operacional, sem que haja nenhuma restrição operacional durante o período de transição, possibilitando, desse modo, ampliações futuras.

Na Figura 4.26 mostra-se o diagrama unifilar simplificado de todo o sistema elétrico da ALUMAR com a cogeração.

4.4.2. Modelagem dos geradores síncronos

Serão instalados na ALUMAR dois turbo-geradores do fabricante SIEMENS, sendo cada um de 47 MVA, modelo SGen6-100A-4P 120-22, cujos dados técnicos são mostrados na tabela 4.5.

Tabela 4.5
Dados técnicos dos turbo-geradores

Potência	47 MVA
Tensão	13,8 kV
ΔV	$\pm 5\%$
Cos \emptyset	0,80
Xd	206 %
Xq	96 %
X'd	23,2 %
X''d	17,9 %
Xt	11,9 %
T'd	9,365 s
T''d	0,030 s

A partir da folha de dados fornecida pelo fabricante, foi obtida a curva de saturação, que é mostrada na Figura 4.27:

$$\Psi_l = A_{SAT} \cdot e^{B_{SAT}(\Psi_{at} - \Psi_{fl})} \quad (4.7)$$

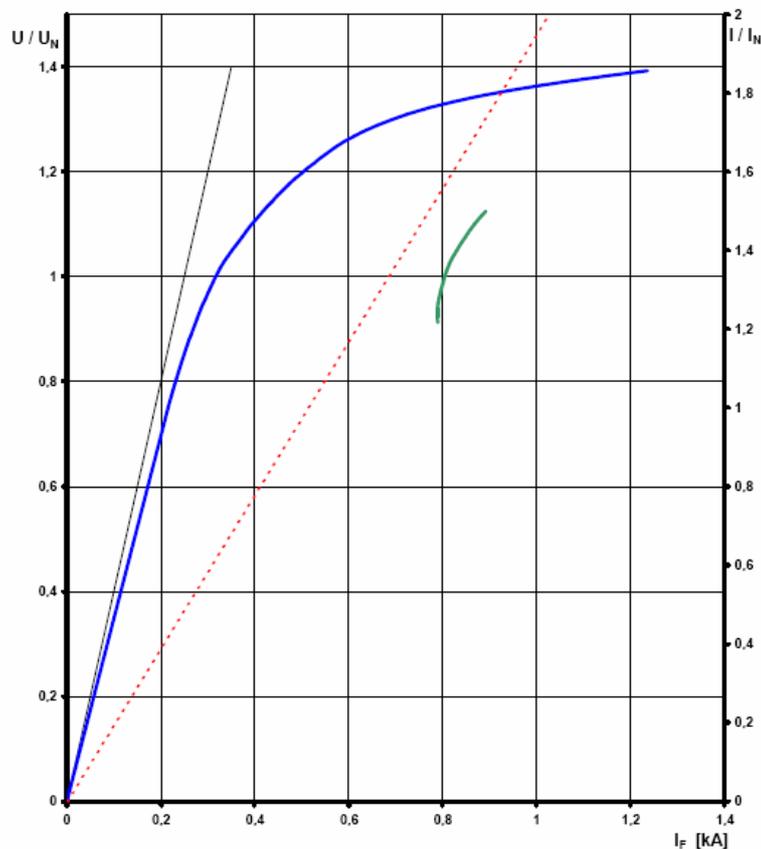


Figura 4.27 – Curva de saturação dos geradores da ALUMAR

A partir do gráfico da Figura 4.27, pôde-se obter os coeficientes A_{sat} e B_{sat} . Calculando a equação para dois pontos da curva, tem-se:

$$y - y_0 = m(x - x_0) \rightarrow 0,8 = m \cdot 0,22 \rightarrow m = 4 \Rightarrow y = 4 \cdot x \quad (4.7)$$

Logo:

$$\Psi_{at1} = 1,2 \rightarrow \Psi_1 = 4 \cdot 0,5 - 1,2 = 0,8 \quad (4.8)$$

$$\Psi_{at2} = 1,3 \rightarrow \Psi_1 = 4 \cdot 0,7 - 1,3 = 1,5 \quad (4.9)$$

Substituindo os valores obtidos nas equações 4.8 e 4.9 na equação 4.7, tem-se:

$$\begin{cases} 0,8 = A_{SAT} \cdot e^{B_{SAT}(1,2-0,8)} \\ 1,5 = A_{SAT} \cdot e^{B_{SAT}(1,3-0,8)} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 0,8 = A_{SAT} \cdot e^{0,4B_{SAT}} \\ 1,5 = A_{SAT} \cdot e^{0,5B_{SAT}} \end{cases} \quad (4.10)$$

Resolvendo o sistema da equação 4.10, obtém-se os coeficientes A_{sat} e B_{sat} :

$$A_{SAT} = 0,0647$$

$$B_{SAT} = 6,2860$$

A seguir, será descrita a modelagem dos principais controles dos geradores.

4.4.2.1. Regulador de tensão

Geradores síncronos podem gerar ou absorver potência reativa dependendo da sua corrente de excitação. Quando sobrecitados, eles suprem potência reativa e, quando subexcitados, estes absorvem potência reativa. A capacidade de suprimento contínuo em gerar ou absorver potência reativa é, contudo, limitada pela corrente de campo, corrente de armadura e região limite de aquecimento da curva de capacidade da máquina.

Geradores síncronos são, normalmente, equipados com reguladores automáticos de tensão que, continuamente, ajustam a excitação, controlando, assim, a tensão terminal da máquina. A função básica de um sistema de excitação é prover corrente contínua para o enrolamento de campo da máquina síncrona. Além do mais, o sistema de excitação desempenha funções de controle e proteção, essenciais para o desempenho satisfatório de um sistema de potência. As funções de controle incluem o controle da tensão terminal e da geração de potência reativa, além de funções próprias para o aumento da estabilidade do sistema. As funções de proteção estão associadas aos limites de capacidade da máquina e do próprio sistema de excitação que não pode ser excedido.

Os reguladores de tensão podem operar em dois modos de controle – o de tensão e o de fator de potência. Geralmente, os geradores do sistema supridor operam em modo de

controle de tensão, enquanto a maioria dos geradores de plantas industriais e de cogeração operam em controle de fator de potência (GIFFONI, 2004).

O IEEE desenvolveu alguns modelos para representar os sistemas de excitação para estudos de estabilidade. Esses modelos têm sido constantemente atualizados e publicados em seus periódicos. Como não foi ainda disponibilizado, no modelo do regulador de tensão das máquinas da ALUMAR foi utilizado um desses modelos típicos com parâmetros também típicos para máquinas do mesmo porte.

A Figura 4.28 mostra o diagrama de blocos utilizado para modelar o regulador de tensão das máquinas a serem instaladas na ALUMAR.

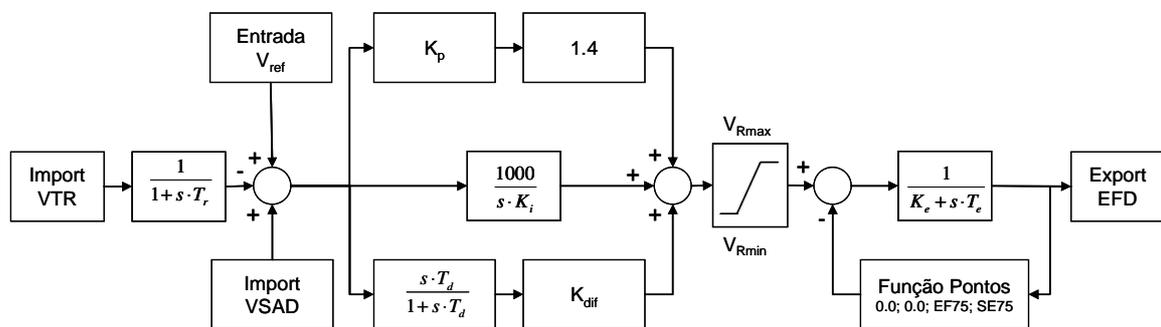


Figura 4.28 – Diagrama de blocos do regulador de tensão

4.4.2.2. Regulador de fator de potência

O regulador de fator de potência é empregado em motores síncronos de grande porte que, ao mesmo tempo, atuam também como compensadores síncronos, para correção do fator de potência nas grandes unidades industriais.

Como a legislação brasileira impôs um fator de potência horário mínimo de unidades consumidoras supridas em média e alta tensão em 0,92, as unidades consumidoras não tiveram outra escolha senão partir para a geração própria de reativos.

Os grandes consumidores industriais, que já possuíam unidades de cogeração com máquinas antigas, instalaram a correção via bancos de capacitores. Envolvidos com grandes investimentos em geração, optaram estrategicamente por geradores com capacidade generosa de geração de energia reativa, além, obviamente, da parte ativa. Com isso, foram resolvidos dois problemas: o do fornecimento da energia ativa a um custo competitivo e a correção do fator de potência da instalação.

Os grandes fabricantes, então, começaram a fornecer geradores com grande capacidade de geração de reativos, atingindo fatores de potência nominais da ordem de 0,8, como é o caso dos geradores a serem instalados na ALUMAR.

A Figura 4.29 mostra a curva de capacidade das máquinas da ALUMAR, considerando um incremento de temperatura de 45°C, com refrigeração a ar.

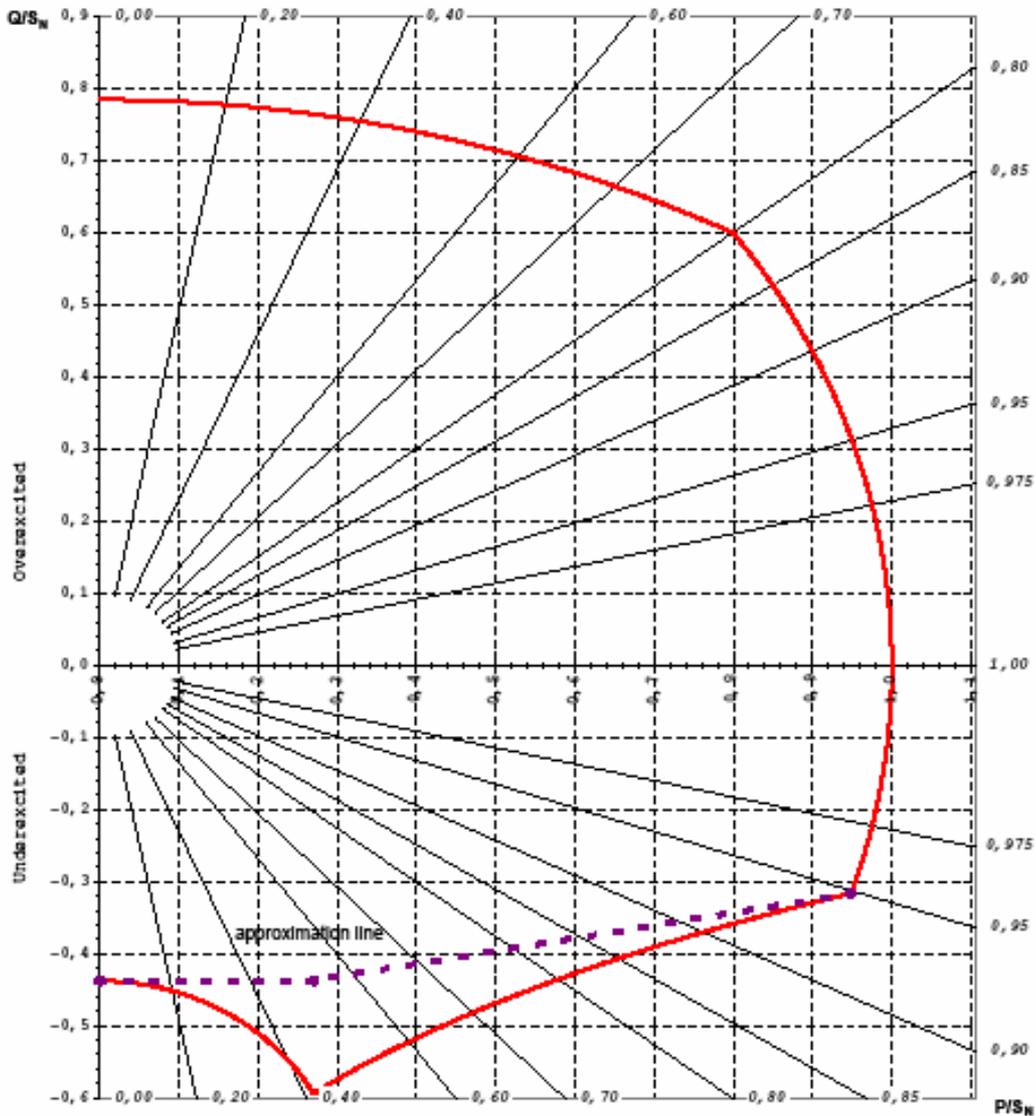


Figura 4.29 – Curva de capacidade dos geradores da ALUMAR

Para operar, gerando esta quantidade de reativos, necessita-se, então, da operação em controle de fator de potência. O regulador de fator de potência da ALUMAR é um controlador de estágio inicial ao regulador de tensão. A função de controle é obtida após o estabelecimento de um valor de referência do fator de potência, ou cosseno φ , via sala de controle.

4.4.2.3. Estabilizador

O estabilizador, mais conhecido como *Power System Stabilizer (PSS)*, tem a função de amortecer oscilações eletromecânicas de baixa frequência. Geralmente, é um dos sinais adicionais que entra no sistema de controle do regulador de tensão.

Na Figura 4.30, é mostrado o diagrama de blocos do PSS, utilizado na modelagem das máquinas a serem instaladas na ALUMAR.

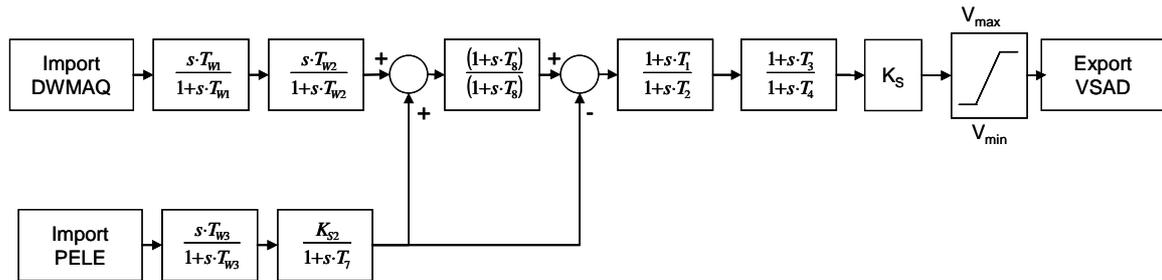


Figura 4.30 – Diagrama de blocos do PSS

4.4.2.4. Regulador de velocidade

Os reguladores de velocidade das turbinas atuam nas entradas da turbina e operam no comando de abertura e fechamento das válvulas de admissão principal de vapor à alta pressão. Através do uso de válvulas com curvas de características conhecidas, é possível linearizá-las por meio de ajustes eletrônicos nos posicionadores, de maneira que o percentual de abertura das válvulas seja praticamente linear com a vazão mássica (kg/s) do vapor (GIFFONI, 2004).

Na Figura 4.31, é mostrado o diagrama de blocos do regulador de velocidade da turbina a vapor, utilizado na modelagem das máquinas a serem instaladas na ALUMAR.

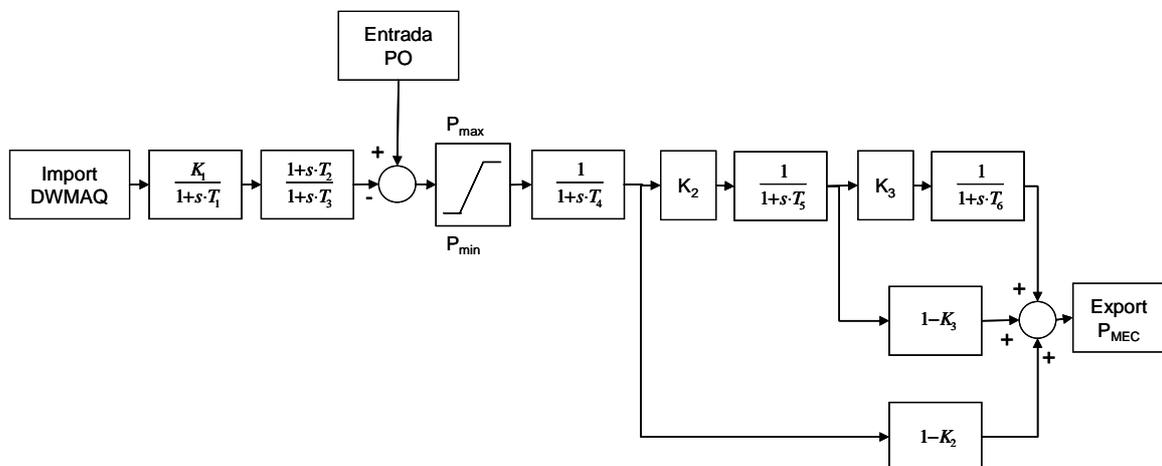


Figura 4.31 – Diagrama de blocos do regulador de velocidade

A Tabela 4.6 apresenta todos os parâmetros utilizados na modelagem do regulador de tensão, estabilizador e regulador de velocidade.

Tabela 4.6
Parâmetros dos controles dos geradores

Reg. de Tensão		Reg. de Velocidade		Estabilizador	
K_p	1,0	K_1	100,0	T_{W1}	3,0
K_e	1,0	K_2	0,0	T_{W2}	3,0
K_i	5000,0	K_3	0,0	T_{W3}	3,0
K_{diff}	30,0	T_1	1,0	K_{S2}	90,0
T_e	0,41	T_2	0,01	T_7	3,0
T_r	0,020	T_3	0,01	T_8	0,30
T_d	0,10	T_4	0,01	T_9	0,15
SE75	1,16	T_5	0,01	T_1	0,12
SE100	1,21	T_6	0,01	T_2	0,03
EF75	16,2	P_{min}	0,1	T_3	0,12
EF100	21,6	P_{max}	1,2	T_4	0,03
V_{Rmin}	0,0			K_S	0,30
$V_{Rmáx}$	20,0			V_{Smin}	- 0,10
				$V_{Smáx}$	0,10

4.5. Controlador FACTS da subestação São Luís II

Conforme comentado na seção 4.2.1, a subestação São Luís II alimenta a ALUMAR e toda a capital do Estado do Maranhão. Nessa subestação, chegam duas linhas em 500 kV, procedente da subestação de Presidente Dutra. Para realizar a redução do nível de tensão de 500 kV para 230 kV, na subestação São Luís II, existem três bancos de auto-transformadores que totalizam 1800 MVA. Na Figura 4.32, tem-se um diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico que alimenta a ilha de São Luís do Maranhão.

Na barra de 230 kV, estão conectadas as duas linhas que alimentam a ALUMAR; as duas linhas que vão para a subestação São Luís I, para fornecimento de energia para toda a grande São Luís; uma linha que alimenta o consumidor industrial VALE, além de uma linha que vai para as cidades de Peritoró e Miranda, no interior do Estado.

Quando há desligamento de uma das duas linhas de 500 kV que chegam à subestação São Luís II, ocorrem problemas de instabilidade em face do carregamento da linha que ficou em operação. Por outro lado, como essas linhas são muito longas, há uma queda de tensão considerável que, somada a queda de tensão da linha em 230 kV que vai para Peritoró e Miranda, reduz o nível de tensão nessa região do Maranhão, comprometendo a qualidade do fornecimento de energia elétrica.

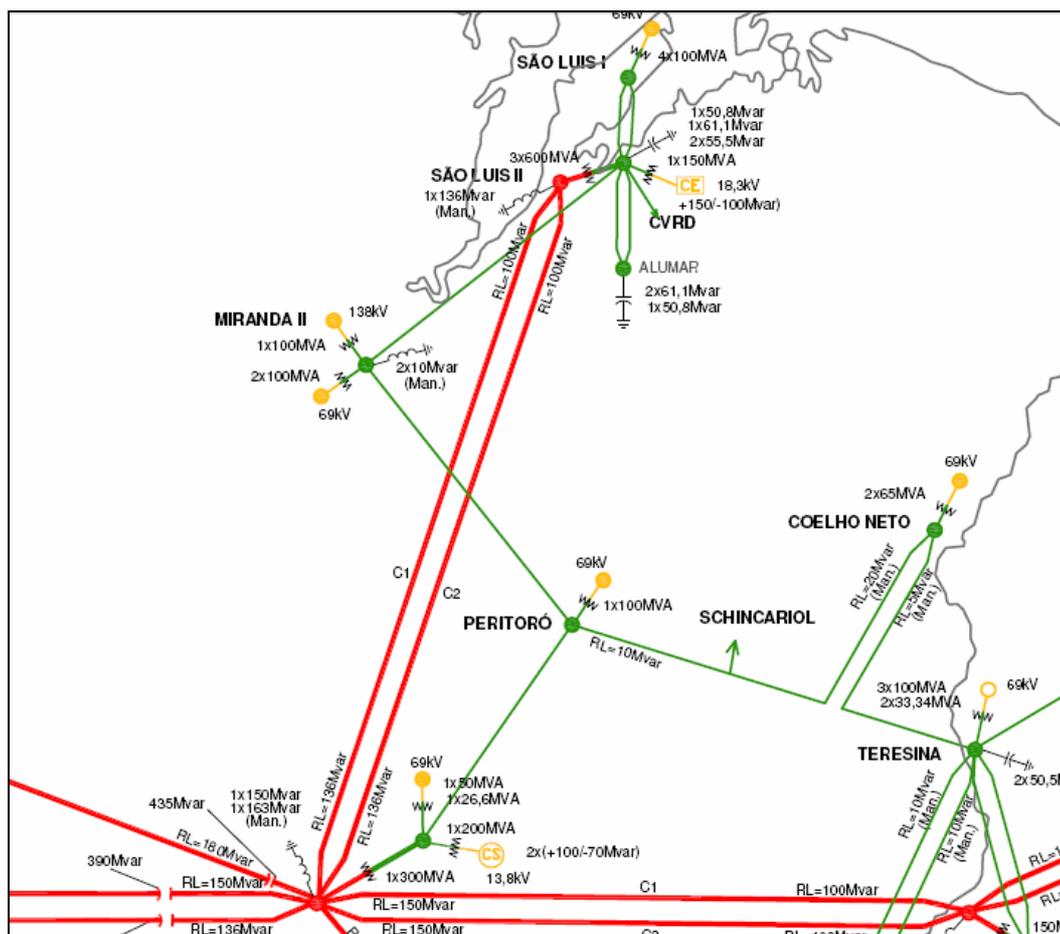


Figura 4.32 – Sistema elétrico que alimenta a ilha de São Luís

Como medida emergencial, quando há o desligamento de uma das linhas de 500kV, a ALUMAR é obrigada a reduzir a sua carga de 825 MW para 790 MW. Essa redução, além de gerar perdas financeiras, gera problemas de instabilidade no processo de produção de alumínio, devido à diminuição da temperatura interna das cubas.

