

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA
ÊNFASE EM ELETROTÉCNICA**

**EVANDRO ROBERTO ROPELATTO
FELIPE DOMINGUES FURQUIM
RENATA FRANCIANE DE OLIVEIRA**

**ESTUDO E ANÁLISE DA REGULAÇÃO DE TENSÃO E DO SUPORTE
DE POTÊNCIA REATIVA EM SISTEMAS INTEGRADOS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2014

**EVANDRO ROBERTO ROPELATTO
FELIPE DOMINGUES FURQUIM
RENATA FRANCIANE DE OLIVEIRA**

**ESTUDO E ANÁLISE DA REGULAÇÃO DE TENSÃO E DO SUPORTE
DE POTÊNCIA REATIVA EM SISTEMAS INTEGRADOS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica com Ênfase em Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná– UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Dra. Andréa Lúcia Costa

CURITIBA

2014

Evandro Roberto Ropelatto
Felipe Domingues Furquim
Renata Franciane de Oliveira

Estudo e análise da regulação de tensão e do suporte de potência reativa em sistemas integrados de transmissão de energia elétrica

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Industrial Elétrica Ênfase em Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 11 de agosto de 2014.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarien Gehrke Castagna, Me.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Andréa Lúcia Costa, Dra.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientadora

BANCA EXAMINADORA

Alvaro Augusto W. de Almeida, Esp.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Paulo Cícero Fritzen, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Wanderley Szlichta, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

DEDICATÓRIAS

Evandro Roberto Ropelatto

Dedico este trabalho principalmente aos meus pais Irineu e Aparecida (*in memoriam*), por todos os esforços atribuídos à minha educação, mesmo sob condições adversas, ao meu filho Pedro que revigora minhas energias e forças, vontades e atitudes para um bem maior e a todos os familiares e amigos de quem abdiquei meu tempo para os estudos.

Felipe Domingues Furquim

Dedico este trabalho ao meu pai Celso e minha mãe Jane por terem me dado um suporte adequado durante a minha formação, independente das circunstâncias adversas que ocorreram durante a minha graduação. E a todos os outros que me apoiaram, nunca se esquecendo de Deus.

Renata Franciane de Oliveira

Dedico este trabalho aos meus pais Luis e Deise, que se doaram inteiros e renunciaram aos seus sonhos, para que, muitas vezes, pudessem realizar os meus, aos meus filhos, Luis Matheus e Lays Mayara, que iluminaram de maneira especial os meus pensamentos me levando a buscar mais conhecimentos e são com toda a certeza a razão da minha vida e ao Jeam que foi durante 14 anos meu companheiro, amigo e incentivador. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, que permitiu que tudo isso acontecesse ao longo de nossas vidas, e não somente nestes anos como universitários, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

À nossa família, em especial aos nossos pais e filhos, por sua capacidade de acreditar em nós e investir em nós. Mães, seus cuidados e dedicação foram o que nos deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pais, suas presenças significaram segurança e certeza de que não estamos sozinhos nessa caminhada.

Agradecemos a todos os professores por terem nos proporcionado o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional.

Em especial gostaríamos de agradecer a nossa professora orientadora Dra. Andréa Lúcia Costa por seus ensinamentos, dedicação, paciência e confiança ao longo das supervisões desse trabalho, o nosso muito obrigado.

Ao nosso colega de universidade Renato Daher por ter disposto de seu tempo para nos ajudar na elaboração deste trabalho.

A esta universidade, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbramos um horizonte superior.

Aos nossos colegas de faculdade, companheiros de trabalhos e de brincadeiras, que fizeram parte da nossa formação e que vão continuar presentes em nossas vidas com certeza.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação, o nosso muito obrigado.

*“Inspiração é fibra para o sucesso.
Transpiração e persistência é o próprio sucesso.”*

Wesley F. Usida

RESUMO

FURQUIM, Felipe Domingues; OLIVEIRA, Renata Franciane de; ROPELATTO, Evandro Roberto; Estudo e Análise da Regulação de Tensão e do Suporte de Potência Reativa em Sistemas Integrados de Transmissão de Energia Elétrica. 2014. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica Ênfase em Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2014.

O objetivo deste trabalho é o estudo e a análise da regulação de tensão e do suporte de potência reativa em sistemas integrados de transmissão de energia elétrica. Foram estudados os efeitos no sistema elétrico com uso de compensadores síncronos e dispositivos reguladores de tensão e também os efeitos decorrentes da exigência de potência reativa pelo sistema elétrico de potência. Com o intuito de comparar diferentes situações no sistema elétrico, foi utilizado como ferramenta de estudo o programa ANAREDE. Foram realizadas várias simulações do sistema elétrico usando o programa ANAREDE, considerando diferentes tipos de carga e configurações da rede e também foi analisada a compensação de energia reativa no sistema. As conclusões obtidas no estudo demonstram que os compensadores síncronos são muito importantes para manter a qualidade da tensão, ao fornecer reativo para o sistema, apesar dos custos elevados para se manter tal equipamento. Como estudado, o suporte de reativo é um serviço ancilar essencial e bastante aplicado, por isso os geradores são remunerados para prover esse serviço. Os bancos de capacitores são mais versáteis e baratos, sendo mais utilizados em relação aos compensadores síncronos. Com bancos de capacitores é possível obter uma regulação das tensões nas barras não controladas, sempre obedecendo aos limites de operação impostos pela ANEEL.