Em virtude desses problemas de instabilidade, a ELETRONORTE instalou um Controlador FACTS do tipo SVC, na barra de 230 kV da Subestação São Luís II.

4.4.3. Características técnicas

O SVC da subestação São Luís II tem potência de (-100; +150) MVar com *slope* de 2%. Sua principal função é controlar a tensão no barramento de 230 kV dessa subestação, sendo formado, basicamente, por um *Thyristor Controlled Reactor* (TCR), um *Thyristor Switched Reactor* (TSC) e dois filtros de harmônicos sintonizados na 5^o e 7^o componentes. Por razões econômicas, a tensão interna do SVC é 18,3 kV e a tensão no barramento a ser controlado é 230 kV, sendo necessário um transformador elevador de 150 MVA. A Figura 4.33 mostra o diagrama unifilar do SVC da subestação São Luís II.

O sistema de controle deste SVC é dividido nas funções controle da instalação e controle de *loop* fechado (*Closed Loop Controller - CLC*). As funções de controle da instalação abrangem todas as funções necessárias para controlar e monitorar todos os componentes do SVC, como comandos, proteção, resfriamento, controle das válvulas, etc. O controle de *loop* fechado realiza o controle de tensão. Com base na medição do erro de tensão na entrada do controlador, o sistema de CLC define a susceptância do SVC requerida no 230 kV e obtida através de combinações entre TCR e TSC. O TCR tem sua susceptância variada de forma rápida e contínua através do controle do ângulo de disparo dos tiristores. O TSC, apesar de representar uma ação rápida, porém descontínua, e de chaveamento acionado por tiristores, tem essa descontinuidade compensada pelo sistema de controle do SVC que utiliza o TCR para compensar sua entrada/saída. Com isso, visto da barra de 230 kV, o SVC proporciona uma excursão rápida e contínua da potência reativa ao longo de seus limites indutivo e capacitivo. Os filtros estão sempre inseridos em operação normal para absorver os harmônicos gerados pelo TCR, mas não fazem parte das ações de controle.

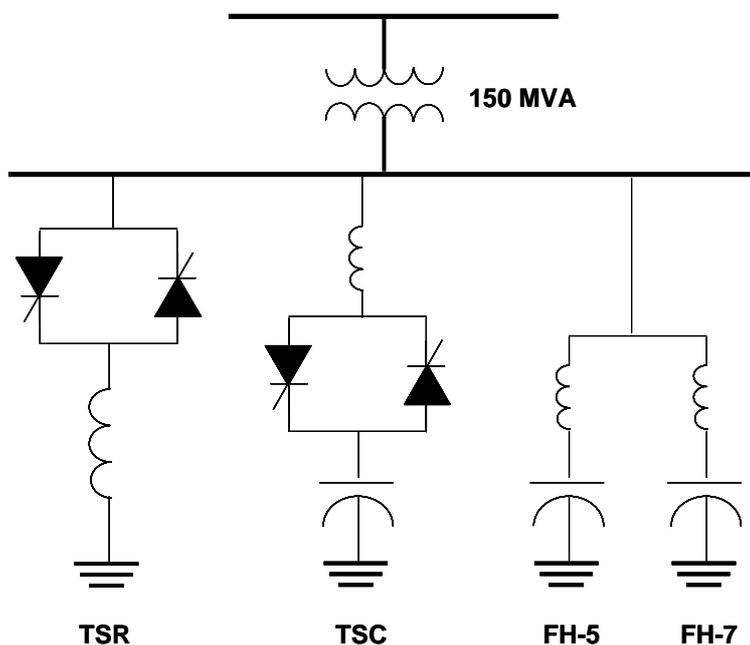


Figura 4.33 – Diagrama unifilar do SVC da SE São Luís II

No sistema de controle do SVC, há, ainda, uma função de bloqueio por subtensão cuja função é evitar que o SVC tente controlar a tensão durante determinadas condições de curto-circuito na rede que possam provocar, no ponto de controle, grandes afundamentos de tensão. Quando a tensão atinge o valor ajustado de 0,50 pu, essa função

força o SVC a operar com 0 MVar, evitando, assim, contribuir para uma possível sobretensão quando da eliminação da falta.

Convém ressaltar que o SVC da subestação São Luís II entrou em operação no início do mês de setembro de 2007, sendo toda a modelagem elaborada pelo ONS. Para esse trabalho, foi utilizada essa modelagem, uma vez que a partir de dados confirmados em campo, já é oficial e está disponível na base de dados disponibilizada pelo próprio ONS.

CAPÍTULO 5

SIMULAÇÕES

5.1. Introdução

Esse capítulo tem como objetivo destacar a validade das modelagens do Controlador FACTS do tipo SVC da subestação São Luís II e dos futuros geradores da ALUMAR, bem como apresentar os resultados das simulações, visando à melhoria da estabilidade do SIN na área Maranhão. Com vistas a modelar o consumidor industrial ALUMAR, foi utilizado o modelo proposto com todas as melhorias apresentadas e com relação às simulações, foram elas realizadas utilizando os programas ANAREDE, para estudos em regime permanente e o ANATEM, para estudos dinâmicos no domínio do tempo, ambos produzidos pelo CEPEL.

5.2. Cenários analisados

Para um melhor entendimento, serão apresentados os resultados de simulações envolvendo apenas o Controlador FACTS da subestação São Luís II e, em seguida, serão discutidos os resultados envolvendo somente os dois cogeneradores da ALUMAR. Por fim, será apresentada a comparação dos resultados do SIN, considerando a operação conjunta do SVC e dos dois cogeneradores, conforme o objetivo da pesquisa.

5.2.1. Análise do SVC da subestação São Luís II

Primeiramente, foram realizadas simulações em regime permanente, considerando o SVC da subestação São Luís II em operação e fora de operação. Na Tabela 5.1, mostra-se a comparação dos níveis de tensão em algumas barras da SE São Luís II e na ALUMAR. Como se pode observar, praticamente, não existem diferenças entre os dois casos. Similar situação acontece ao serem avaliados os fluxos de potência ativa e reativa nos principais circuitos de 500 kV que alimentam a Ilha de São Luís, conforme os valores de tensão mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.1

Comparação das tensões com e sem o SVC

Barra	Grandeza	SVC em operação	SVC fora de operação
5580	V _{CA} Presidente Dutra 500kV	1.061	1.061
5550	V _{CA} São Luís II 500kV	1.022	1.005
5551	V _{CA} São Luís II 230kV	1.034	1.038
8100	V _{CA} Redução C1	1.034	1.038
8200	V _{CA} Redução C2	1.034	1.038
8007	V _{CA} Auxiliar Red T7	1.022	1.022
8008	V _{CA} Auxiliar Red T8	1.022	1.022
8001	V _{CC} Linha de Cubas 1	1.000	1.000
8002	V _{CC} Linha de Cubas 2	0.961	0.961
8003	V _{CC} Linha de Cubas 3	0.983	0.983
8020	V _{CA} Refinaria	1.022	1.022

Tabela 5.2

Comparação dos fluxos de potências com e sem o SVC.

Linha	Grandeza	SVC em operação	SVC fora de operação
5590 - 5580	Fluxo potência ativa Imperatriz – Presidente Dutra (MW)	695.2	695.1
5590 - 5580	Fluxo potência reativa Imperatriz – Presidente Dutra (MVar)	465.4	456.3
5580 - 5550	Fluxo potência ativa Presidente Dutra – São Luís II (MW)	1104.5	1105.1
5580 - 5550	Fluxo potência reativa Presidente Dutra – São Luís II (MVar)	406.9	389.2

Os resultados mostrados nas Tabelas 5.1 e 5.2 confirmam que o SVC da subestação São Luís II está operando corretamente, ou seja, operando em um ponto que garante a estabilidade do sistema, pois, caso ocorra um transitório, há margem de potência reativa para controlar o nível de tensão na barra, o que comprova que se o SVC estivesse gerando ou absorvendo potência reativa da barra, sua contribuição seria limitada quando ocorresse um transitório. Na Figura 5.1, mostra-se o ponto de operação (em vermelho) do SVC na sua curva característica.

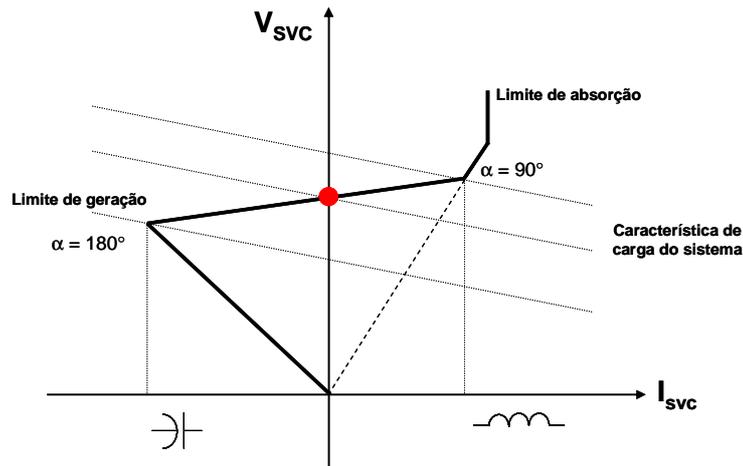


Figura 5.1 – Ponto de operação do SVC em regime permanente.

Em seguida, foram feitas algumas simulações em regime dinâmico através do programa ANATEM. O caso escolhido foi o desligamento intempestivo de um dos dois circuitos de 500 kV entre as subestações de Presidente Dutra e São Luís II. A Figura 5.2 mostra o comportamento da tensão na barra de 230 kV da SE São Luís II.

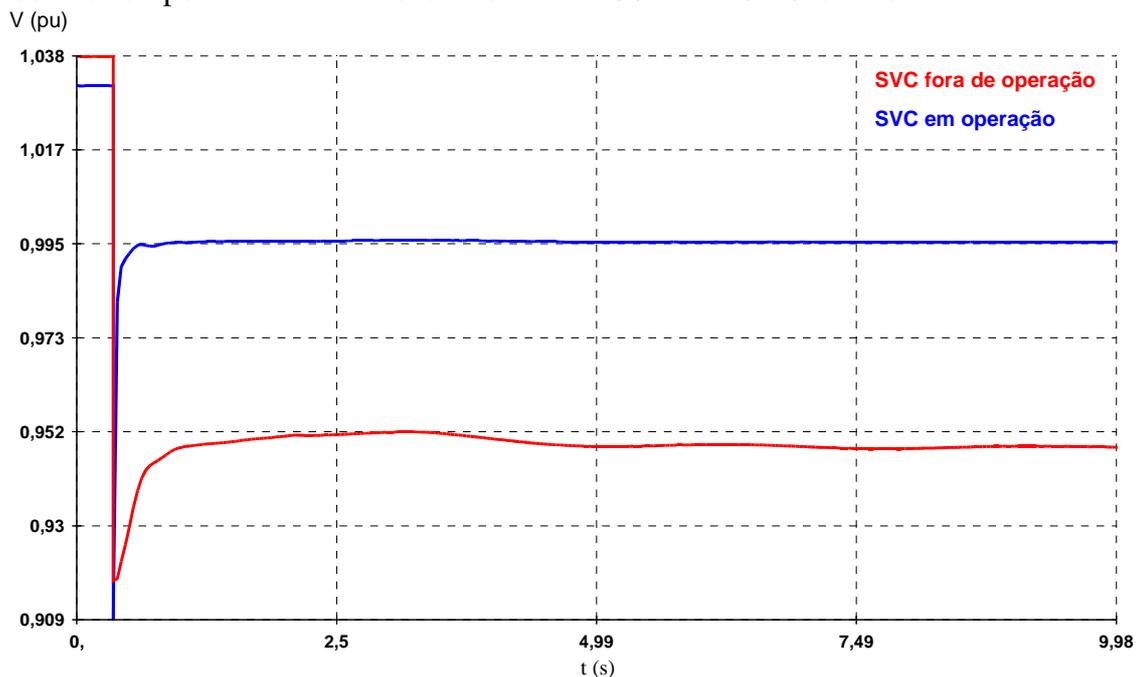


Figura 5.2 – Tensão na barra de 230 kV da SE São Luís II (5551)

Conforme o resultado das simulações, observou-se significativa diferença quando o SVC está em operação ou não. Durante o transitório, em ambos os casos houve o afundamento da tensão, uma vez que a impedância do sistema aumentou instantaneamente. No entanto, logo em seguida, o SVC atuou controlando a tensão rapidamente. No caso em que o SVC estava fora de operação, a tensão não foi controlada, ou seja, permaneceu baixa após a perturbação.

O mesmo aconteceu com a tensão nas barras de 34,5 kV e 13,8 kV da ALUMAR, conforme pode ser visto nas curvas das Figuras 5.3 e 5.4.

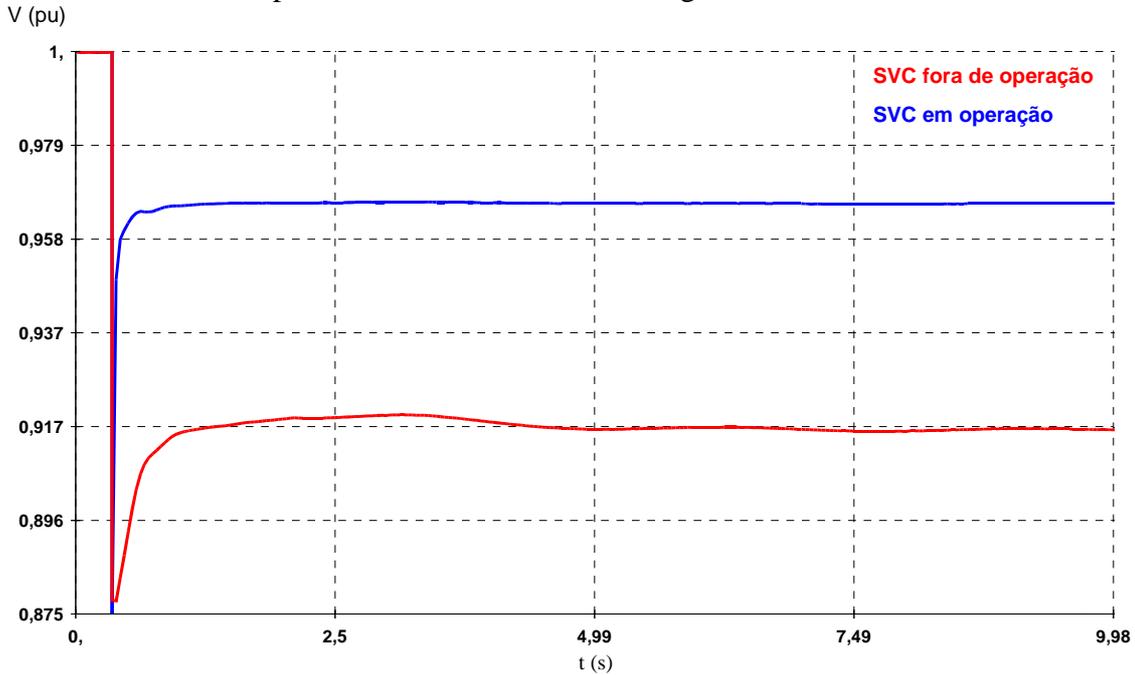


Figura 5.3 – Tensão na barra de 34,5 kV da Linha de Cubas I da ALUMAR (8001)

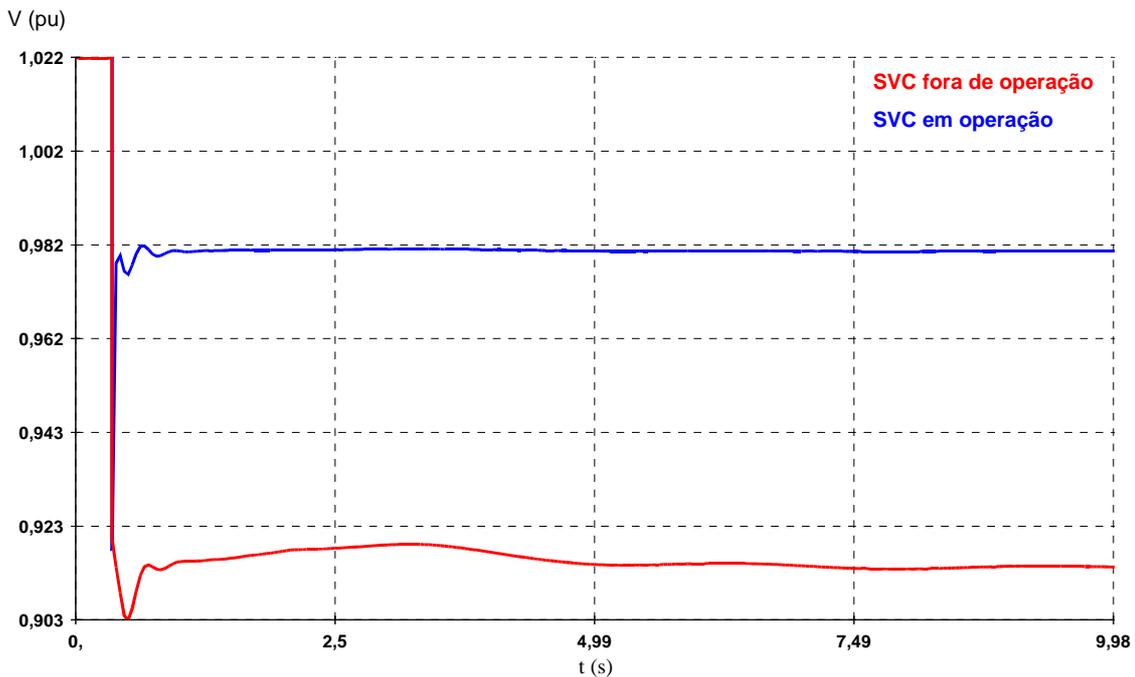


Figura 5.4 – Tensão na barra de 13,8 kV da Refinaria da ALUMAR (8020)

Nessas simulações, pode-se também avaliar o tempo de resposta do SVC. Embora esse tipo de Controlador FACTS seja bastante rápido, ele não consegue evitar o afundamento de tensão momentânea durante o transitório, uma vez que seu tempo de resposta é de aproximadamente 2 ciclos ($\cong 32$ ms). Esse retardo deve-se, principalmente, à

limitação dos equipamentos de chaveamento e de medição do SVC. Através das tensões mostradas na Figura 5.5, pode-se observar que o SVC da SE São Luís II controlou a tensão na barra em aproximadamente 40 ms após a perturbação.

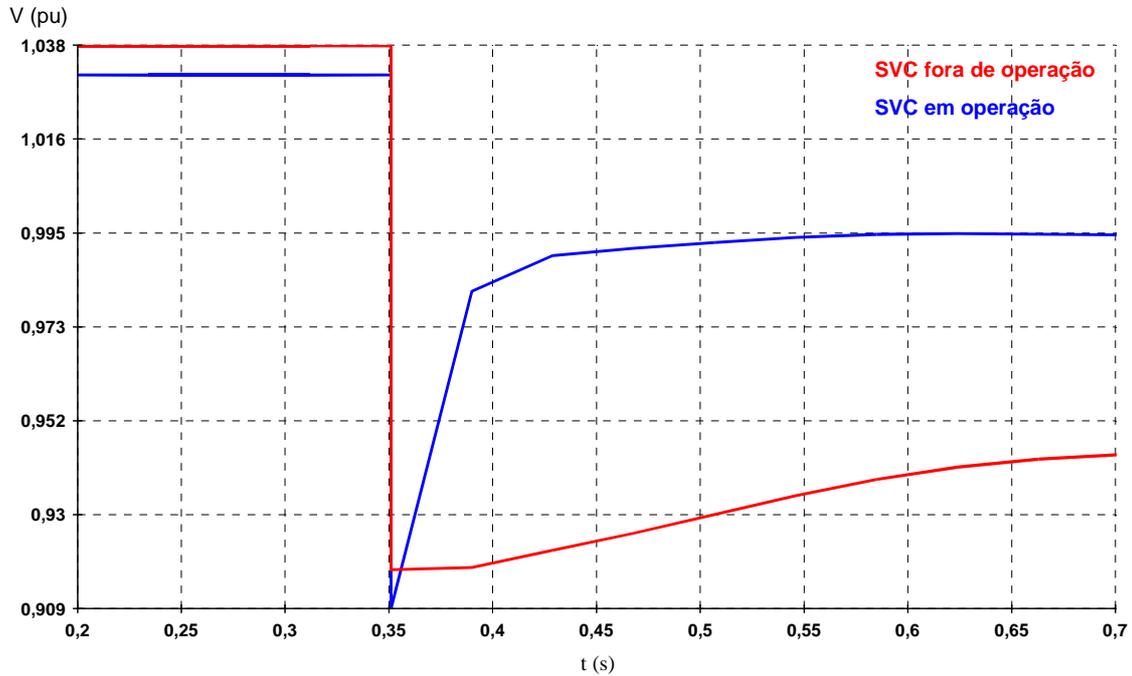


Figura 5.5 – Tempo de resposta do SVC da SE São Luís II

Foi verificado também o comportamento dos fluxos de potência ativa e reativa nos dois circuitos de 500 kV, entre as subestações de Presidente Dutra e São Luís II (ver Figuras 5.6 e 5.7).

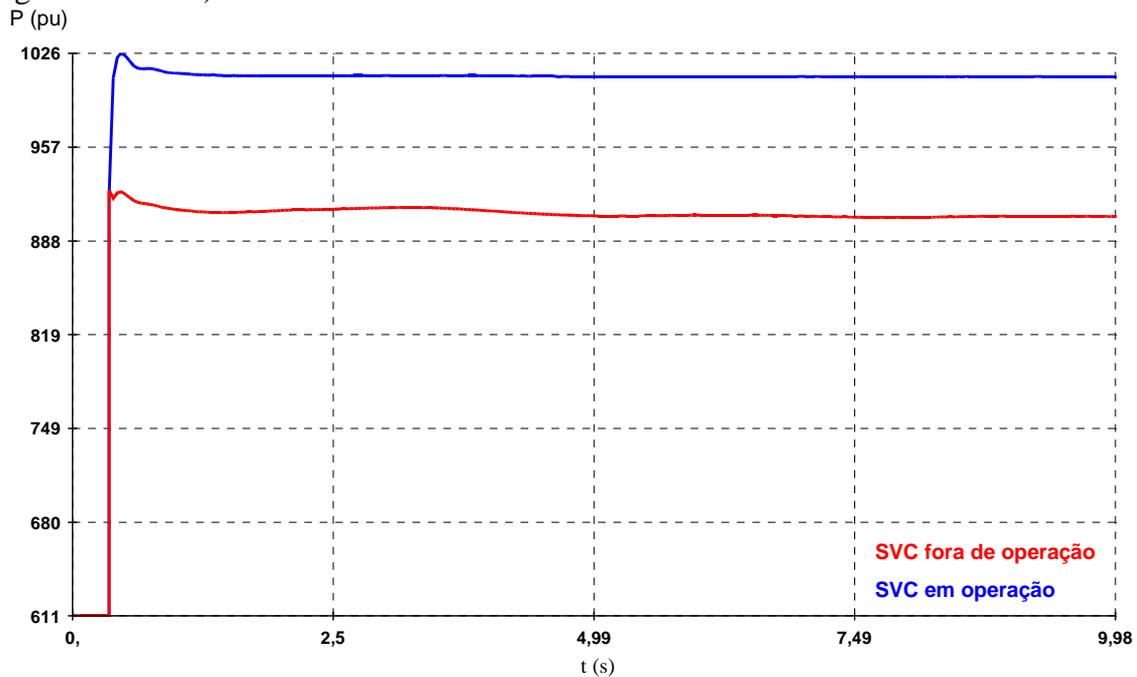


Figura 5.6 – Fluxo de potência ativa no circuito 2 de 500kV entre as subestações de Presidente Dutra e São Luís II (5580 – 5550)

Assim pode-se observar, nos resultados mostrados nas Figuras 5.6 e 5.7, que o SVC de São Luís II possibilita o aumento da eficiência da transmissão nos circuitos de 500 kV entre as subestações de Presidente Dutra e São Luís II, uma vez que o fluxo de potência ativa aumentou e o de reativa diminuiu.

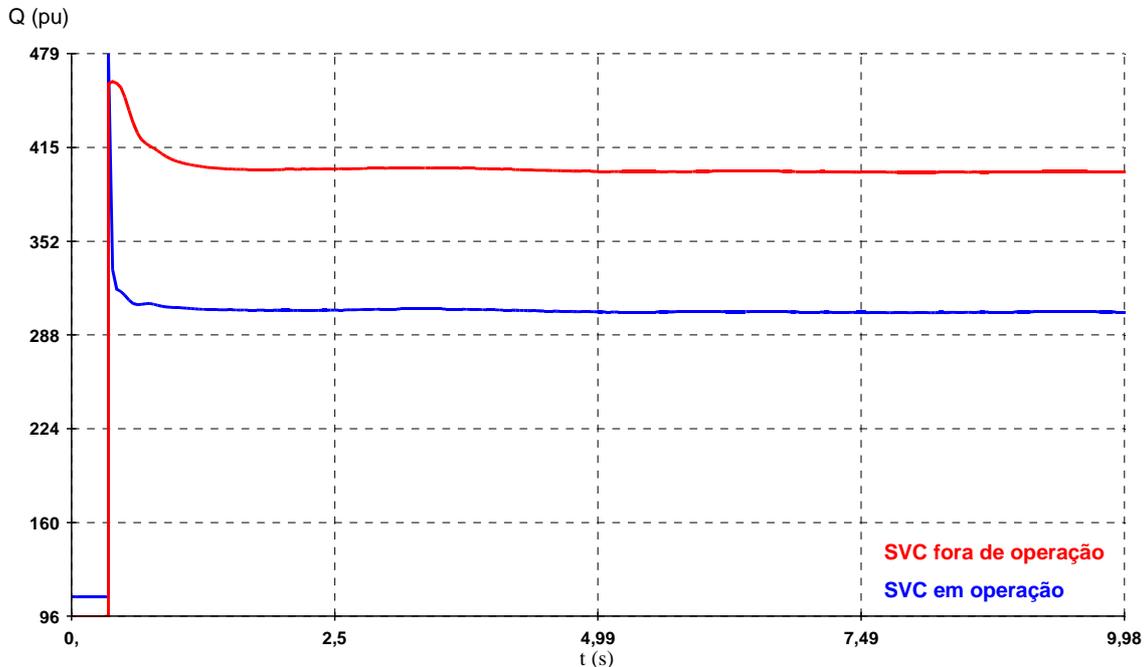


Figura 5.7 – Fluxo de potência reativa no Circuito 2 de 500 kV entre as subestações de Presidente Dutra e São Luís II (5580 – 5550)

Em consequência desse aumento da capacidade de transmissão dos circuitos de 500 kV, os perfis de tensão nas subestações de Presidente Dutra e Imperatriz melhoraram, estabilizando-se em níveis mais elevados, conforme se pode constatar nas Figuras 5.8 e 5.9.

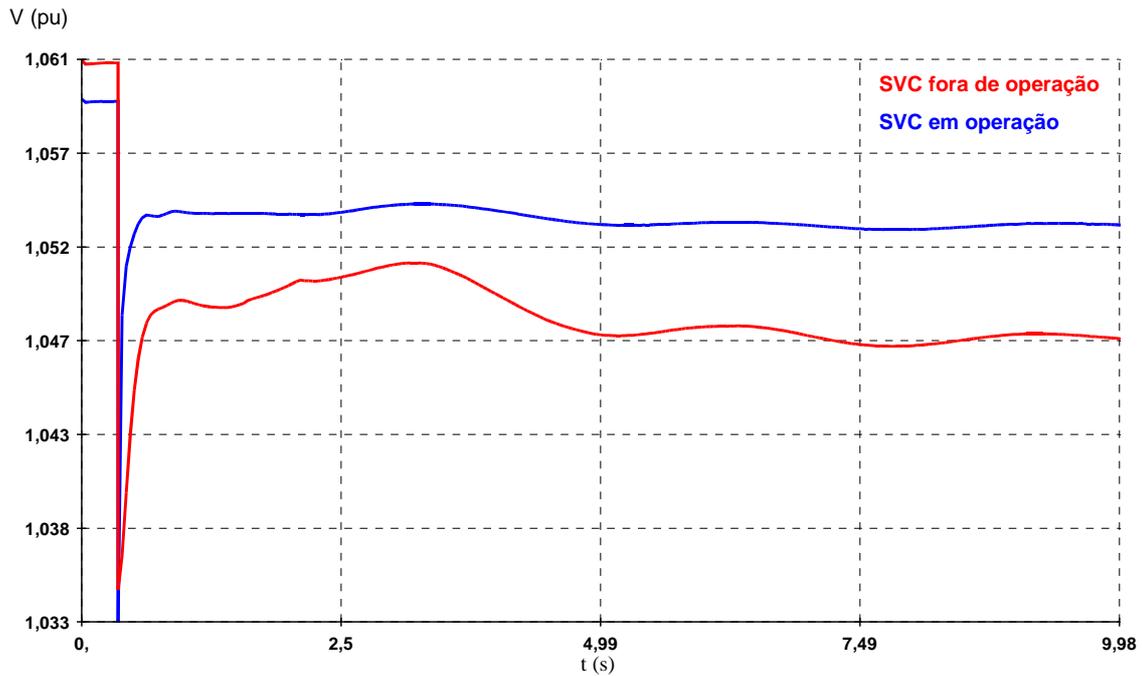


Figura 5.8 – Tensão na barra de 500 kV da subestação de Presidente Dutra (5580)

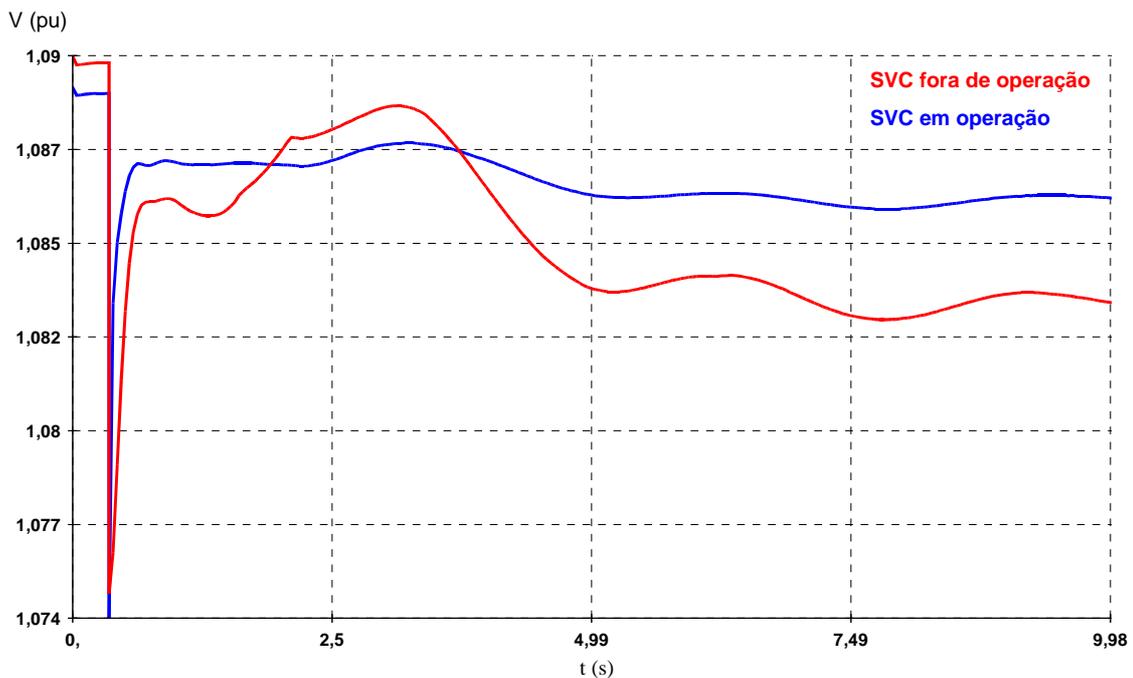


Figura 5.9 – Tensão na barra de 500 kV da subestação de Imperatriz (5590)

O SVC da subestação São Luís II melhorou também a estabilidade angular dos geradores da região Norte do SIN, como os da UHE Tucuruí. Nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 são mostrados a potência reativa, o ângulo do gerador nº 10 e a frequência do sistema, respectivamente:

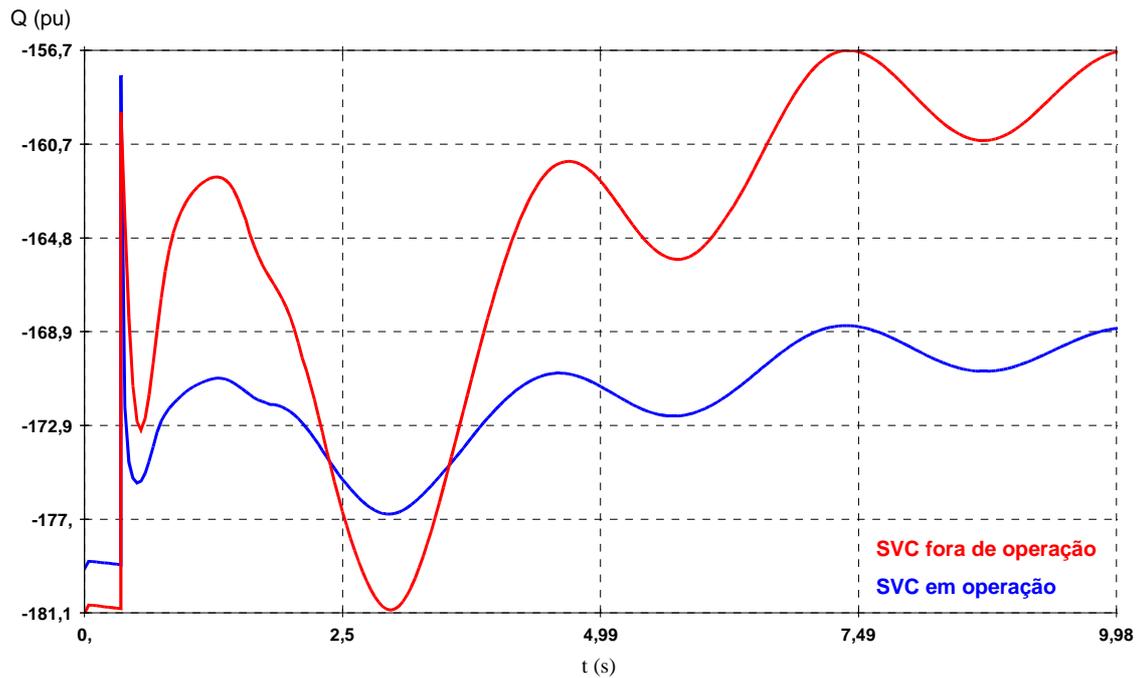


Figura 5.10 – Potência reativa da máquina 10 da UHE Tucuruí

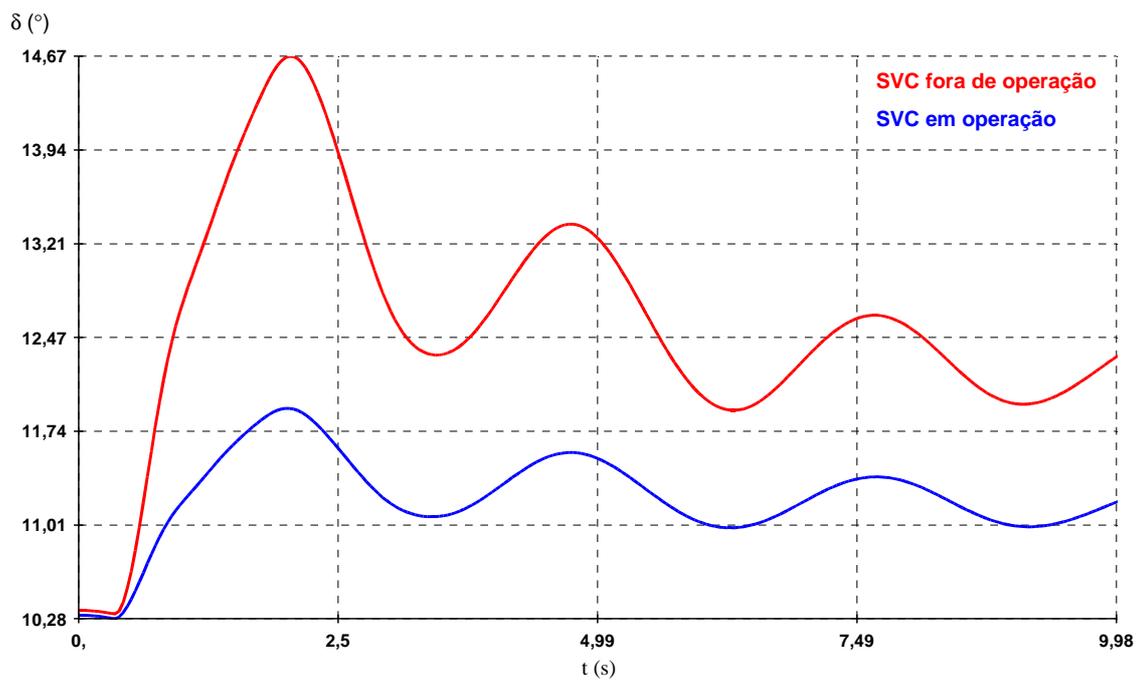


Figura 5.11 – Ângulo do gerador n° 10 da UHE Tucuruí

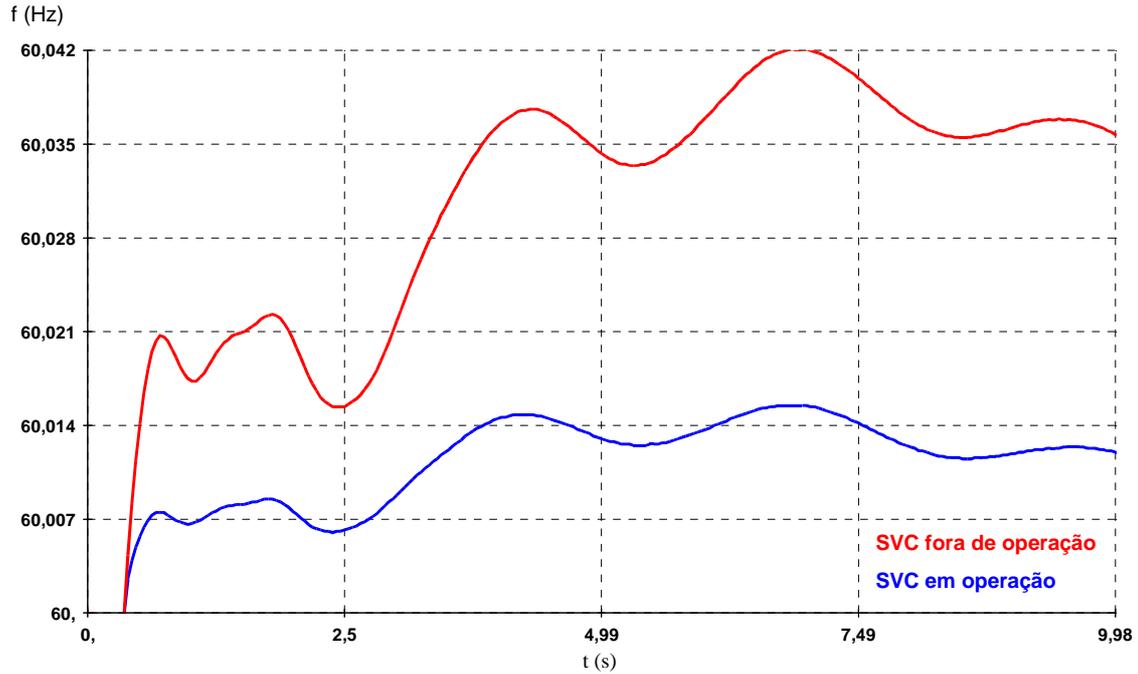


Figura 5.12 – Frequência do sistema

Embora a variação da frequência absoluta do sistema não tenha sido muito significativa, quando o SVC não está em operação, a taxa de variação da frequência df/dt é mais acentuada, podendo provocar uma operação indevida de relés de frequência no sistema.

Outro caso simulado foi o desligamento das três Linhas de Cubas da ALUMAR simultaneamente. Na Figura 5.13, tem-se o comportamento da tensão na barra de 230 kV da subestação São Luís II:

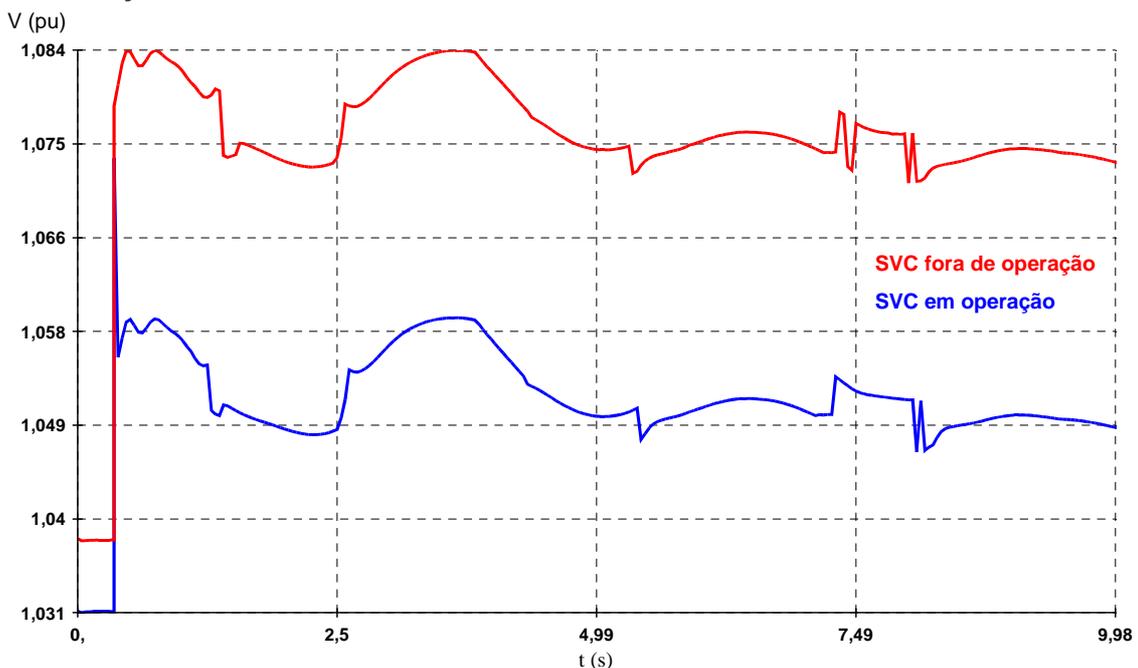


Figura 5.13 – Tensão na barra de 230 kV da SE São Luís II (5551)

Nesse caso, ocorreu uma sobretensão sustentada na barra, que foi originada pelo corte de carga de aproximadamente 750 MW. O controle dessa sobretensão no sistema deve ser realizado o mais rápido possível, uma vez que traz grandes impactos na interligação Norte-Sul do SIN, podendo até haver a abertura dessa interligação, o que tornaria o impacto do evento muito mais severo. O SVC de São Luís II controlou essa sobretensão na barra, contribuindo, significativamente, para a estabilidade de tensão e angular. Nessa simulação, foi incluído o esquema de controle de tensão que desliga todos os bancos de capacitores da subestação São Luís II e da ALUMAR, quando há saída de pelo menos duas Linhas de Cubas, a fim de minimizar a sobretensão.

Na seção seguinte, serão demonstrados os resultados das simulações envolvendo os geradores da ALUMAR.

5.2.2. Análise dos geradores da ALUMAR

Para esse segundo cenário, também foram realizadas simulações em regime permanente, ao considerar os geradores da ALUMAR em operação e fora de operação. Para tanto, foi considerado que o SVC da subestação de São Luís II estava fora de operação, para que fossem evidenciados somente os resultados referentes aos cogeneradores da ALUMAR. Na Tabela 5.3, é mostrada a comparação dos níveis de tensão em algumas barras da SE São Luís II e na ALUMAR e, na Tabela 5.4, tem-se a comparação dos fluxos de potência ativa e reativa nos principais circuitos de 500 kV que alimentam a ALUMAR e, também, na linha de 230 kV que alimenta a Refinaria.