Palavras-chave: Serviço Ancilar, Controle de Tensão, Suporte de Reativo, Compensador Síncrono, Regulação de Tensão.

ABSTRACT

FURQUIM, Felipe Domingues; OLIVEIRA, Renata Franciane de; Ropelatto, Evandro Roberto; Study and Analysis of Voltage Regulation and Reactive Power Support in Integrated Systems used for Electric Power Transmission. 2014. f 81. Course Completion Thesis (undergraduate) - Electrical Engineering major with concentration in Power Electronics . Federal Technological University of Paraná, Curitiba, Paraná, 2014.

The purpose of this work is to study and analyze the voltage regulation and the reactive power support in large transmission systems of electric energy. The effects in the electric system with the use of synchronous condensers and distribution system voltage regulators were studied also the effects resulting from the demand of reactive power by the power system. With the intention to compare different situations in the power system, the ANAREDE program was used as a tool for studying. Several power system simulations were performed using the ANAREDE program, considering different loads and network configurations and also the reactive compensating devices in the system were analyzed. The conclusions obtained in the study demonstrate that synchronous condensers are very important to maintain the voltage quality of the power system when they supply reactive power to the system, in spite of the higher costs to keep such equipment. As studied, the reactive power supply is an essential ancillary service, therefore the generators units are remunerated to provide this service. The shunt capacitors are devices more versatile and not much expensive; therefore they are more used than synchronous condensers. With shunt capacitors is possible to obtain a voltage regulation on not-controlled bus, always obeying the operation limits imposed by ANEEL.

Keywords: Ancillary Services, Voltage Control, Reactive Support, Synchronous Condensers, Voltage Regulation.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Solicitação de potência reativa por linhas de transmissão, para vários níveis de tensão</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2 - Diagramas fasoriais de uma LT</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3 - Banco de capacitores instalado em uma subestação.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 4 - Diagrama vetorial para linha de transmissão com capacitores-série instalados.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 5 - Capacitores-série instalados no meio da linha</i>	<i>28</i>
<i>Figura 6 - Linha com metade dos capacitores-série instalados em cada extremidade</i>	<i>28</i>
<i>Figura 7 - Dispositivo FACT instalado em uma subestação</i>	<i>29</i>
<i>Figura 8 - Transformador e motor elétrico</i>	<i>31</i>
<i>Figura 9–(a) Reator com núcleo de ferro (b) Reator com núcleo a ar no enrolamento terciário de um banco de transformadores.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 10 - Regulador automático de tensão</i>	<i>37</i>
<i>Figura 11- Diagrama esquemático de uma máquina síncrona com regulador automático de tensão, sistema de excitação, funções de controle, proteção e supervisão</i>	<i>38</i>
<i>Figura 12 - Esquema do processo de administração de serviços ancilares</i>	<i>47</i>
<i>Figura 13 - Forma característica das curvas compostas de um gerador síncrono</i>	<i>50</i>
<i>Figura 14 – Fatores que limitam a curva de capacidade de um gerador síncrono</i>	<i>51</i>
<i>Figura 15 - Representação gráfica do sistema de potência IEEE 14 barras através do ANAREDE</i>	<i>56</i>
<i>Figura 16 - Perfil das tensões para o Caso Base e Caso 1.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 17 - Perfil das tensões para o Caso Base e Caso 2.....</i>	<i>71</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1- Descrição dos arranjos comerciais dos serviços ancilares prestados pelos agentes de geração, de transmissão e de distribuição (suporte de reativo)</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 2 - Dados das barras (IEEE14)</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 3 - Dados dos geradores (IEEE14)</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 4 - Dados de linha (IEEE14)</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 5 - Faixa de variação da tensão nominal para as barras de 1kV a 69kV</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 6 - Faixa de variação da tensão nominal para as barras de 69kV a 230kV</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 7 - Modificação de tensão nas barras.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 8 - Ajuste dos limites de tensão</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 9 - Dados das barras do Caso Base para as simulações.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 10 - Dados do fluxo de potência nas barras para o Caso Base</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 11 - Totais de geração, carga e perdas do Caso Base.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 12 - Potência (Mvar) gerada x Tensão gerada</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 13 - Dados de barra obtidos para o Caso 1.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 14 - Dados de fluxo obtidos para o Caso 1.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 15–Totais de geração, carga e perdas obtidos para o Caso 1</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 16 - Diferenças entre tensões e potência reativa do Caso Base em relação ao Caso 1</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 17 - Diferenças entre os fluxos do Caso Base em relação ao Caso 1</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 18 - Diferenças entre tensões e potência reativa.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabela 19 - Potência (Mvar) gerada x Tensão gerada</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 20 - Dados de barra obtidos para o Caso 2.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 21 - Dados de fluxo obtidos para o Caso 2.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 22 - Totais de geração, carga e perdas obtidos para o Caso 2</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 23 - Diferenças entre tensões e potência reativa do Caso Base em relação ao Caso 2</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 24 - Diferenças entre os fluxos do Caso Base em relação ao Caso 2</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 25 – Perdas de potência nas linhas para o Caso Base e para o Caso2.....</i>	<i>75</i>