Tabela 5.3
Comparação dos níveis de tensão

Barra	Grandeza	Cogeneradores em operação	Cogeneradores fora de operação
5580	V_{CA} Presidente Dutra 500 kV	1.063	1.061
5550	V_{CA} São Luís II 500 kV	1.007	1.005
5551	V_{CA} São Luís II 230 kV	1.041	1.038
8100	V_{CA} Redução C1	1.041	1.038
8200	V_{CA} Redução C2	1.041	1.038
8007	V_{CA} Auxiliar Red T7	1.021	1.022
8008	V_{CA} Auxiliar Red T8	1.022	1.022
8001	V_{CC} Linha de Cubas 1	1.000	1.000
8002	V_{CC} Linha de Cubas 2	0.961	0.961
8003	V_{CC} Linha de Cubas 3	0.983	0.983
8020	V_{CA} Refinaria	1.022	1.022

Tabela 5.4
Comparação dos fluxos de potências

Linha	Grandeza	Geradores em operação	Geradores fora de operação
5590 – 5580	Fluxo potência ativa Imperatriz – Presidente Dutra (MW)	677.8	695.1
5590 – 5580	Fluxo potência reativa Imperatriz – Presidente Dutra (MVar)	453.9	456.3
5580 – 5550	Fluxo potência ativa Presidente Dutra – São Luís II (MW)	1074.9	1105.1
5580 – 5550	Fluxo potência reativa Presidente Dutra – São Luís II (MVar)	391.3	389.2
8200 – 8020	Fluxo potência ativa Redução – Refinaria (MW)	5.4	34.0
8200 – 8020	Fluxo potência reativa Redução – Refinaria (MVar)	0.5	3.8

Constatou-se, no caso em que os geradores estão em operação, que houve um ligeiro aumento dos níveis de tensão em algumas barras, provocado pela diminuição da potência ativa em algumas barras. Os fluxos de potência nos circuitos também diminuíram, quando os geradores estavam em operação, sendo que as maiores diferenças foram observadas nos circuitos próximos aos geradores. Com a diminuição dos fluxos de potência ativa e do aumento dos níveis de tensão nas barras, houve melhoria da estabilidade eletromecânica e de tensão nessa região.

Foram feitas, ainda, algumas simulações em regime dinâmico, sendo que, o caso simulado foi o mesmo do cenário anterior, o desligamento intempestivo de um dos dois circuitos de 500 kV entre as SE's de Presidente Dutra e São Luís II. Na Figura 5.14, é mostrado o comportamento da tensão na barra de 230 kV da SE São Luís II.

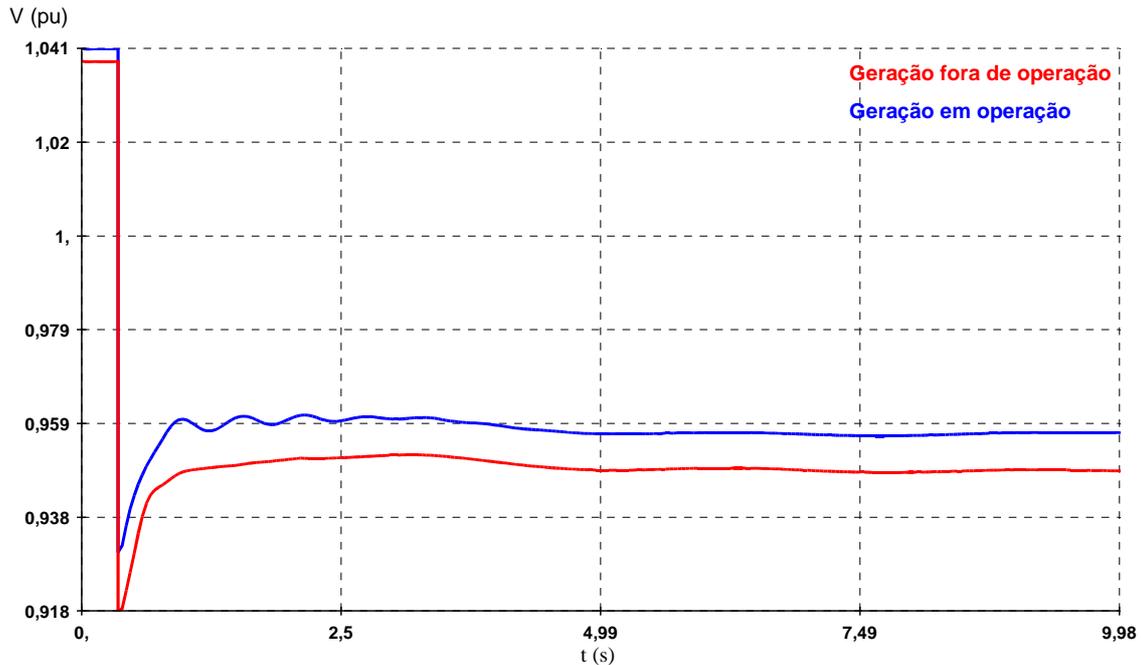


Figura 5.14 – Tensão na barra de 230 kV da SE São Luís II (5551)

Nesse ponto do sistema, verificou-se uma pequena diferença, sendo que, no caso em que os geradores estavam em operação, o nível de tensão ficou aproximadamente 2% maior. Além disso, observou-se uma pequena oscilação, que é amortecida em aproximadamente dois segundos. Essa oscilação é provocada, principalmente, pela inércia dos dois geradores e pela atuação dos reguladores de velocidade e de tensão das máquinas. O mesmo comportamento pode ser observado nas barras de 34,5 kV e 13,8 kV da subestação da Redução, conforme pode ser visto nas Figuras 5.15 e 5.16.

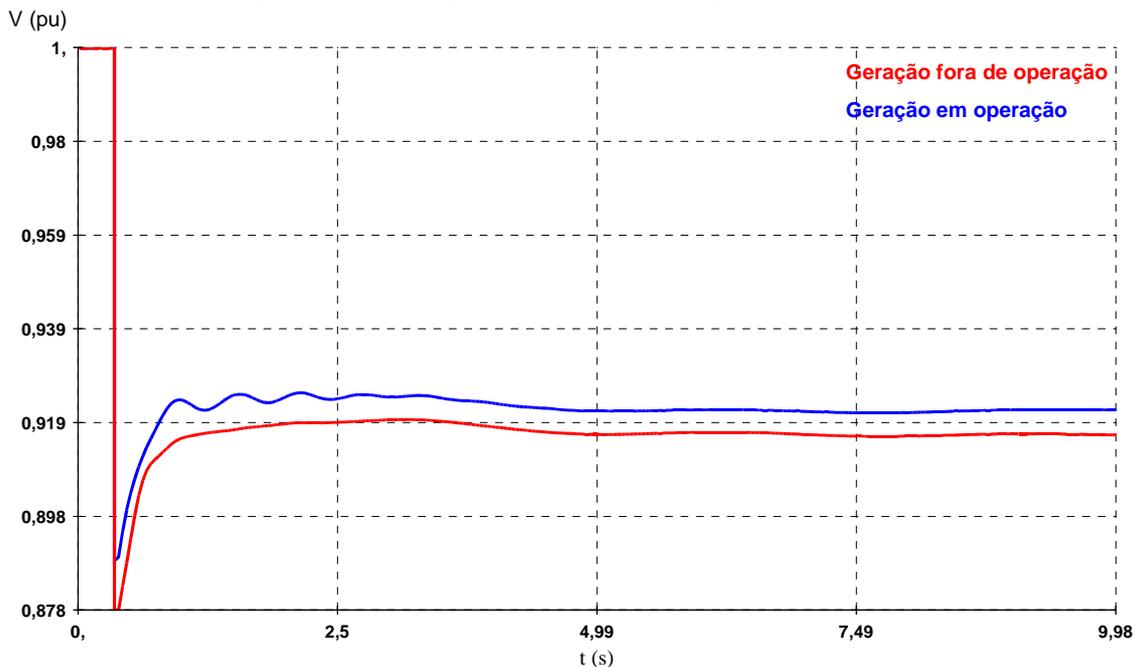


Figura 5.15 – Tensão na barra de 34,5 kV da Linha de Cubas I da ALUMAR (8001)

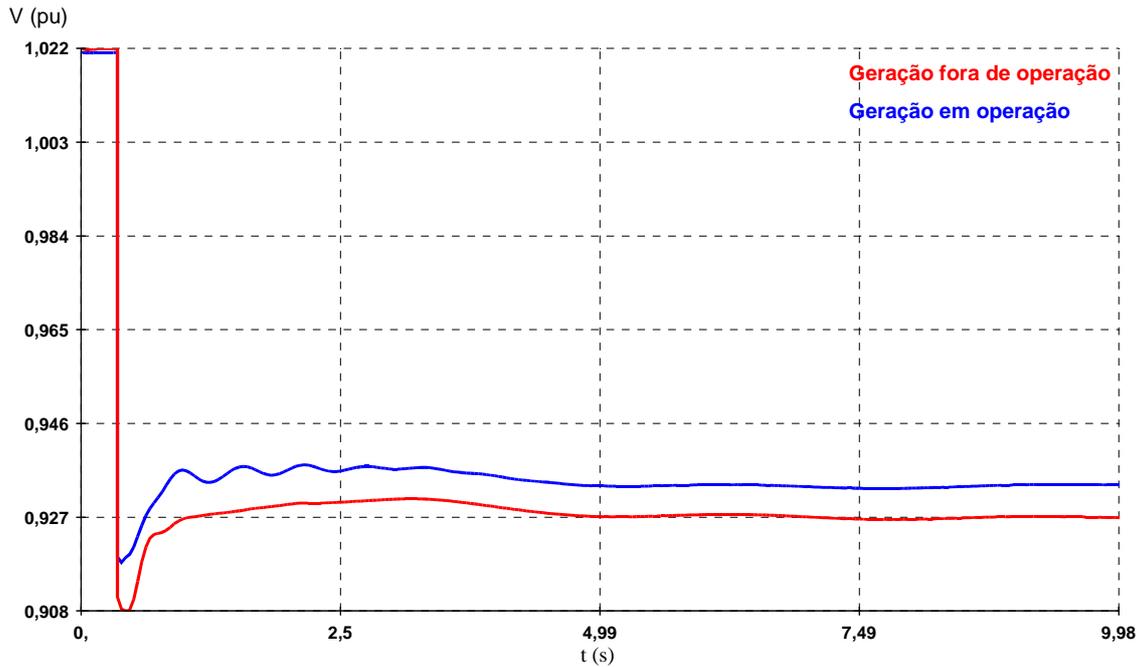


Figura 5.16 – Tensão na barra de 13,8 kV do transformador T7 da Redução (8007)

Foi verificado, também, o comportamento dos fluxos de potência ativa e reativa nos dois circuitos de 500 kV, entre as subestações de Presidente Dutra e São Luís II para este caso. Nas Figuras 5.17 e 5.18 mostram a tensão nas barras das subestações de Presidente Dutra e São Luís II respectivamente.

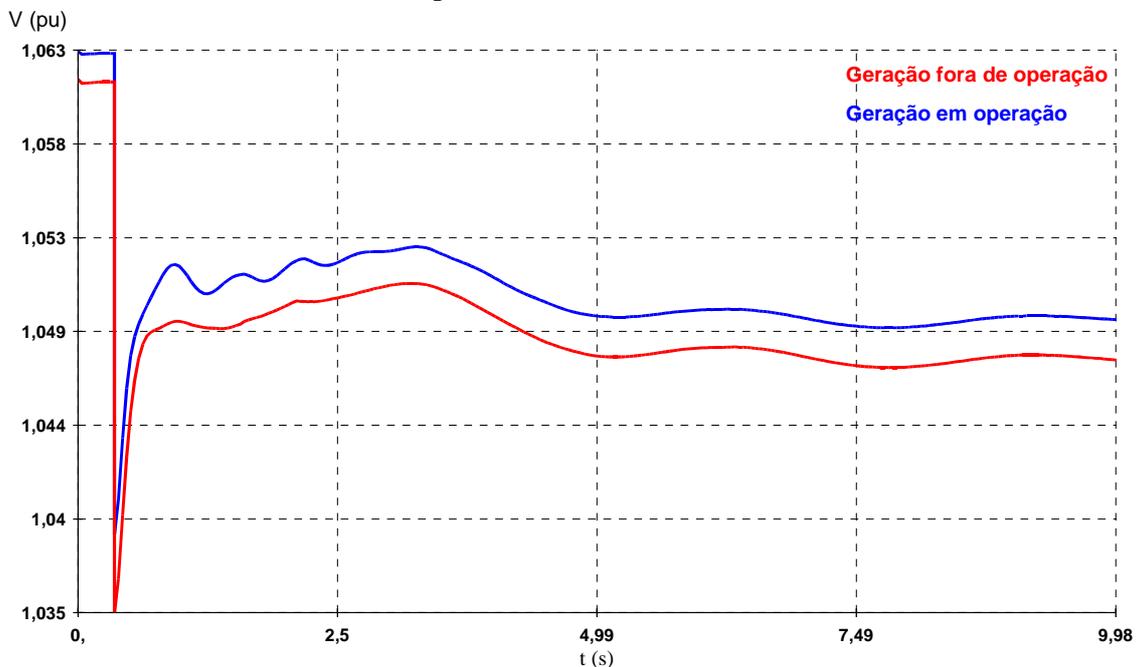


Figura 5.17 – Tensão na barra de 500 kV da subestação de Presidente Dutra (5580)

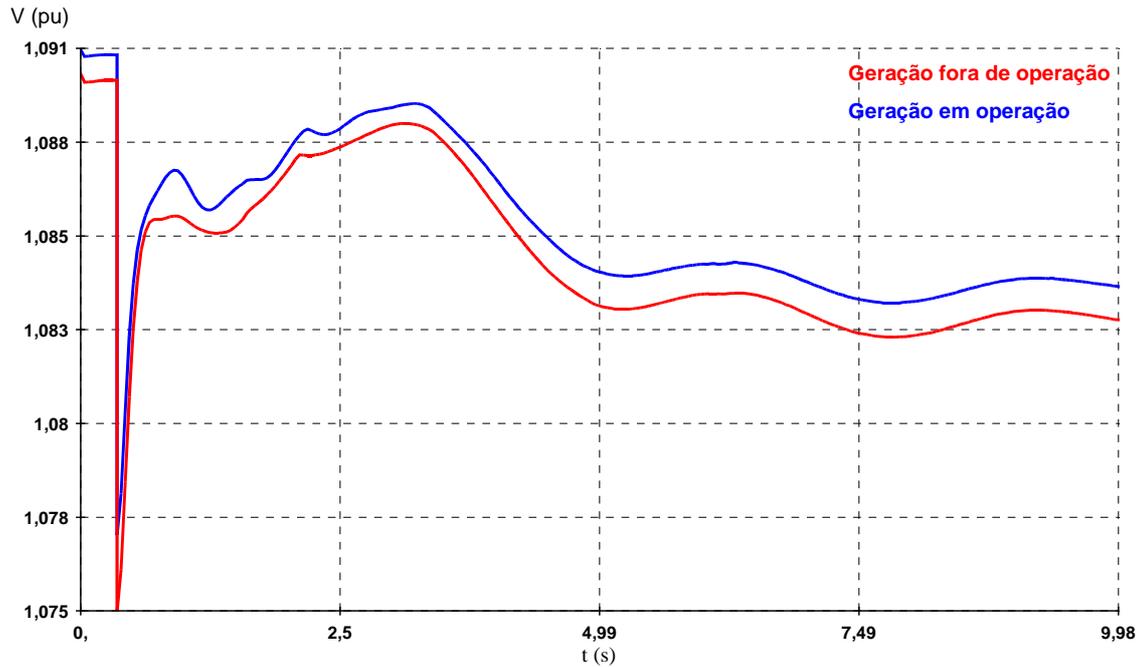


Figura 5.18 – Tensão na barra de 500 kV da subestação de Imperatriz (5590)

Com vistas à avaliação da estabilidade dos geradores da ALUMAR, foi simulado o caso em que ocorreu um curto-circuito com impedância equivalente de $0,22 \Omega$ na barra de 13,8 kV da Refinaria (8020). Primeiramente, foi aplicado um curto-circuito, sendo eliminado em 50 ms. Em seguida, foi aumentado o tempo de eliminação da falta gradativamente, em intervalos de 50 ms. Na Figura 5.19, é mostrado o comportamento da tensão nessa barra da ALUMAR para todos os casos:

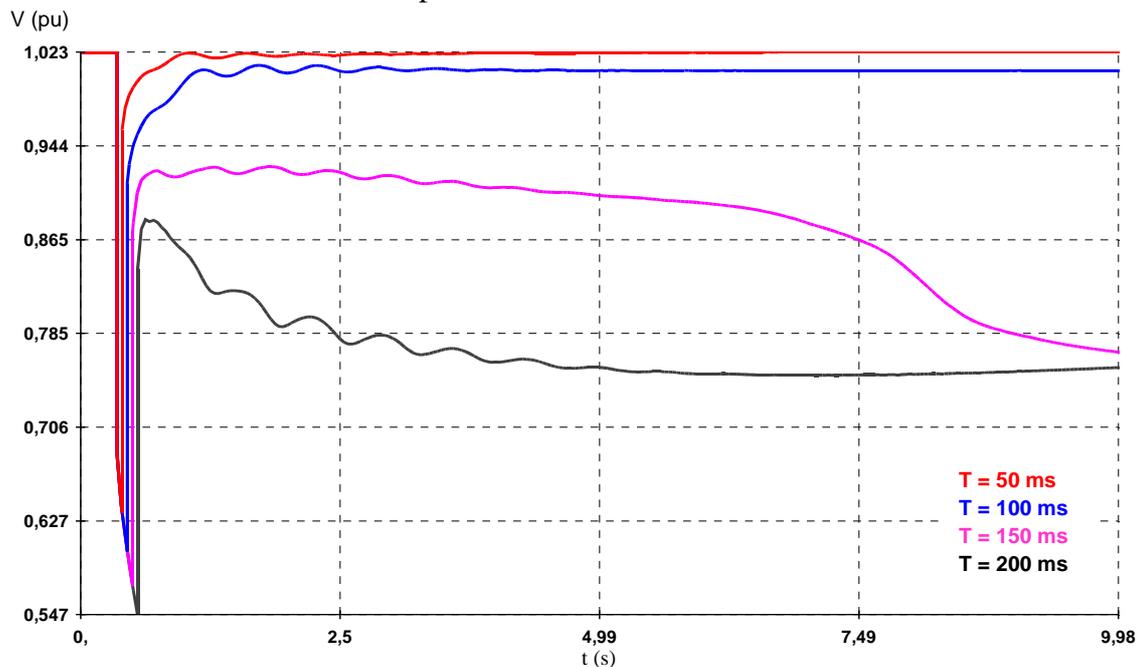


Figura 5.19 – Tensão na barra de 13,8 kV da Refinaria da ALUMAR (8020)

Avaliando a estabilidade de tensão, o sistema mostrou-se estável para as simulações de eliminação de falta nos tempos fixados em 50 ms e 100 ms. Já para as simulações com tempos de 150 ms e 200 ms, o sistema não conseguiu regenerar os níveis de tensão, mostrando-se instável, podendo a vir ocorrer um colapso de tensão. Sendo assim, para esse caso, as proteções instantâneas deveriam ser ajustadas para no máximo 100 ms, para que não houvesse risco de perda de estabilidade do sistema.

Na Figura 5.20, tem-se o comportamento da frequência para todos os tempos simulados:

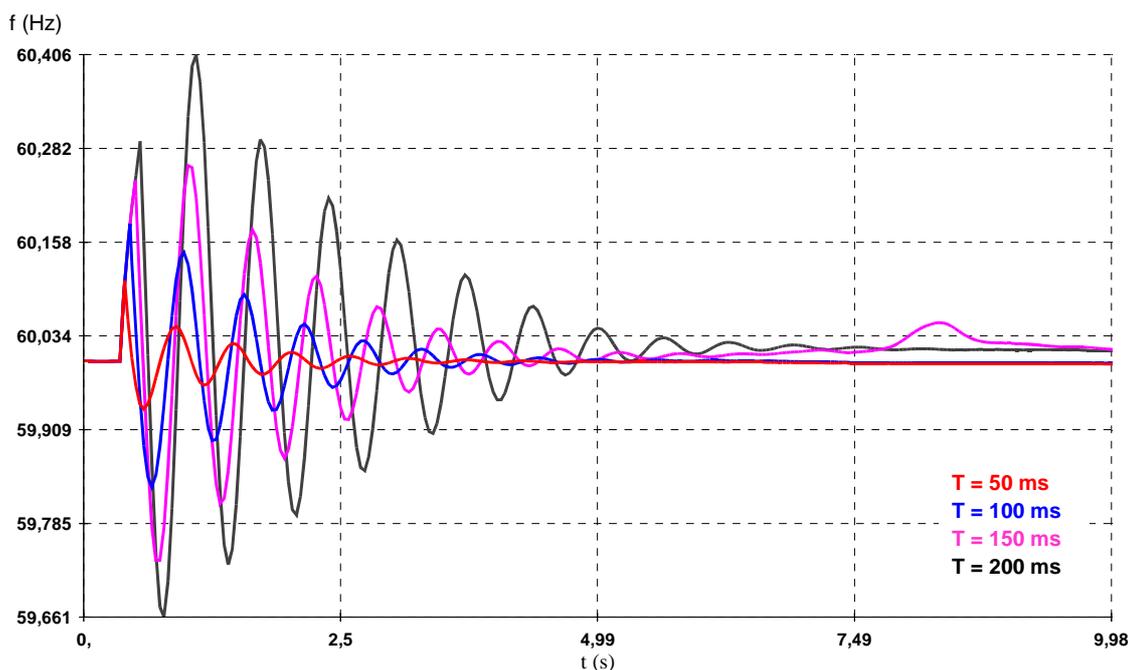


Figura 5.20 – Frequência do gerador 1 da ALUMAR

Outrossim, na avaliação da estabilidade angular dos geradores, o sistema mostrou-se estável para todas as simulações de eliminação de falta nos tempos fixados entre 50 ms e 200 ms.

Foram avaliadas, ainda, as condições para rejeição de carga dos geradores da ALUMAR. Para tanto, foi considerado que os dois geradores estavam despachando 30 MW cada um, e a carga total do sistema estava em torno de 80 MW, sendo importado da concessionária 20 MW. Na Figura 5.21, mostra-se a frequência nas barras da Refinaria após desligamento do circuito entre a barra 8200 da Redução e 8020 da Refinaria, deixando toda a Refinaria ilhada.

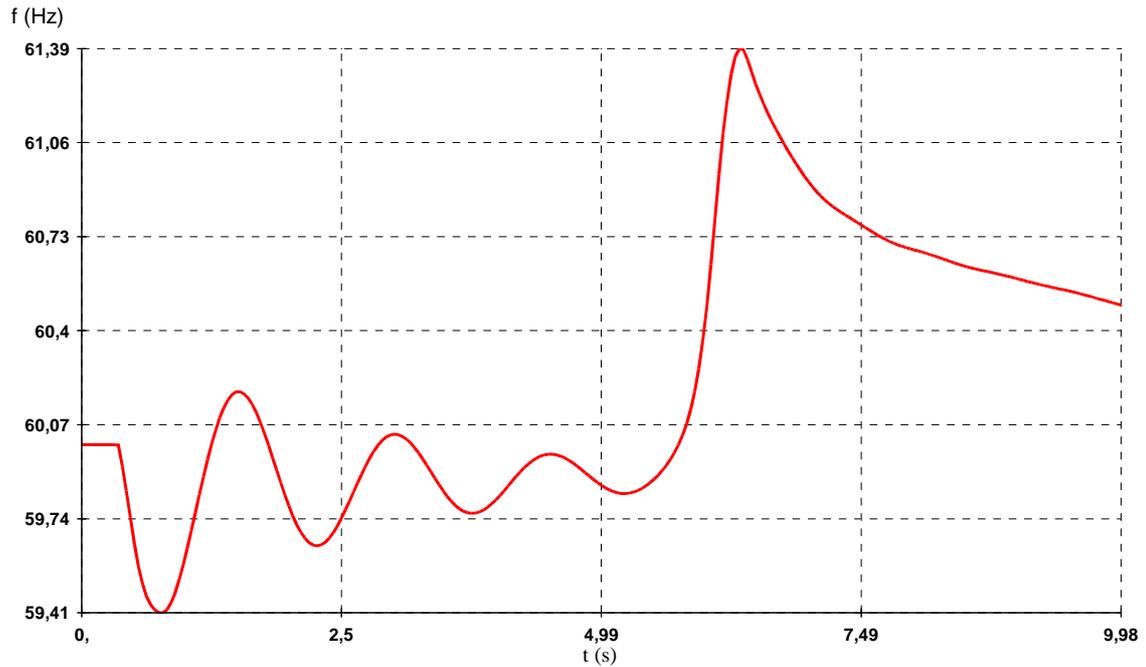


Figura 5.21 – Frequência do gerador 1 da ALUMAR

Convém observar que o sistema mostrou-se instável para o caso de interrupção do fornecimento da concessionária, sendo requerido um controle automático de alívio de carga. Na Figura 5.21, tem-se que em 0,74 segundos a frequência absoluta atingiu o valor de 59,4 Hz. Em seguida, os reguladores de velocidade dos geradores controlam a frequência, mas após 5 segundos a máquina perde o sincronismo acelerando. Além da instabilidade angular, o sistema mostrou-se instável ao se avaliar a tensão. Na Figura 5.22, é mostrado o comportamento da tensão nas 5 barras da Refinaria. É relevante salientar que, a tensão afundou gradativamente e, após aproximadamente 5 segundos, o sistema entrou em colapso, uma vez que a excitatriz da máquina limitou a corrente de campo, fazendo com que o sinal de controle do regulador de tensão saturasse.

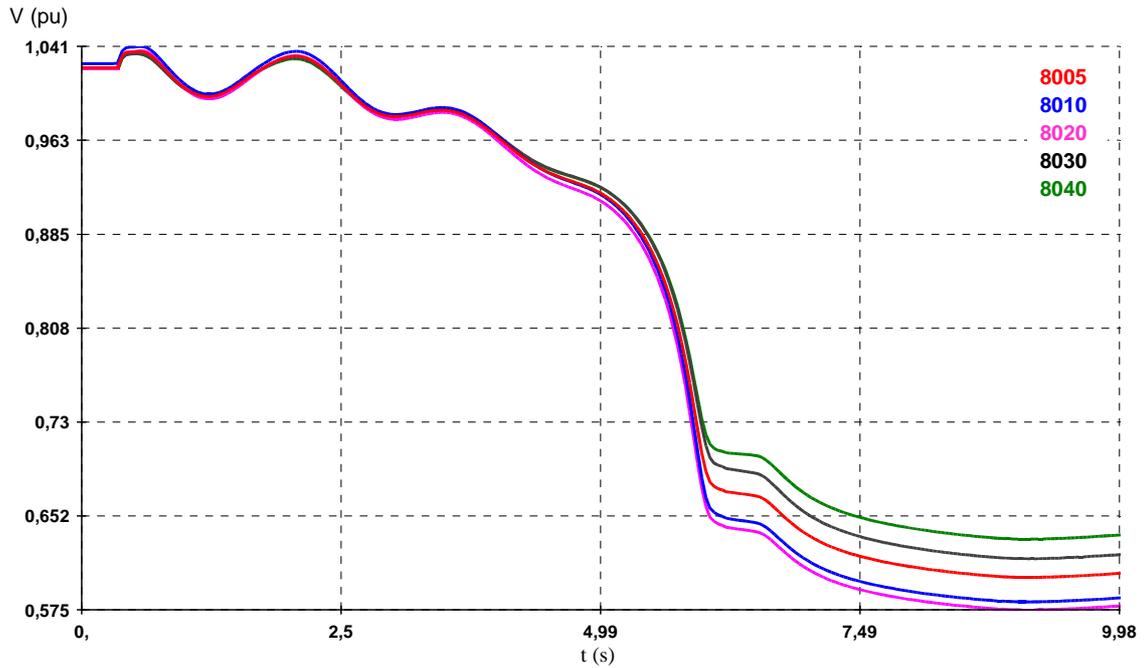


Figura 5.22 – Tensão nas barras de 13,8 kV da Refinaria da ALUMAR

Foi simulada a atuação de um controle automático de alívio de carga, para uma mesma sobrecarga do caso anterior, 20 MW, mas com uma rejeição de carga, após 1 segundo da interrupção do fornecimento da concessionária. Na Figura 5.23, mostra-se o comportamento da frequência da Refinaria.

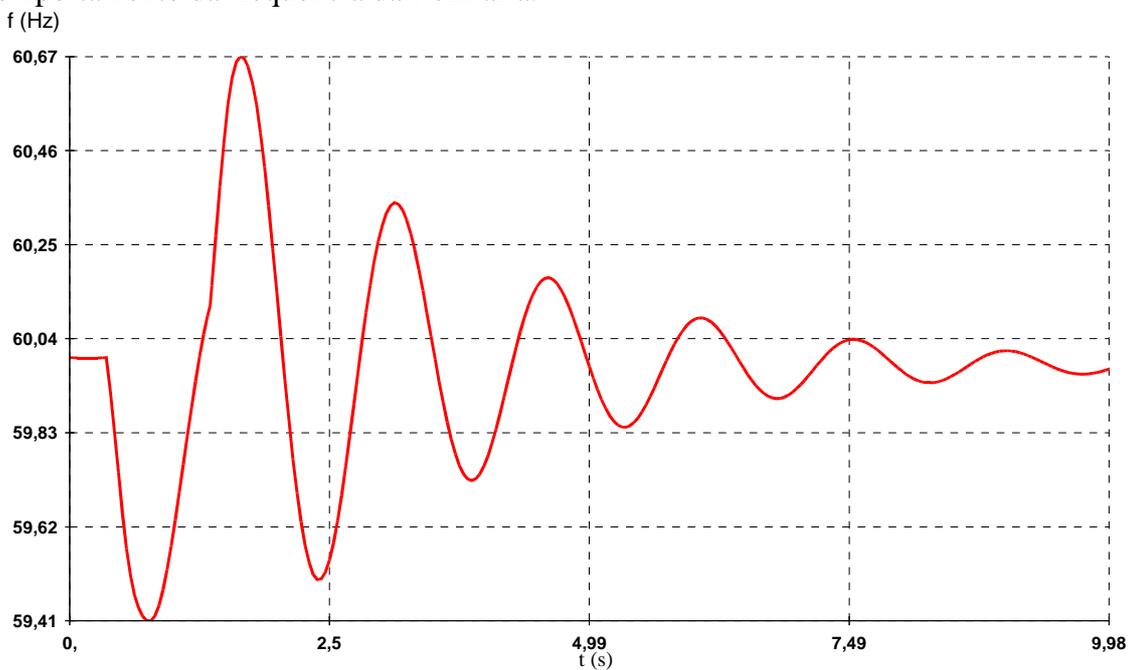


Figura 5.23 – Frequência do gerador 1 da ALUMAR

O sistema ficou estável após a rejeição de carga, demonstrando que o controle automático de alívio de carga atendeu aos requisitos. A tensão atingiu um mínimo de 99%, mas ocorreu uma sobretensão, conforme pode ser visto na Figura 5.24.

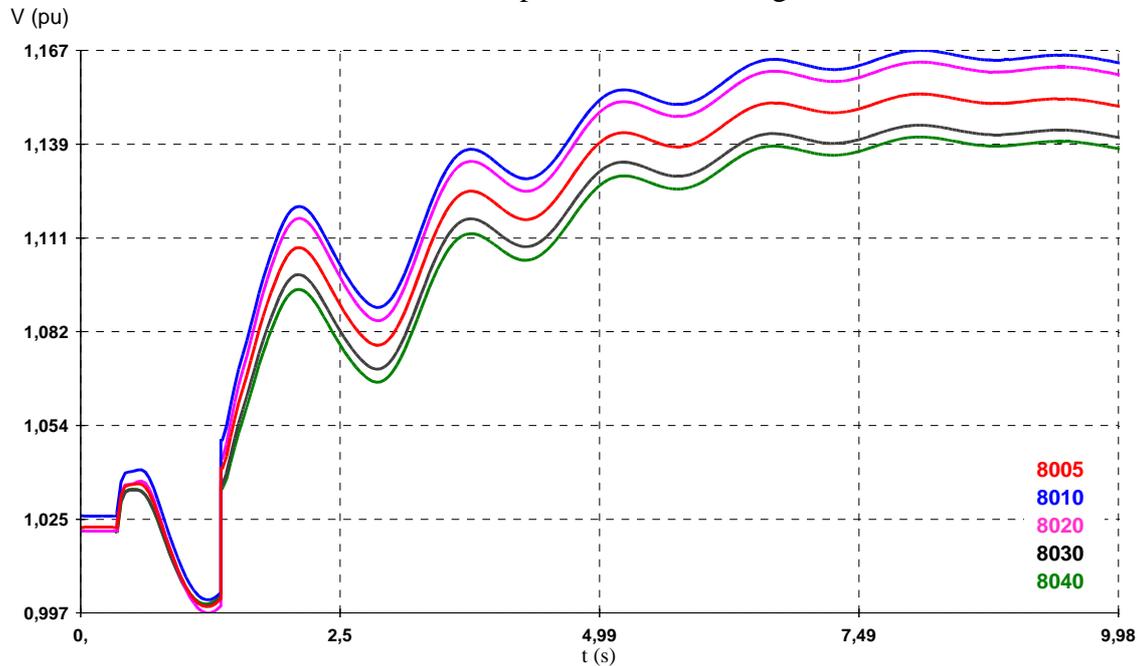


Figura 5.24 – Tensão nas barras de 13,8 kV da Refinaria da ALUMAR

Para atenuar a sobretensão apresentada após o alívio de carga, simulou-se o caso em que o controle automático de alívio de carga desligasse os dois bancos de capacitores instalados nas barras 8010 e 8020. A Figura 5.25 mostra o comportamento da tensão realizando o alívio de carga com os bancos ligados e com os bancos desligados.

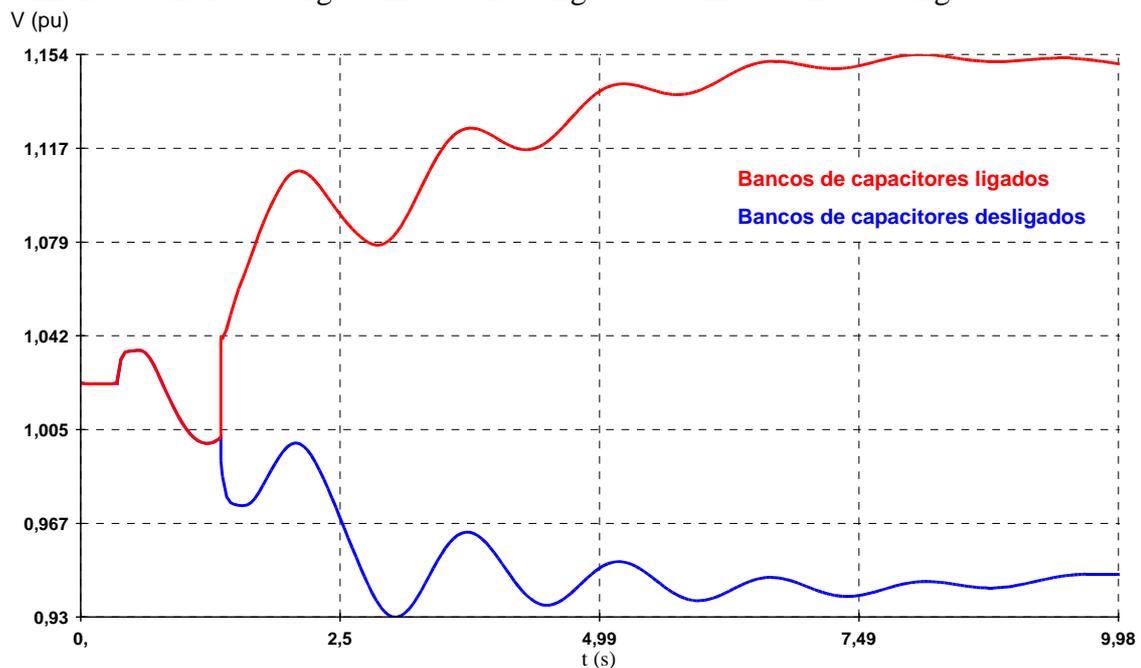


Figura 5.25 – Tensão na barra de 13,8 kV da Refinaria da ALUMAR

Evidencia-se, portanto, que, no caso em que os bancos de capacitores permaneceram ligados, ocorreu uma sobretensão e, quando os dois foram desligados, ocorreu uma subtensão. A solução mais viável foi desligar somente um banco de capacitores, durante a rejeição. Na Figura 5.26, tem-se um comparativo com os três casos:

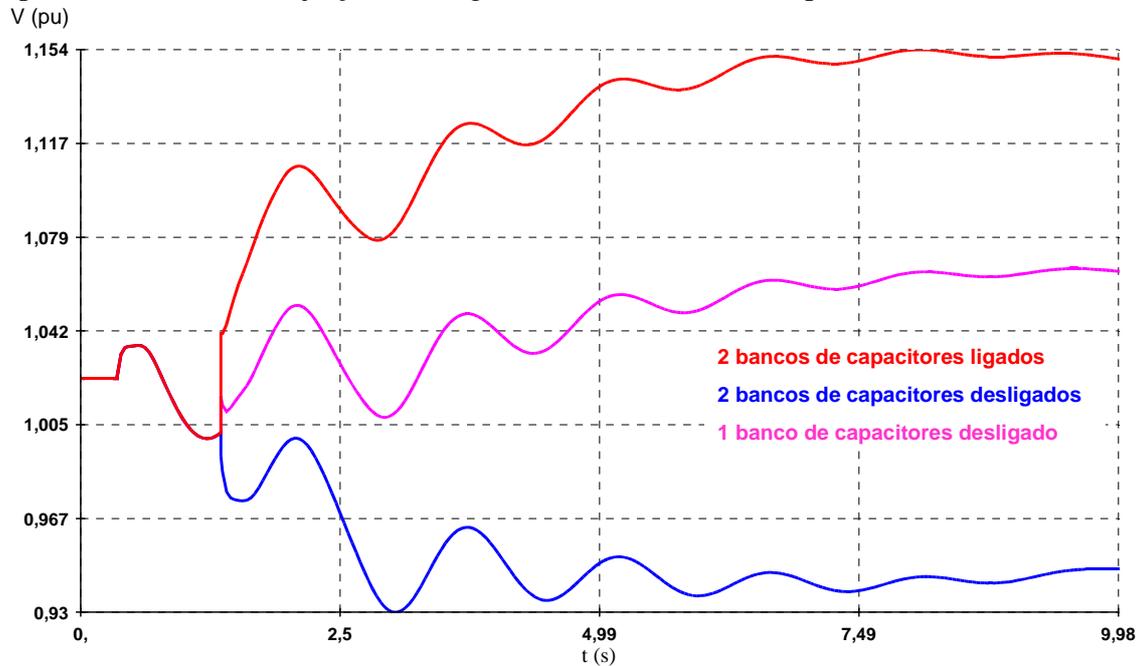


Figura 5.26 – Tensão na barra de 13,8 kV da Refinaria da ALUMAR

5.2.3. Análise da influência do SVC da subestação São Luís II na operação de geradores da ALUMAR

Após as análises do SVC da subestação São Luís II e da cogeração da ALUMAR operando isoladamente, no terceiro cenário serão analisados os dois sistemas operando em conjunto.

Os resultados em regime permanente nada diferem dos resultados já apresentados nos dois cenários anteriores, não sendo necessária nova discussão. Em regime dinâmico, primeiramente, foi simulado o caso do desligamento intempestivo de um dos dois circuitos de 500 kV entre as SE's de Presidente Dutra e São Luís II. Na Figura 5.27, tem-se uma comparação do comportamento da tensão na barra de 230 kV da SE São Luís II para os seguintes casos:

- Caso 1 – SVC desligado e cogeração fora de operação
- Caso 2 – SVC ligado e cogeração fora de operação
- Caso 3 – SVC desligado e cogeração em operação
- Caso 4 – SVC ligado e cogeração em operação

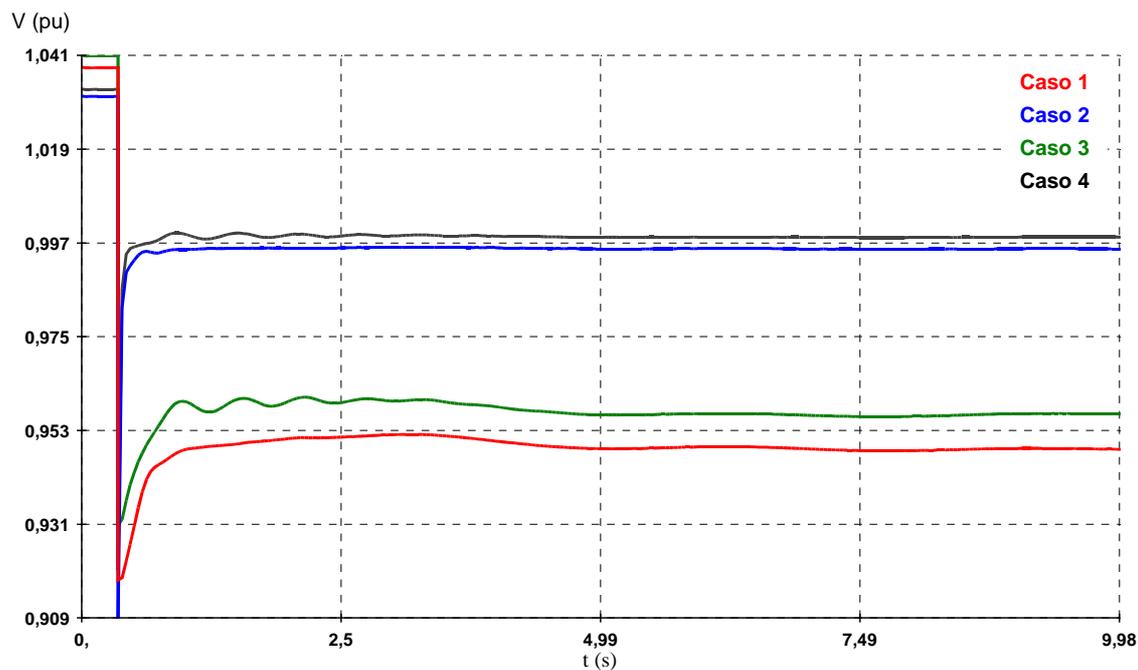


Figura 5.27 – Tensão na barra de 230 kV da SE São Luís II (5551)

Percebe-se, assim, que, para os casos em que o SVC da subestação São Luís II estava ligado (2 e 4), houve, após a perturbação, uma melhora considerável da tensão. O Comportamento similar foi observado no barramento de 34,5 kV da Linha de Cubas I, conforme os resultados na Figura 5.28. Essa comparação destaca a importância do SVC da subestação São Luís II para o controle de tensão na área Maranhão.

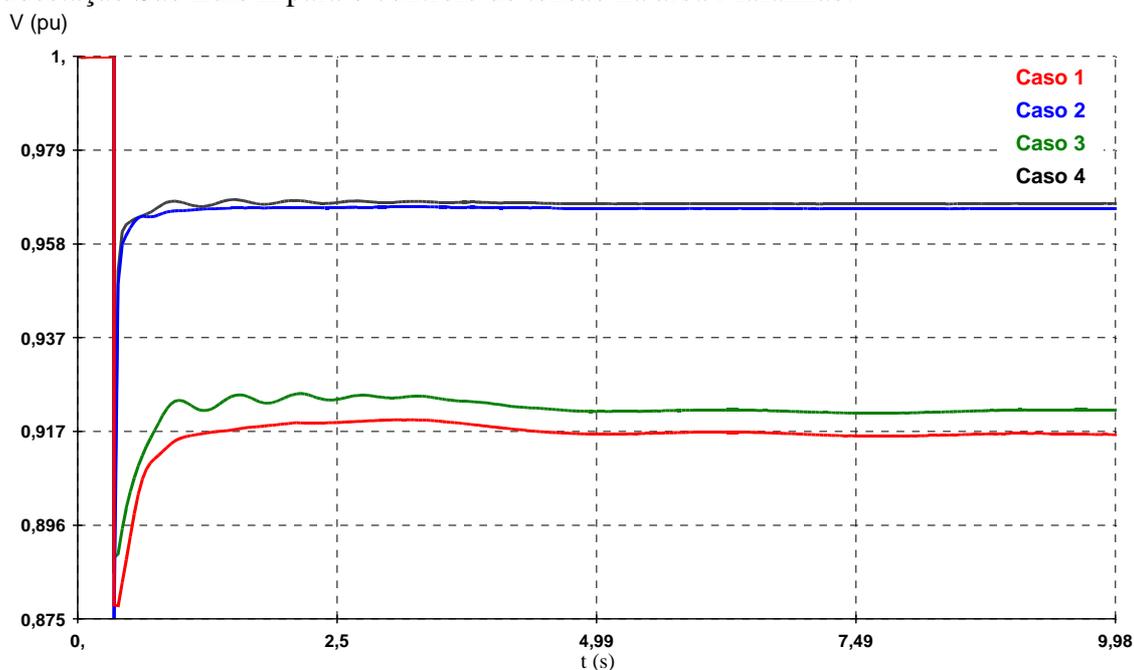


Figura 5.28 – Tensão na barra de 34,5 kV da Linha de Cubas I da ALUMAR (8001)

Na barra da Refinaria, os melhores resultados também foram obtidos nos casos em que o SVC estava em operação, sendo que, no caso 4 – cogeração em operação – a tensão se estabilizou no seu valor nominal, conforme resultados mostrados na Figura 5.29.

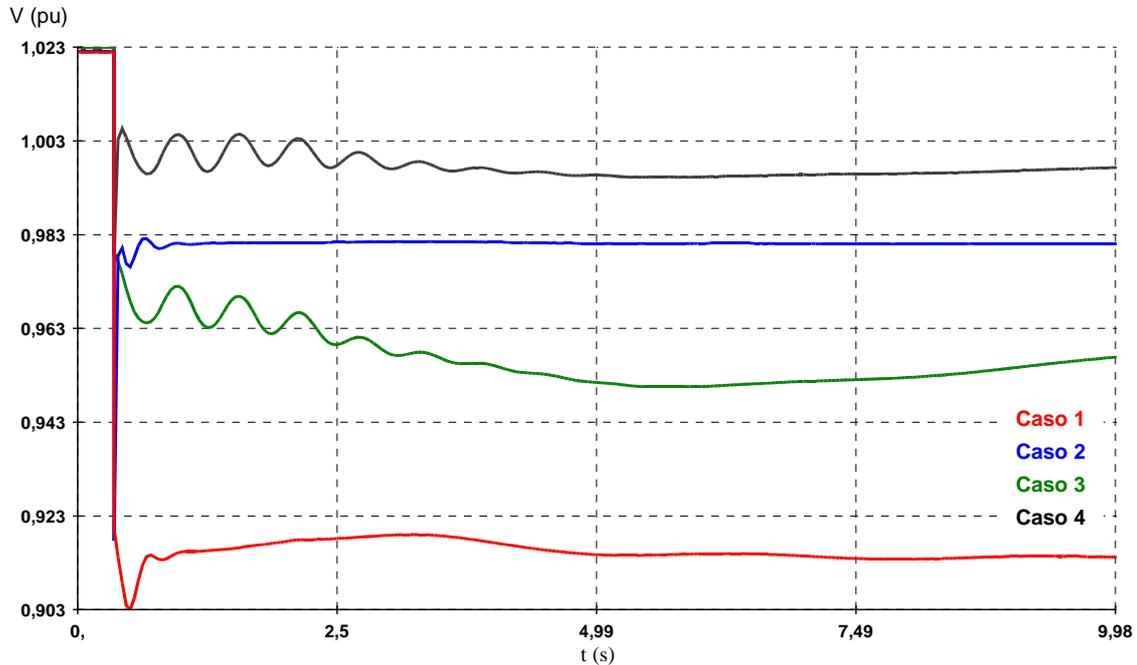


Figura 5.29 – Tensão na barra de 13,8 kV da Refinaria da ALUMAR

Essa simulação mostrou que os geradores da ALUMAR também contribuem para a melhoria da tensão, controlando a tensão nas barras eletricamente próximas às que eles estão instalados e diminuindo o carregamento dos circuitos de transmissão. Foi avaliada, ainda, a tensão nas barras das subestações de Presidente Dutra e Imperatriz, conforme mostrado nas Figuras 5.30 e 5.31.

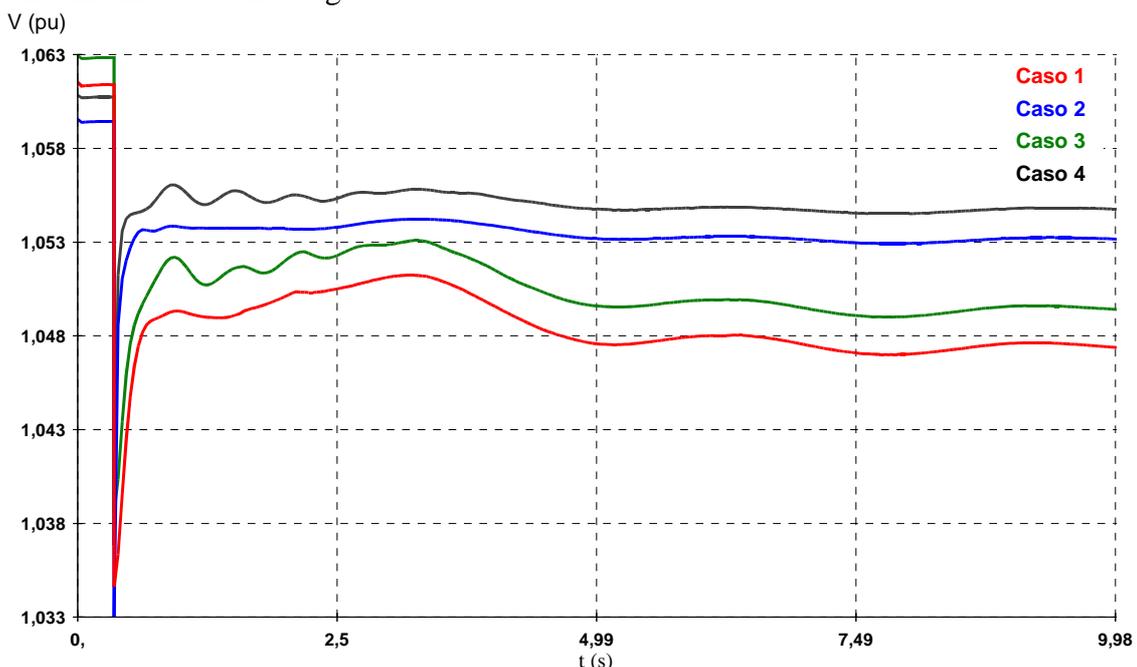


Figura 5.30 – Tensão na barra de 500 kV da subestação Presidente Dutra (5580)

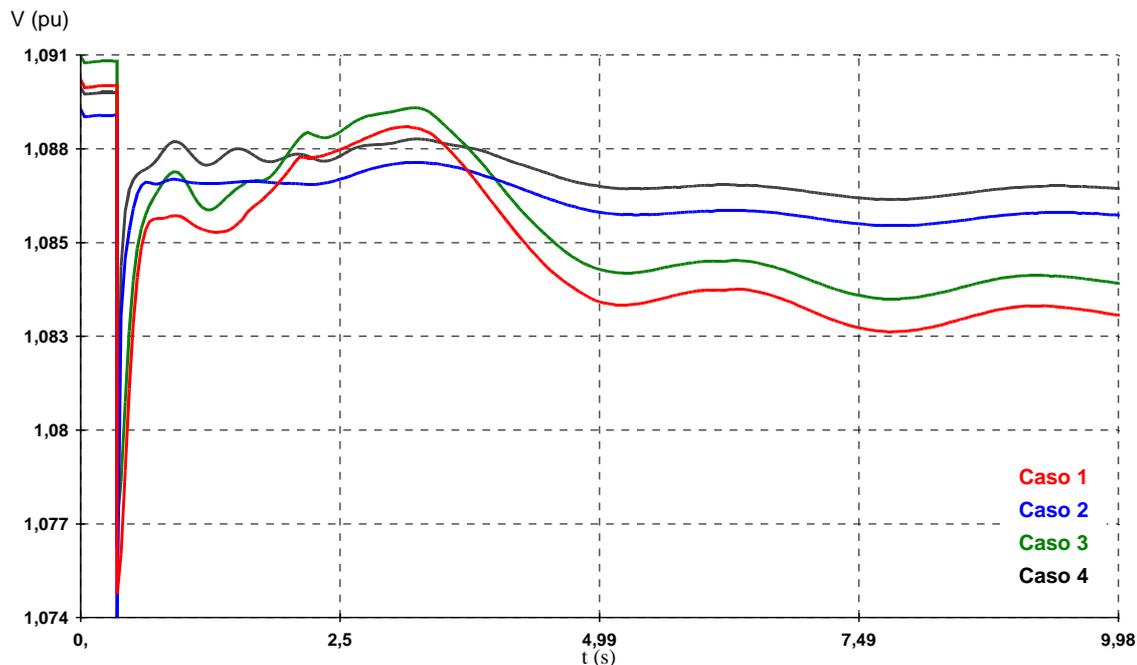


Figura 5.31 – Tensão na barra de 500 kV da subestação de Imperatriz (5590)

Os geradores adquiridos pela ALUMAR possuem uma grande vantagem, que é o baixo fator de potência e, conseqüentemente, uma larga faixa de potência reativa para controlar a tensão nas barras. Na Figura 5.32, mostra-se a potência reativa injetada pelos geradores na barra para controlar a tensão:

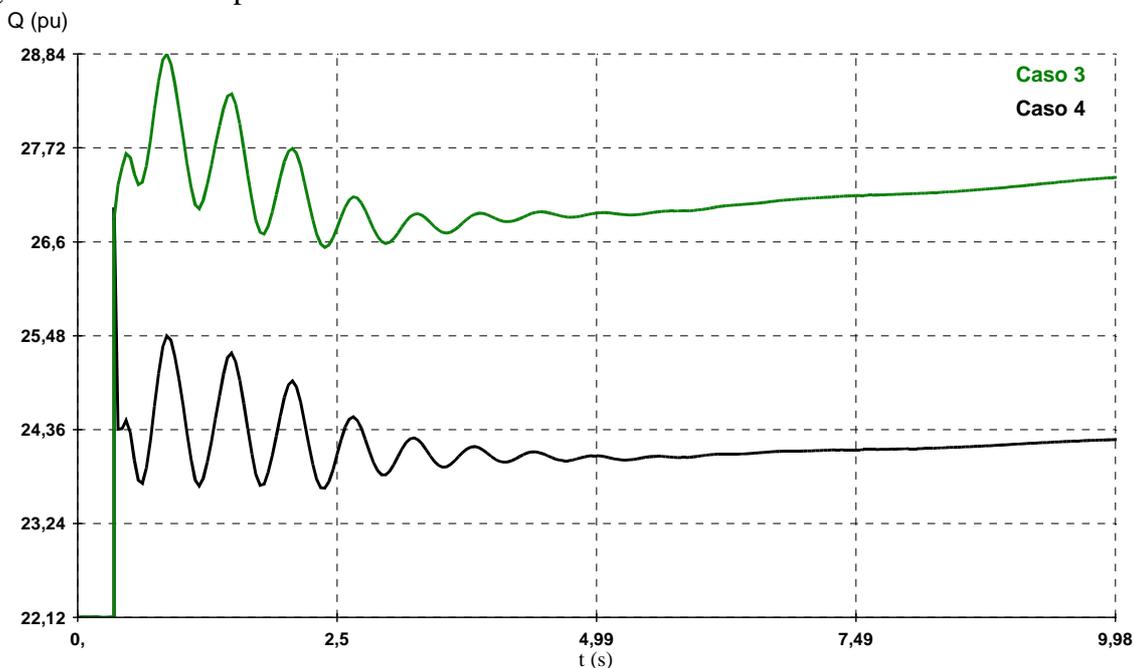


Figura 5.32 – Potência reativa do gerador 1 da Refinaria da ALUMAR (8030)

No caso em que o SVC estava fora de operação, caso 3, o gerador injetou a potência reativa disponível na barra, controlando a tensão na barra sem que perdesse a

estabilidade. No caso em que o SVC está em operação, caso 4, o gerador injetou menos potência reativa na barra, melhorando ainda mais a regulação de tensão.

O outro caso simulado foi o desligamento das três Linhas de Cubas da ALUMAR simultaneamente. Os resultados mostrados nas Figuras 5.33 e 5.34 indicam o comportamento da tensão na barra 230 kV da subestação São Luís II e na barra de 13,8 kV da Refinaria da ALUMAR:

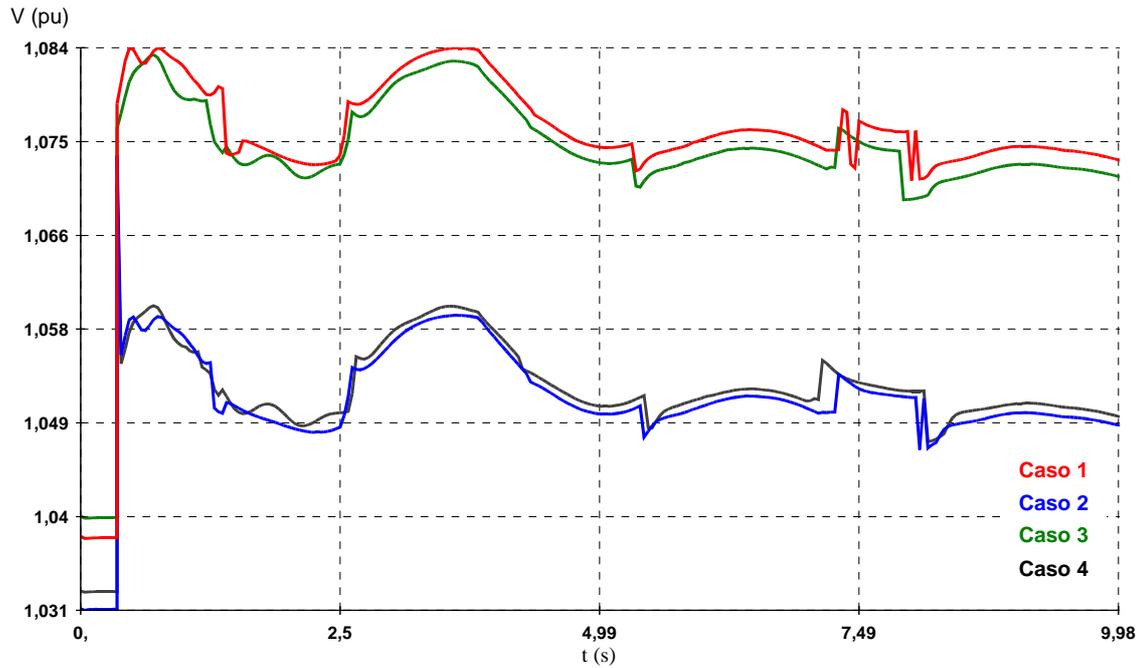


Figura 5.33 – Tensão na barra de 230 kV da SE São Luís II (5551)

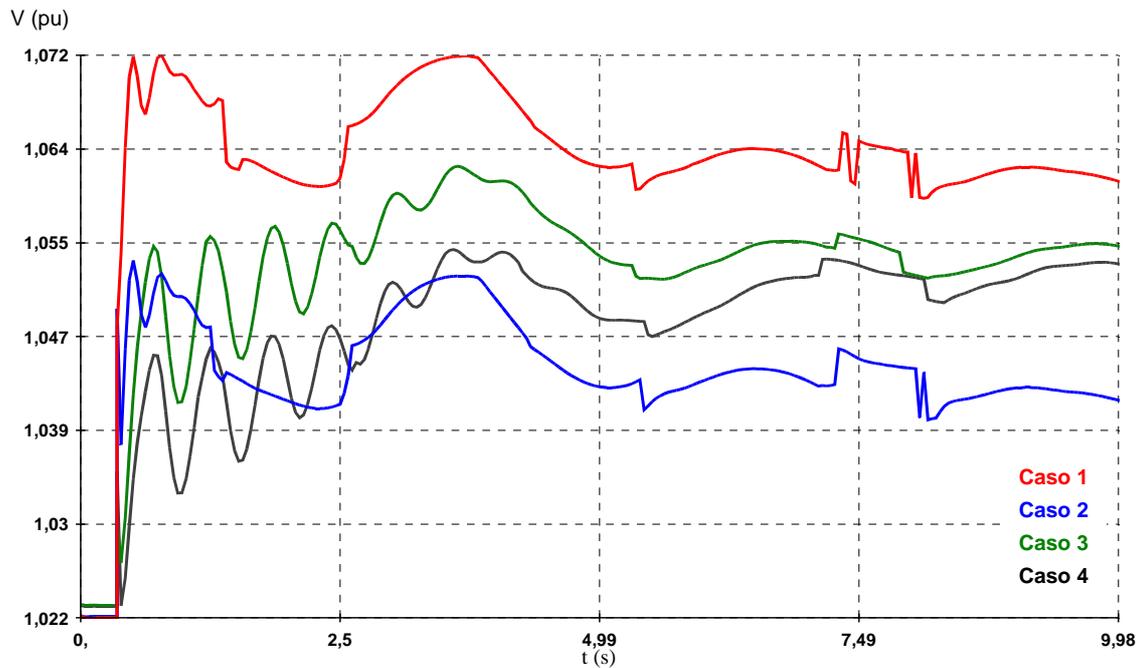


Figura 5.34 – Tensão na barra de 13,8 kV da Refinaria da ALUMAR (8020)

Nas simulações em que o SVC de São Luís II estava em operação, a tensão foi controlada dentro de limites aceitáveis. Já no caso em que somente os geradores da ALUMAR estavam contribuindo para o controle de tensão, ocorreu sobretensão.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisada a operação do sistema elétrico do consumidor industrial ALUMAR com cogeração frente à operação conjunta de um Controlador FACTS do tipo SVC.

Este trabalho contribuiu, com uma proposta de melhorias no modelo da carga do consumidor industrial ALUMAR. Os resultados confirmaram a adequação do modelo proposto para representação dos fenômenos dinâmicos associados à carga da ALUMAR e tais melhorias, validadas e aprovadas pelo Operador Nacional do Sistema, foram incluídas na nova revisão dos arquivos do banco de dados disponibilizados pelo ONS.

Os resultados das simulações, para a análise da influência dos cogeneradores e do SVC, mostraram a contribuição da cogeração e do SVC para o controle de tensão e para a melhoria da estabilidade eletromecânica do Sistema Interligado Nacional, principalmente na área do Maranhão. O SVC revelou-se como um equipamento que contribui, significativamente, para o controle de tensão, uma vez que possui uma larga faixa de controle. Já os cogeneradores da ALUMAR têm sua contribuição, para o controle de tensão, limitada às barras eletricamente próximas da Refinaria.

As questões relacionadas à análise da influência do Controlador FACTS do tipo SVC na operação da cogeração do sistema elétrico da ALUMAR são bastante abrangentes, e a contribuição do presente trabalho, nesse caso, é apenas inicial, impondo-se, dessa forma, uma investigação mais profunda concernente aos aspectos abordados ao longo desse trabalho.

Além do que foi aqui exposto, podem-se citar outros aspectos relevantes, técnicos e econômicos, resultantes da:

- Avaliação dos ajustes dos reguladores de tensão, de velocidade e o estabilizador dos geradores, aqui propostos, após a entrada em operação da cogeração;
- Avaliação, junto à ELETRONORTE, da proteção de bloqueio por subtensão do SVC da subestação São Luís II, a fim de que possa otimizar seu tempo de resposta;

- Realização de estudos investigativos internos à ALUMAR a fim de garantir que determinados equipamentos críticos não desliguem até que o SVC de São Luís regule a tensão do sistema;
- Realização de estudos de viabilidade econômica para substituição do combustível das caldeiras, por combustíveis mais baratos e limpos;

Como consequência, a cogeração da ALUMAR irá reduzir, consideravelmente as perdas de produção ocasionadas por interrupção no fornecimento de energia da concessionária, assegurando a continuidade operacional da Refinaria da ALUMAR nessas condições. Além disso, a cogeração possibilitará reduzir o custo de produção da alumina e eliminar as incertezas do mercado de energia elétrica brasileiro, principalmente em períodos de racionamento de energia elétrica.

ANEXOS

ANEXO A – Arquivo ALUMAR.PWF atualmente disponibilizado pelo ONS com as atualizações propostas nessa dissertação

```
(
(
    Modificação da Carga da ALUMAR
(
    Atualizada com informações fornecidas pela ALUMAR em 31/03/06
(
DBAR
(
    Carga da ALUMAR se divide em:
(
    Linhas de Cubas de 756MW (L1=218MW, L2=266MW e L3=272MW)
(
    Serviço Auxiliar de 34MW
(
    Refinaria de 35MW
(
    Total de 825MW
(
    Sendo 69MW (Serviço Auxiliar e Refinaria) incluídas na barra (5551) de São
Luiz
(
(No) O TB( nome )G( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)( Bc)( Pl)( Ql)( Sh)(A)(Vf)
(5551 M FS.LUISII-23041022 112.4 47.1284.9611014
8001 M KALUMAR-L103491000 19.2611000
8002 M KALUMAR-L203490961 19.2611000
( tensão reduzida para facilitar a convergência
8003 M KALUMAR-L303490700 19.2611000
9999
DELO
(
( Valores de potência não podem ser modificados
( Estes valores são utilizados como base para o cálculo do
( conversor. O aumento de carga deve ser feito no cartão DCCV
(
(No) O ( V ) ( P ) ( Identificacao ) M
81 M 1. 265. Alumar-L1 N
82 M 1. 265. Alumar-L2 N
83 M 1. 265. Alumar-L3 N
9999
DCBA
(No) O TP( Nome )G( Vd) ( Rs)(Elo
8011 M +RET-L1 0.918 81
8012 M 1+INV-L1 .2938 81
8013 M ONEUTRA 0. 81
8014 M ONEUTRA 0. 81
8021 M +RET-L2 1.125 82
8022 M 1+INV-L2 .3600 82
8023 M ONEUTRA 0. 82
8024 M ONEUTRA 0. 82
8031 M +RET-L3 1.152 83
8032 M 1+INV-L3 .3686 83
8033 M ONEUTRA 0. 83
8034 M ONEUTRA 0. 83
9999
DCLI
( Os valores de resistência e Indutância depende da quantidade de cubas de cada
linha de produção,
( estes valores só podem ser modificados se aumentar ou diminuir a quantidade de
cubas de cada linha.
(
(De) O (Pa)Nc P ( R )( L ) (Cn)
8011 M 8012 1 F .002711.0127
8021 M 8022 1 F .003331.2410
8031 M 8032 1 F .003411.2708
9999
DCNV
(No) O (CA) (CC) (EL) T p (Ino) (Xc ) (Vfs) (Snt) (Rra) (Lra) (CCC) Fr
8011 M 8001 8011 8013 R 1 265E3 5.87 .700 225.7 0.
8012 M 8004 8012 8014 I 1 265E3 1. 1.000 265. 0.
8021 M 8002 8021 8023 R 1 265E3 6.81 .896 328.1 0.
8022 M 8004 8022 8024 I 1 265E3 1. 1.000 265. 0.
```

```

8031 M 8003 8031 8033 R 1 265E3 7.61 .896 367.8 0.
8032 M 8004 8032 8034 I 1 265E3 1. 1.000 265. 0.
9999
DCCV
( Para aumentar o valor de potência, modificar o valor especificado, que
corresponde a carga em MW para cada
( linha de cuba
( Linha de cubas 1 Vsp = 218MW
( Linha de cubas 2 Vsp = 266MW
( Linha de cubas 3 Vsp = 272MW
( Total das linhas de cubas de 756MW
(No) O F C (Vsp) (Marg (IMax (Dsp) (Dtn) (Dtm) (Tmn) (Tmx) (S (Vmn (Tmh) (Ttr)
8011 M P 218.0 99.99 0. 0. 0. .01 100. 100. 1.
8012 M F P 218.0 .1 99.99 15. 0. 90. .01 100. 100. 1.
8021 M P 266.0 99.99 0. 0. 0. .01 100. 100. 1.
8022 M F P 266.0 .1 99.99 15. 0. 90. .01 100. 100. 1.
8031 M P 272.0 99.99 0. 0. 0. .01 100. 100. 1.
8032 M F P 272.0 .1 99.99 15. 0. 90. .01 100. 100. 1.
9999
exlf
DBAR
( tensão aumento da tensão para facilitar a convergência
(No) O TB( nome )G( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)( Bc)( Pl)( Ql)( Sh)(A(Vf)
8003 M KALUMAR-L303490800 19.2611000
9999
exlf
DBAR
( tensão final do conversor 3
(No) O TB( nome )G( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)( Bc)( Pl)( Ql)( Sh)(A(Vf)
8003 M KALUMAR-L303490983 19.2611000
9999
exlf
FIM

```

ANEXO B - Artigo publicado no XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XIX SNTPEE (SILVA JÚNIOR, 2007).

GRUPO IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA – GAT

MODELO DA CARGA DO CONSUMIDOR INDUSTRIAL ALUMAR PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE NO DOMÍNIO DO TEMPO

Gilson Soares da Silva Júnior *
ALUMAR

Vicente Leonardo Paucar
Universidade Federal do Maranhão

Venilton Rodrigues de Oliveira
ONS

RESUMO

Nesse trabalho apresenta-se uma proposta de adequação da modelagem de carga do consumidor industrial ALUMAR, para estudos de fluxo de potência e de estabilidade no domínio do tempo, implementada nos programas ANAREDE e ANATEM. Em virtude da grande demanda e da localização da ALUMAR no Sistema Interligado Nacional (SIN), torna-se necessário modelar suas cargas com bastante precisão, nos estudos que envolvam o sistema elétrico Norte-Nordeste. Além disso, a necessidade de realização de simulações mais detalhadas, principalmente para os casos de defeitos internos a indústria, tornou-se necessário implementar melhorias na modelagem disponível nos arquivos do banco de dados disponibilizado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS).

PALAVRAS-CHAVE

ALUMAR, modelagem de carga, ANAREDE, ANATEM, estabilidade no domínio do tempo, estabilidade em regime permanente, estabilidade transitória, estabilidade de tensão.

1- INTRODUÇÃO

Atualmente, no Brasil, há duas grandes redes interligadas: os sistemas interligados Sul/Sudeste/Centro-Oeste e Norte/Nordeste, tendo este último, linhas de transmissão de mais de 2000 km, em 500 kV. A interligação dessas duas grandes redes é motivo de vários estudos de estabilidade angular, estabilidade de frequência e estabilidade de tensão, uma vez que qualquer instabilidade nesse trecho afeta principalmente as áreas do sistema Norte-Nordeste que possuem linhas de transmissão extensas. Uma dessas áreas afetadas é o sistema de transmissão que alimenta a ilha de São Luís, a capital do Estado do Maranhão. Os problemas de instabilidade, nessa região, ocorrem quando uma das duas linhas de transmissão de 500 kV, que alimenta São Luís, é desligada, uma vez que nessa condição a outra linha fica sobrecarregada. Além da grande São Luís, que hoje tem uma demanda de aproximadamente 200 MW, essas duas linhas de transmissão em 500 kV alimentam uma das maiores plantas de produção de alumina e alumínio do mundo, a ALUMAR, com uma demanda total de 825 MW.

A ALUMAR é uma indústria de produção de alumina e alumínio, sendo um consórcio formado pelas empresas Alcoa, BHPBilliton, Alcan, e Abalco. Em virtude da grande demanda e da localização da ALUMAR no Sistema Interligado Nacional (SIN), torna-se necessário modelar suas cargas com bastante precisão, nos estudos que envolvam o sistema elétrico Norte-Nordeste. Além disso, a necessidade de realização de simulações mais detalhadas, principalmente para os casos de defeitos internos à indústria, torna-se necessário implementar melhorias na modelagem disponível nos arquivos do banco de dados disponibilizado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). Esse modelo foi proposto em 1999 pelo CEPTEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), sendo que desse ano até os dias atuais, a indústria sofreu modificações tais como mudança de parâmetros de processo e algumas expansões.

Baseado nisso, o presente artigo tem como objetivo descrever as melhorias realizadas na modelagem de carga da ALUMAR, implementadas nos programas ANAREDE e ANATEM, as quais são utilizadas para representação da carga em estudos de fluxo de potência, estabilidade, planejamento e operação. Primeiramente será feita uma breve descrição da indústria ALUMAR, destacando-se as características da sua carga. Em seguida, serão

descritos os modelos de cargas anteriormente disponíveis no banco de dados do ONS e o modelo proposto neste trabalho. Por fim, será feita uma comparação dos resultados de simulações utilizando os dois modelos, demonstrando as vantagens do novo modelo e também uma avaliação do perfil de tensão frente a distúrbios no SIN.

2 - ASPECTOS DO CONSUMIDOR INDUSTRIAL ALUMAR

2.1 - O CONSUMIDOR INDUSTRIAL ALUMAR

A ALUMAR é considerada um dos maiores complexos industriais de alumina e alumínio do mundo, atualmente com uma produção anual de alumina de aproximadamente 1,5 milhões de toneladas e de 450 mil toneladas de alumínio. A fábrica está subdividida em duas áreas, a Redução e a Refinaria. Na Refinaria, ocorre o processo de refino da bauxita, tendo como produto final a alumina. O processo para extrair alumina a partir da bauxita é conhecido como “Processo Bayer”, processo hidro-metalúrgico que consiste de cinco etapas: moagem, digestão, clarificação, precipitação e calcinação. A Redução recebeu esse nome devido ao processo de redução eletrolítica da alumina para a produção de alumínio que ocorre no local. Esta redução ocorre da seguinte forma: a alumina é colocada no interior de cubas eletrolíticas, que são ligadas em série por corrente contínua de aproximadamente 230 kA e alimentadas por tensão de apenas 4,5 V, sendo 2V para o processo eletrolítico, 2V para manter a temperatura da cuba em torno de 1000 °C e 0,5V corresponde a queda de tensão devido às perdas internas das cubas e as perdas nos barramentos.

A energia elétrica fornecida a ALUMAR, provém da subestação São Luís II da ELETRONORTE. Nessa subestação é realizada a redução do nível de tensão de 500 kV para 230 kV e transmitida para a ALUMAR através de duas linhas de transmissão, chamadas de Circuito 1 (C1) e Circuito 2 (C2). No trecho entre a SE São Luís II e a ALUMAR, há uma bifurcação dos dois circuitos, indo dois para a Redução (Linhas 1 e 2) e dois para a Refinaria (Linhas 4 e 5). As Linhas 1 e 2 vão para a subestação principal da Redução, chamada de SE-112Y, e as Linhas 4 e 5 vão para a subestação principal da Refinaria chamada SE-112X.

A SE-112Y é responsável pelo fornecimento de energia às Salas de Cubas e aos circuitos auxiliares da Redução. Todos os circuitos auxiliares são alimentados por dois transformadores de 50 MVA de 230 kV / 13,8 kV. As Salas de Cubas são as principais cargas da indústria, correspondendo a aproximadamente 92% do consumo total. Como o processo de eletrólise necessita de corrente contínua e como o fornecimento para a ALUMAR é em corrente alternada (CA), é necessário fazer o rebaixamento, regulação e retificação. Para cada Sala de Cubas existe um transformador abaixador de 230 kV para 34,5 kV, com potências variando de 225 MVA até 343 MVA. Conectados em série com cada transformador abaixador, estão os transformadores reguladores de 34,5 kV / 34,5 kV \pm 10%, cuja função é controlar a tensão e a corrente na Sala de Cubas. Após o rebaixamento e a regulação é feita a retificação através de 6 pontes retificadoras à diodo, sendo cada uma com capacidade de 38 kA, 45 kA e 48 kA (6 pulsos), dependendo da Sala de Cubas, conectadas em paralelo de forma a garantir uma menor corrente circulando em cada ponte. Utilizam-se transformadores com conexões especiais (zig-zag ou delta expandido) para fornecer diferentes defasagens resultando em um cancelamento harmônico de corrente no primário. Além disso, paralelo aos retificadores existe um filtro de harmônicos de 19,2 MVar sintonizado para a 5ª ordem, cuja função é melhorar o fator de potência além da sua principal função. Para regulação do nível de tensão nas barras da ALUMAR e de algumas SE's da área do Maranhão, na SE-112Y estão instalados três bancos de capacitores em 230 kV, BC-1, BC-2 e BC-3, cada um solidário a uma Sala de Cubas. Existe ainda na barra de 230 kV da SE São Luís II mais dois bancos.

Já a alimentação elétrica da Refinaria é feita através da subestação SE-112X, que por sua vez alimenta cubículos de 13,8 kV, fornecendo assim energia elétrica aos transformadores das subestações internas à área da Refinaria, Porto e Retroporto. Para correção do fator de potência da Refinaria, estão instalados na barra de 13,8kV da SE-112X, dois bancos de capacitores de 12 MVar.

3- MODELO DE CARGA DA ALUMAR

3.1- O MODELO DE CARGA ANTERIOR

A modelagem da ALUMAR atualmente disponibilizada pelo ONS para os programas ANAREDE e ANATEM fornece uma representação do sistema CC das Salas de Cubas baseado em modelos de conversores CA-CC para transmissão em corrente contínua, sendo modelado tanto o comportamento estático quanto o dinâmico das cubas.

O comportamento dinâmico de cada cuba é basicamente representado por um circuito RL em série além de uma fonte de tensão constante. A resistência corresponde à dissipação de energia durante o processo de redução do alumínio, e a indutância é responsável (junto com a resistência) pela constante de tempo de decaimento da corrente CC quando a cuba é desenergizada. A fonte de tensão representa a tensão residual (V_{res}) após a interrupção de corrente pelos diodos (chamado efeito “pilha” decorrente do processo de eletrólise), permanecendo sempre constante, independentemente do ponto de operação em carga, variando somente com o número de células conectadas em cada linha de cubas.

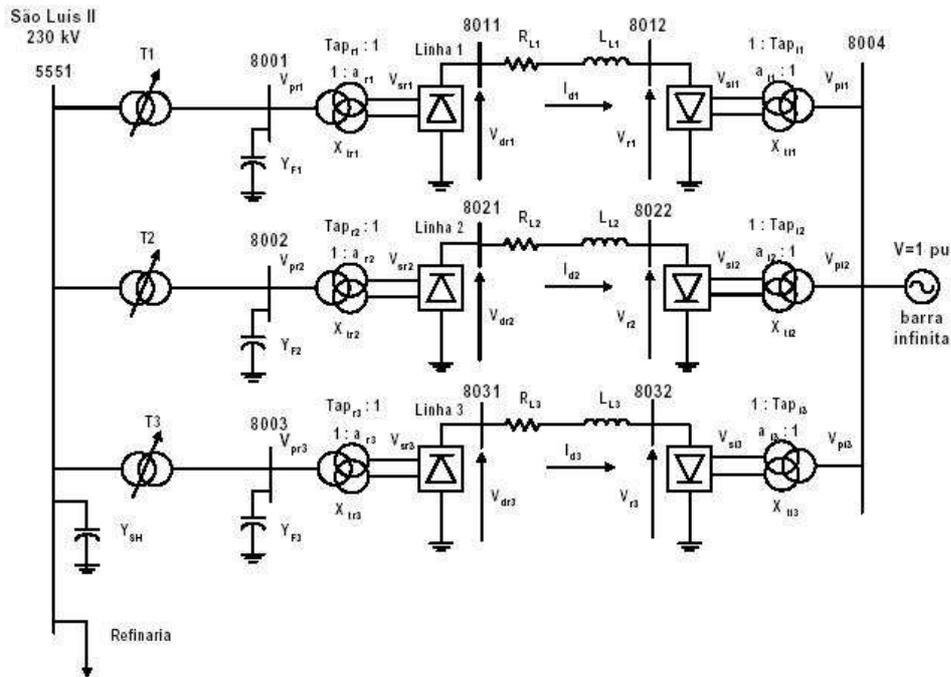


FIGURA 1 – Modelo de carga atual

Na Figura 1, é demonstrada a representação do sistema CA que alimenta a Alumar, o qual foi modelado considerando algumas simplificações, principalmente nas linhas de transmissão entre a SE São Luís II e a Alumar. As barras de São Luís II 230kV e ALUMAR 230kV são eletricamente muito próximas e, portanto, foram representadas por uma única barra (5551). Os bancos de capacitores presentes nas duas barras mencionadas foram somados e colocados como um “shunt” total na barra da SE São Luís II. Já a Refinaria e os circuitos auxiliares da Redução foram modelados como potência constante, ou seja, com P e Q fixos e colocados na barra de São Luís II 230kV. Nas barras de 34,5 kV CA que alimentam os conversores (8001, 8002 e 8003), foram colocados os filtros de harmônicos de 19,2 MVar para cada linha de cubas, na tensão de 1,0 pu. A barra 8004 é uma barra fictícia associada à representação das tensões residuais em cada Sala de Cubas.

3.2 - O MODELO DE CARGA PROPOSTO

A modelagem disponível nos arquivos do banco de dados disponibilizado pelo ONS foi proposta em 1999, sendo que desse ano até os dias atuais, a indústria sofreu modificações tais como mudança de parâmetros de processo e algumas expansões. Além disso, a necessidade de realização de simulações mais detalhadas, principalmente para os casos de defeitos internos à indústria, tornou-se necessário implementar melhorias em alguns aspectos na modelagem. As melhorias consistiram basicamente em modelar com mais detalhes o sistema de transmissão entre a ELETRONORTE e a ALUMAR e inserir um modelo mais adequado a Refinaria e aos circuitos auxiliares da Redução. No sistema CC, não houve alterações de componentes da modelagem, no entanto, foi necessário atualizar vários parâmetros de processo.

No sistema de transmissão, embora as barras da SE São Luís II e ALUMAR sejam eletricamente muito próximas foram criadas mais duas barras (8100 e 8200), separando os circuitos que alimentam cada Sala de Cubas. O Circuito 1 foi modelado como a barra 8100 e o Circuito 2 como a barra 8200. Os bancos de capacitores foram separados, de acordo com a potência em cada barra. Sendo assim, foram conectadas a essas barras os circuitos das Salas de Cubas conforme mostrado na Figura 2.

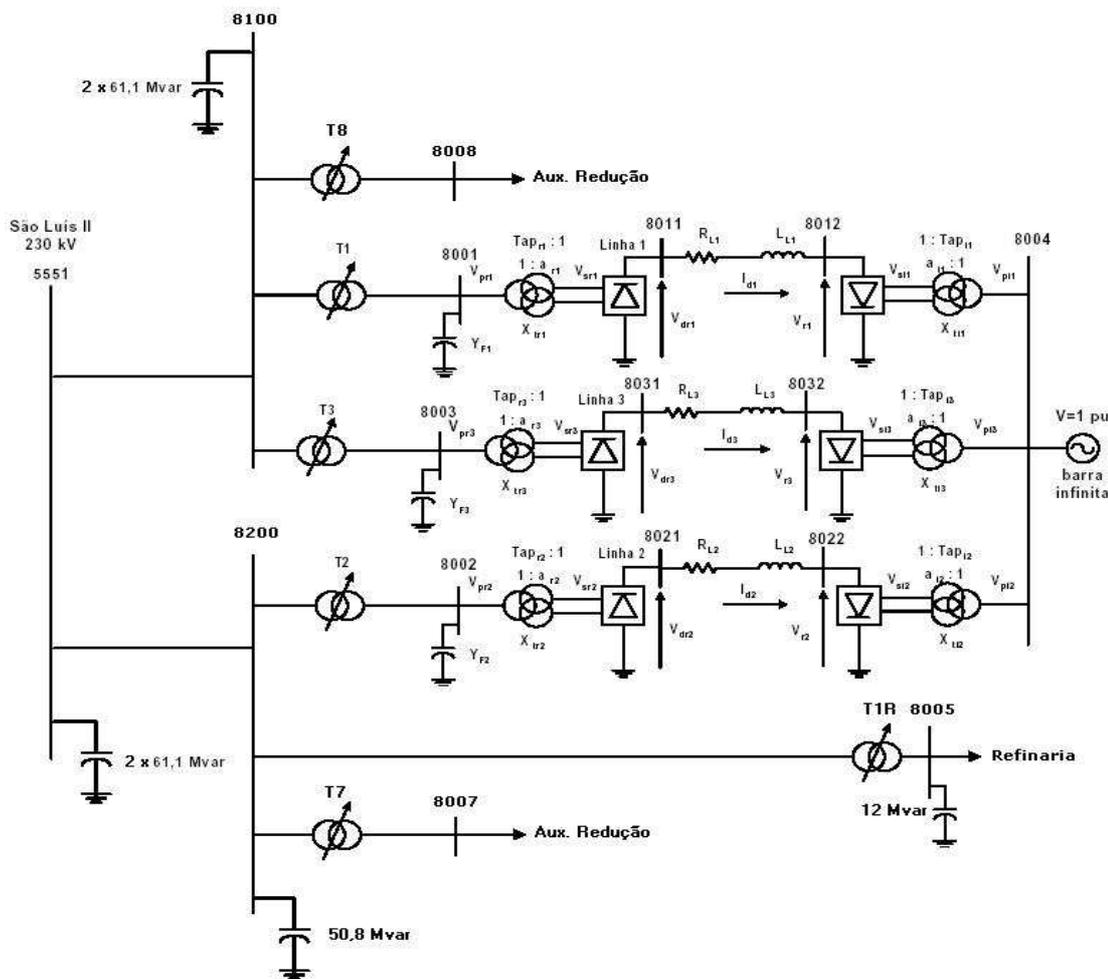


FIGURA 2 – Modelo de carga proposto

A carga da Refinaria e dos circuitos auxiliares da Redução é constituída, na sua grande maioria, por motores de indução com potências elevadas. Logo, a modelagem utilizada para a Refinaria e para os circuitos auxiliares da Redução foi representada por cargas tipo motores de indução, e não como modelos de potência constantes. Essa modelagem é de essencial importância na análise do comportamento do sistema, uma vez que os motores de indução apresentam alto consumo de potência reativa durante as condições em que há queda de tensão. Portanto, merecem cuidadosa consideração nos estudos de estabilidade, principalmente, quando parcelas significativas deste tipo de carga estão presentes em áreas críticas.

Durante simulações com os dados da modelagem anterior, foi observado que os valores de corrente nos elos CC e de potência em cada Sala de Cubas estavam incoerentes com os valores reais. Ao avaliar todos os dados da modelagem, foi verificado que os principais parâmetros tiveram que ser modificados. Primeiramente, foram feitas várias medições em situações normais de operação, durante transitórios eletromagnéticos no sistema e após desligamentos para avaliar os dados. A partir desses novos dados, pode-se calcular todos os parâmetros necessários tais como: tensão residual total, resistência total, a indutância total e a constante de tempo para cada Sala de Cubas, além das tensões especificadas em cada barramento, os ajustes dos controles dos conversores, dentre outros. Na Tabela 1, mostra-se um comparativo do modelo anterior com o modelo proposto, dos principais parâmetros das Salas de Cubas.

TABELA 1 – Parâmetros das Salas de Cubas

	Sala de Cubas 1		Sala de Cubas 2		Sala de Cubas 3	
	Anterior	Proposto	Anterior	Proposto	Anterior	Proposto
Número de cubas	204	204	250	250	156	256
Correntes CC (kA)	216,4	230	217	230	218	230
Tensão CC (V)	918	918	1125	1125	700	1152
Tensão por cuba (V)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Potência (MW)	201	216	245	265	153	271
Resistência total (Ω)	0,00294	0,00271	0,00352	0,00332	0,00219	0,00341
Indutância total (mH)	1,0126	1,0126	1,2410	1,2410	0,7744	1,2708

4- SIMULAÇÕES

Todas essas melhorias foram apresentadas ao ONS em reunião, na sede do Rio de Janeiro, no final do mês de março de 2006, sendo todas elas validadas e aprovadas e já estão disponíveis na nova revisão dos arquivos do banco de dados disponibilizados pelo ONS. Em estudos envolvendo o SIN, a fim de evitar problemas de convergência, devido a grande quantidade de barras do SIN, o ONS irá adotar o modelo proposto, mas sem as alterações realizadas na arquitetura do sistema. Para estudos que necessitem de mais precisão ou estudos envolvendo diretamente o consumidor ALUMAR, será adotado o modelo proposto com todas as alterações.

Os resultados comparativos apresentados durante a validação serão expostos nesta seção. Primeiramente, foi realizada uma simulação em regime permanente através do ANAREDE. A comparação dos resultados obtidos com valores medidos em campo é apresentada na Tabela 2.

TABELA 2 – Comparação dos resultados em regime permanente

Barra	Anterior	Proposto	Medido
5551	1,021	1,022	1,022
8100	-	1,022	1,021
8200	-	1,022	1,021
8001	1,027	1,001	1,001
8002	0,971	0,961	0,960
8003	0,651	0,983	0,982
8005	-	1,022	1,022

Como se pode observar, existem diferenças entre os três resultados, sendo que o modelo proposto apresentou resultados muito mais aproximados dos medidos em campo. As diferenças entre os resultados do modelo anterior e o proposto devem-se, principalmente, à modificação nos parâmetros CC das Salas de Cubas, uma vez que as tensões e correntes aumentaram. Os dados de algumas barras não puderam ser comparados haja vista que o modelo anterior é simplificado.

Em seguida, foram feitas algumas simulações em regime transitório através de programa ANATEM. O caso escolhido foi a desligamento intempestivo de um dos dois circuitos de 500 kV entre as SE's de Presidente Dutra e São Luís II.

Nesse caso, observou-se uma pequena diferença entre os resultados dos dois modelos, sendo que, durante o transitório, o perfil de tensão para o modelo anterior atingiu valores menores que o do modelo proposto, embora se estabilizando no mesmo nível. Essas diferenças são ocasionadas, principalmente, pela redução do valor do banco de capacitores shunt instalado na barra, uma vez que, no modelo anterior, todos os bancos foram conectados nessa barra e, no modelo proposto, foram distribuídos em cada barra de acordo com o arranjo físico. O mesmo comportamento ocorreu nas barras dos Circuitos 1 e 2 (8100 e 8200) da Redução.

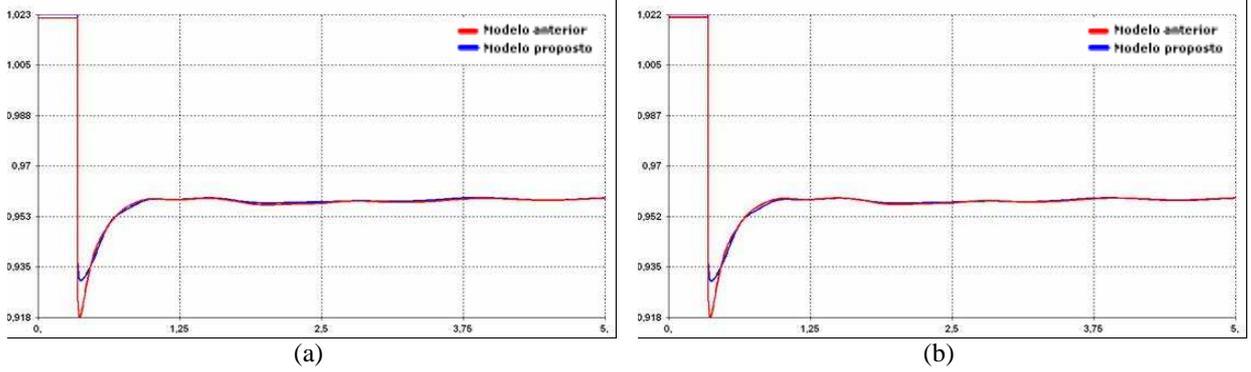


Figura 3 – (a) Comparação da tensão na Barra 5551 (b) Comparação da tensão nas barras 5551 e 8100

Nas barras de alimentação das Salas de Cubas e no sistema CC, houve, também diferenças entre os dois modelos. Nesse caso, o comportamento da tensão foi praticamente o mesmo, visto que a modelagem não foi modificada. No entanto, observou-se uma grande diferença entre os níveis de tensão, ocasionada pela modificação dos parâmetros CC das três Salas de Cubas, conforme mostrado na Figura 4. Para a Sala de Cubas 3, essa diferença foi mais acentuada que das outras duas Salas de Cubas, conforme Figura 4(b). Tal diferença deve-se à ampliação da Sala e Cubas 3 que acrescentou 100 cubas, aumentando a tensão CC e, conseqüentemente, a tensão CA, além da grande variação no valor da resistência e reatância indutiva dessas cubas.

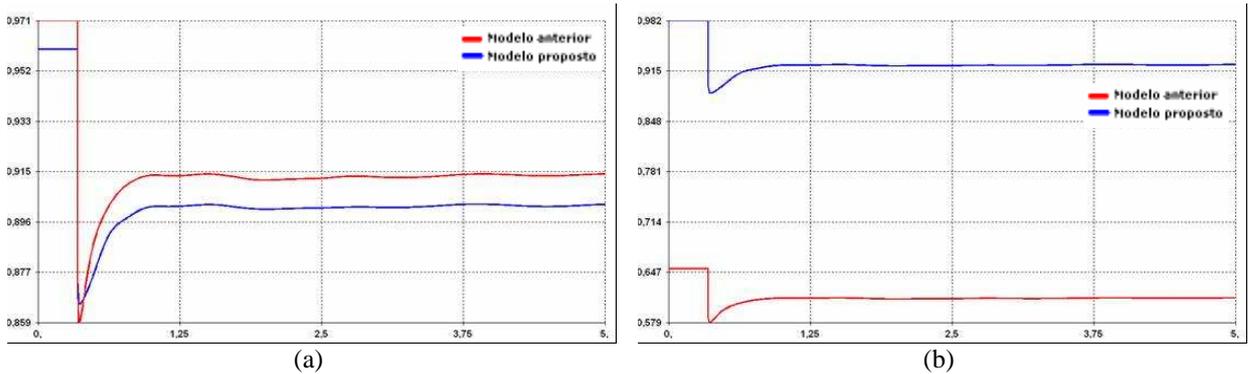


Figura 4 – (a) Comparação tensão na barra 8002 (b) Comparação tensão na barra 8003

Foi verificado, também, o comportamento da tensão nas barras da Refinaria e dos Circuitos auxiliares da Redução. Como no modelo anterior as cargas estavam concentradas na barra 5551, foi comparado o perfil de tensão entre as barras 5551 com 8005 e 5551 com 8007. Como se pode observar nas Figuras 5(a) e 5(b), ocorreram significativas diferenças, as quais são ocasionadas pela absorção da potência reativa dos motores de indução durante o transitório e ou por esta trabalhando com subtensão.

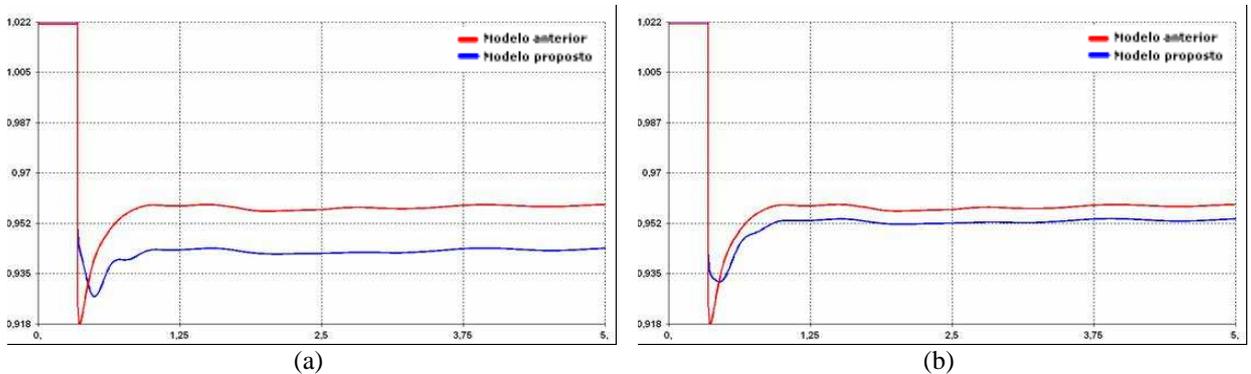


Figura 5 – (a) Comparação tensão na barra 5551 e 8005 (b) Comparação tensão nas barras 5551 e 8007

Além disso, foi verificado o perfil de tensão nas SE's de Presidente Dutra (5580) e Imperatriz (5590). Nessas duas subestações, também houve diferenças entre os dois modelos, conforme mostrado na Figura 5.

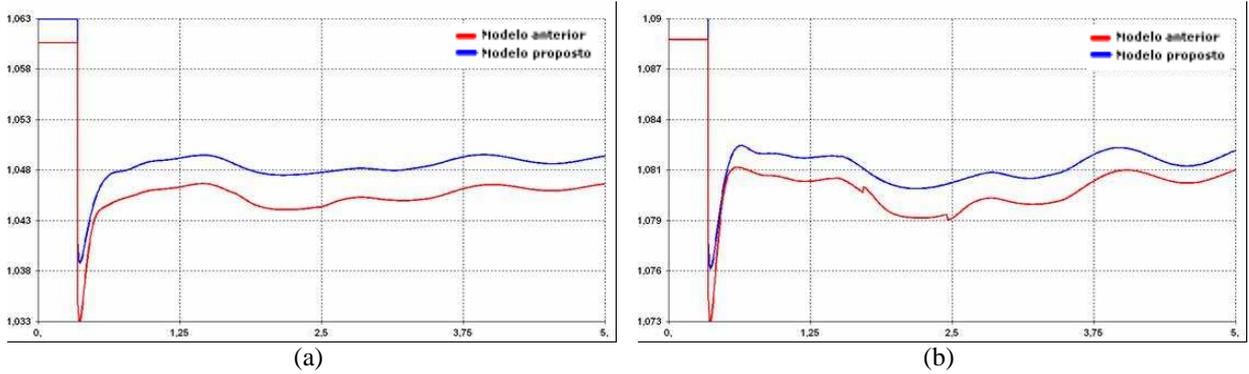


Figura 6 – (a) Comparação tensão na barra 5580

(b) Comparação tensão na barra 5590

Em todos os gráficos mostrados nesta seção, foram observadas diferenças consideráveis entre os resultados do modelo anterior e o modelo proposto. Em algumas barras, foi possível monitorar e comparar esses resultados com valores medidos em campo, sendo constatado que os resultados do modelo proposto estão mais aproximados que os do modelo anterior.

5- CONCLUSÃO

Os estudos elétricos constituem uma etapa importante no planejamento e avaliação da performance de qualquer sistema elétrico de potência. Para que esses estudos sejam confiáveis, é imprescindível que a modelagem dos componentes seja a mais real possível. No caso da modelagem do consumidor industrial ALUMAR nos programas ANAREDE e ANATEM, ela foi elaborada de forma precisa com vistas a atender as necessidades na época em que foi elaborada e visando somente avaliar o SIN. No entanto, com o passar dos anos, essa modelagem não foi atualizada, fazendo com que houvesse diferenças entre os valores encontrados na simulação e os valores reais, principalmente na área Maranhão do SIN. Além disso, o modelo proposto aqui, neste artigo, visa a realização de simulações mais detalhadas, principalmente para os casos de defeitos internos à indústria, sem perder a precisão para o restante do SIN.

Os resultados das simulações confirmaram a adequação do modelo para representação dos fenômenos dinâmicos associados à carga da ALUMAR. Em regime permanente, pôde-se observar significativa diferença entre o modelo atual e o proposto, sendo comprovado que o modelo proposto está mais aderente com as medições realizadas. O mesmo aconteceu com as simulações no regime dinâmico, sendo verificadas significativas diferenças, causadas principalmente pelo aumento da carga da Sala de Cubas 3.

Nesse contexto, pode-se avaliar que os objetivos deste trabalho foram alcançados, uma vez que o modelo proposto da ALUMAR obteve resultados satisfatórios e, além disso, todas as melhorias foram validadas e aprovadas pelo ONS e estão disponíveis na nova revisão dos arquivos do banco de dados disponibilizados pelo ONS. Sendo assim, este trabalho é apenas uma contribuição inicial neste vasto campo que vai além do que foi aqui exposto.

6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) RANGEL, R. D., GOMES JR., S. Modelagem da Carga do Consumidor Industrial ALUMAR nos Programas ANAREDE e ANATEM; CEPEL, 1999.
- (2) KUNDUR, P. Power System Stability and Control; McGraw-Hill, 2002.
- (3) ARRILLAGA, J., WATSON, N. R. Computer Modelling of Electrical Power System; Wiley & Sons Ltd, 2001
- (4) GROETAERS, M., Gomes, P. M., SCHILLING, Th. Interligação Norte-Sul: Desafios, Problemas, Soluções e Perspectivas para a Operação Elétrica Integrada Nacional; XV SNPTEE, 1995.

7- DADOS BIOGRÁFICOS

Gilson Soares da Silva Júnior

Nascido em São Luís, MA em 27 de julho de 1979.

Graduação (2002) em Engenharia Elétrica: UFMA – Universidade Federal do Maranhão – São Luís MA

Mestrado em andamento na UFMA – Universidade Federal do Maranhão – São Luís MA

Empresa: ALUMAR – Consórcio de Alumínio do Maranhão, desde 2002

Engenheiro Eletricista Sênior do Sistema de Força da ALUMAR

Vicente Leonardo Paucar

Doutor em Engenharia Elétrica: UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

Empresa: UFMA – Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Engenharia de Eletricidade.

Professor Adjunto, UFMA

Venilton Rodrigues de Oliveira

Nascido no Rio de Janeiro, 18, em Outubro de 1968.

Graduação (1992) em Engenharia Elétrica: UFF – Universidade Federal Fluminense – Niterói – RJ

Mestrado em andamento na UFF - Universidade Federal Fluminense – Niterói – RJ

Empresa: ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, desde 2000.

Engenheiro do Sistema de Potência Sênior do ONS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARABI S., KUNDUR P., “A Versatile Facts Device Model For Powerflow And Stability Simulations”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No 4, pp. 1944 - 1950, Nov. 1996.
- ARRILLAGA J., WATSON N. R., “Computer Modelling of Electrical Power System”, Wiley & Sons Ltd., 2001.
- BAZZO E., “Geração de vapor”, 2a, Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.
- BITTENCOURT S., ERIKSSON K., BILEDT G., “HVDC Light para transmissão de energia elétrica num mercado desregulamentado”, XV EXPO-SNPTEE Conference, Oct. 1999.
- CÁRDENAS S. L. E., “Aspectos técnicos e econômicos da utilização dos Controladores FACTS na operação dos sistemas de energia elétrica”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão, São Luís – MA, Brasil, 2005.
- CIGRÉ, “Facts Technology for Open Access”, CIGRE JWG 14/37/38/39-24, Final Draft Report, Aug. 2000.
- CLEMENTINO L. D., “A Conservação de Energia por meio da Co-geração de Energia Elétrica, Érica, 2001.
- DONG L., CROW M. L., YANG Z., SHEN C., ZHANG L., ATCITY S., “A Reconfigurable FACTS System for University Laboratories”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 1, pp. 120 - 128, Feb. 2004.
- EDRIS A. A., “FACTS Technology”, Development: An Update”, IEEE Power Engineering Review, pp. 4 - 9 Mar. 2000.
- EDRIS A. A., ADAPA R., BAKER M. H., et al., “Proposed terms and definitions for flexible AC transmission system (FACTS)”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp. 1848 - 1853, Oct. 1997.
- ESQUIVEL C. R. F., ACHA E., PEREZ H. A., “A Thyristor Controlled Series Compensator Model for Power Flow Solution of Practical Power Networks”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No.1, pp. 58-64, Feb. 2000.
- ESQUIVEL C. R. F., ACHA E., PEREZ H. A., “A Comprehensive Newton-Raphon UPFC Model for the Quadratic Power Flow Solution of Practical Power Networks”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol.15, No.1, pp. 102-109, Feb. 2000.
- FARDANESH B., “Optimal Utilization, Sizing, and Steady-State Performance Comparison of Multiconverter VSC-Based FACTS Controllers”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 3, pp. 1321 - 1327, Jul. 2004.

- FARUQUE M. O., Dinavahi V., SANTOSO S., ADAPA R., “Review of Electromagnetic Transient Models for Non-VSC FACTS”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 1065 -1078, Apr. 2005.
- FAUR Z.T., “Effects of FACTS devices on Static Voltage Collapse Phenomena”, Thesis for Degree of Master of Applied Science in Electrical Engineering, University of Waterloo, Ontario, Canada, 1996.
- GIFFONI M. G. S., “Desempenho de sistemas de controle de unidades térmica de co-geração”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2004.
- GROETAERS M., GOMES P. M., SCHILLING T., “Interligação Norte-Sul: Desafios, Problemas, Soluções e Perspectivas para a Operação Elétrica Integrada Nacional”, XV SNPTEE, 1995.
- HAQUE M. H., “Improvement of First Swing Stability Limit by Utilizing Full Benefit of Shunt FACTS Devices”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 4, pp. 1894 - 1902, Nov. 2004.
- HINGORANI N. G., GYUGYI L., “Understanding FACTS, concepts and technology of Flexible AC Transmission System”, New York, IEEE, 2000.
- ILIC M., GALIANA F.D., Fink L.H. “Power Systems Restructuring”, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- KUMKRATUG P., HAQUE M. H., “Versatile model of a unified power flow controller in a simple power system”, IEE Generation Transmission Distribution, Vol. 150. No. 2, pp. 155-161, Mar. 2003.
- KUNDUR P., “Power System Stability and Control”, McGraw-Hill, 1994.
- LEHMKÖSTER C., “Security Constrained Optimal Power Flow for an Economical Operation of FACTS-Devices in Liberalized Energy Markets”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, pp. 603 - 608, Apr 2002.
- LEHN P. W., “Exact Modeling of the Voltage Source Converter”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 1, pp. 217 - 222, Jan. 2002.
- LIMA M. H. R., MACHADO R. C., “Co-geração na produção de alumina no Brasil”, 10o Seminário de Metais Não-Ferrosos. São Paulo – SP, 2002.
- LORA E. E. S, NASCIMENTO M. A. R., “Geração Termoelétrica – Planejamento, Projeto e Operação – Volume 1”, Interciência, 2004 a.
- LORA E. E. S, NASCIMENTO M. A. R., “Geração Termoelétrica – Planejamento, Projeto e Operação – Volume 2”, Interciência, 2004 b.
- MATHUR R. M., VARMA R. K., “Thyristor – Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems, John Wiley & Sons, 2002.

- MATSUMO K., IYODA I., OUE Y., “An experience of FACTS development 1980s and 1990s”, IEEE – PES Transmission and Distribution Conference 2002, Asia Pacific, Vol. 2, pp.1378 – 1381, 6-10 Oct. 2002.
- MUTALE J., STRBAC G., “Transmission Network Reinforcement Versus FACTS: An Economic Assessment”, IEEE Transactions on Power System, Vol. 15, No. 3, pp 961-967, Aug, 2000.
- NOROOZIAN M., ÄNGQUIST L., GHANDHARI M., ANDERSSON G., “Improving Power System Dynamic by Series-Connected FACTS devices”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp 1635-1641, Oct. 1997.
- NOROOZIAN M., EDRIS A-A, KIDD D., KERI A. J. F., “Converter-Based Back-to-Back Tie in Load Restorations”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 4, pp. 1416 - 1421, Oct 2003.
- OLIVEIRA J. L. A., “Sistemas de Cogeração”, Projeto final da Escola de Engenharia de Goiás , Goiânia – GO, Brasil, 2003.
- ORFANOIANNI T. “A Flexible software environment for steady-state power flow optimization with series FACTS devices”, PhD. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Switzerland, Zurich, 2000.
- PAUCAR V.L., MORENO R. M., ESCALANTE S. L., “Impacto de los Controladores FACTS en Sistemas Eléctricos de Potencia”, Revista TECNIA, Lima, Peru, 15pp., 2004.
- PEREZ H. A., ACHA E., ESQUIVEL C.R. F., “Advanced SVC Model for Newton-Raphon Load Flow and Newton Optimal Power Flow Studies”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 1, pp. 129-136, Feb. 2000.
- PERKINS B.K., IRAVANI M. R., “Dynamic Modeling of a TCSC with Application to SSR Analysis”, IEEE Transactions on Power System, Vol. 12, No. 4, pp 1619-1625, Nov. 1997.
- RANGEL R. D., GOMES JÚNIOR S., “Modelagem da Carga do Consumidor Industrial ALUMAR nos Programas ANAREDE e ANATEM”, CEPEL,1999
- SCHAFFNER C., ANDERSSON G., “Determining the Value of Controllable Devices in a Liberalized Electricity Market: A New Approach”, pp.1-7, Powertech 2003.
- SCHAUDER C., GERNHARDT M., STACEY E., LEMAK T., GYUGYI L., CEASE T. W., EDRIS A., “Operation of +100 MVar TVA STATCON”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp. 1805 - 1811, Oct. 1997.
- SCHWEPPE F. C., CARAMANIS M.C. and BOHN R. E., “Spot Pricing of Electricity, Kluwer” Academic Publishers, Norwell, MA, 1988.
- SEN K. K., KERI Albert J. F., “Comparison of Field Results and Digital Simulation Results of Voltage-Sourced Converter-Based FACTS Controllers”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 1, pp. 300 - 306, Jan. 2003

- SILVA F. M., “Modelagem de carga de uma indústria de grande porte para análise de problemas de tensão no regime dinâmico”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão, São Luís – MA, Brasil, 2006.
- SILVA JÚNIOR. G. S. “Modelo da carga do consumidor industrial ALUMAR para estudos de estabilidade no domínio do tempo; XIX SNPTEE, 2007.
- SOOD V. K., “HVDC and FACTS Controllers – Applications of Static Converters in Power Systems”, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- SOTO D., “A Comparison of High-Power Converter Topologies for the Implementation of FACTS Controllers”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 5, pp. 1072 - 1080, Oct. 2002
- TARANTO G. N., “Curso de Extensão – Estabilidade em Sistemas Elétricos de Potência”, Apostila Curso ALUMAR, Rio de Janeiro – RJ, 2007.
- TARNOWSKI T., “FACTS Devices Optimizing an Electrical Energy Market Subject to Power Transmission Constraints”, Thesis, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Germany, 2003.
- TOLMASQUIM M. T., “Geração de Energia Elétrica no Brasil”, Interciência, 2005.
- WATANABE E H., BARBOSA P. G., ALMEIDA K. C., TARANTO G. N., “Tecnologia FACTS - Tutorial”, SBA Controle & Automação, Vol. 9, No. 1, pp. 39 - 55 Jan./Fev./ Mar./ Abr. 1998
- WOOD A., WOLLENBERG B., Power Generation, Operation, and Control, John Wiley & Sons, 2nd Ed., 1996.
- XIAO Y., SONG Y.H., LIU C.C., SUN Y. Z., “Available Transfer Capability Enhancement Using FACTS Devices”, IEEE Transaction on Power System, Vol. 18, No. 1, pp 305-312, Feb. 2003.
- YE Y., KAZERANI Mehrdad, QUINTANA V. H., “Current-Source Converter Based STATCOM: Modeling and Control”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 795 - 800, Apr 2005.
- YORINO N., ARABY E. E. E., Sasaki H., Harada S., “A New Formulation for FACTS Allocation for Security Enhancement Against Voltage Collapse”, IEEE Transaction on Power System, Vol. 18, No. 1, pp 3-10, Feb. 2003.
- ZHANG X. P., “Multiterminal Voltage-Sourced Converter-Based HVDC Models for Power Flow Analysis”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 4, pp. 1877 - 1884, Nov 2004