LISTA DE SIGLAS

ANAREDE	Software de Simulação do Sistema Elétrico de Potência
AT	Alta Tensão
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAG	Controle Automático de Geração
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CEPEL	Centro de Pesquisas da Eletrobrás
CESP	Companhia Elétrica de São Paulo
CPSA	Contrato de Prestação dos Serviços Ancilares
DGLT	Dados de Grupo de Tensão
ESS	Encargos de Serviços de Sistema
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
FP	Fator de Potência
LT	Linha de Transmissão
LTC	<i>Line Tap Change</i>
MS	Mato Grosso do Sul
Mvar	Mega volt ampere reativo
O&M	Operação e Manutenção
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PSS	<i>Power Stability System</i>
pu	por unidade
RAT	Regulador Automático de Tensão
RG	Reserva Girante
rpm	Rotações por Minuto
SA	Serviço Ancilar
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
TSA	Tarifa de Serviços Ancilares
VA	volt ampere
var	volt ampere reativo
V_L	Tensão de Linha
V_g	Tensão Gerada

SUMÁRIO

1	PROPOSTA DO TRABALHO	13
1.1	INTRODUÇÃO	13
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	14
1.3	PROBLEMAS E PREMISSAS.....	15
1.4	OBJETIVOS.....	16
1.4.1	Objetivo Geral.....	16
1.4.2	Objetivos Específicos	16
1.5	JUSTIFICATIVA	17
1.6	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	17
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	CONTROLE DE TENSÃO.....	20
2.1	INTRODUÇÃO	20
2.2	REGULAÇÃO DE TENSÃO	22
2.3	FLUXO DE POTÊNCIA REATIVA.....	23
2.3.1	Perdas Devido ao Fluxo de Potência Reativa.....	24
2.4	PRINCIPAIS GERADORES DE POTÊNCIA REATIVA	25
2.4.1	Máquinas Síncronas Sobre-Excitadas	25
2.4.2	Banco de Capacitores	25
2.4.3	A Capacitância de Linhas de Transmissão	28
2.4.4	Controladores / Dispositivos FACTS	28
2.5	PRINCIPAIS CONSUMIDORES DE POTÊNCIA REATIVA	30
2.5.1	Cargas Indutivas.....	30
2.5.2	Geradores Síncronos Sub-Excitados	31
2.5.3	Motores de Indução	31
2.5.4	Reatores <i>Shunt</i> , Derivação ou Paralelo	31
2.5.5	A Indutância das LTs	33
2.5.6	A Indutância de Transformadores	34
2.6	MECANISMOS DE CONTROLE DE TENSÃO	34
2.6.1	Tensões nos Terminais do Gerador	34
2.6.2	Impedância das Linhas.....	35
2.6.3	Potência Reativa Injetada na Barra	35
2.6.4	Relação de Espiras dos Transformadores	35
2.7	CONTROLE PRIMÁRIO E CONTROLE SECUNDÁRIO DE TENSÃO	36
2.7.1	Máquinas Síncronas com RAT (Regulador Automático de Tensão).....	37
2.7.2	Controle de Mudanças no TAP do Transformador	39
2.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO	40
3	SERVIÇOS ANCILARES DE CONTROLE DE TENSÃO	42
3.1	INTRODUÇÃO	42
3.2	SERVIÇOS DE CONTROLE DE TENSÃO	43
3.2.1	Resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL N°265	44
3.2.2	Procedimentos da ONS.....	46
3.2.3	Administração dos Serviços Ancilares: Visão Geral	46

3.2.3.1	Arranjos Comerciais para os Serviços Ancilares Prestados pelos Agentes de Geração, de Transmissão e de Distribuição.....	47
3.3	O GERADOR OPERANDO COMO COMPENSADOR SÍNCRONO.....	49
3.4	GERADORES DE USINAS ADAPTADOS PARA OPERAR COMO COMPENSADORES SÍNCRONOS	52
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO	53
4	<i>ESTUDO E ANÁLISE</i>	54
4.1	INTRODUÇÃO	54
4.2	ESTUDO DO CASO BASE.....	55
4.2.1	Sistema IEEE 14 Barras – Construção do Caso Base	55
4.2.2	Simulações – Correções dos Problemas	62
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO	75
5	<i>CONSIDERAÇÕES FINAIS</i>.....	77
	<i>REFERÊNCIAS</i>.....	79

1 PROPOSTA DO TRABALHO

1.1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda de energia elétrica, ocasionado pelo crescimento industrial e econômico do país, trouxe a necessidade de transmitir blocos de potência elétrica, cada vez maiores para diferentes localidades do Brasil. Em algumas regiões como o Norte e o Nordeste, o sistema elétrico atuava de forma autônoma (independente), mas com o constante aumento do consumo de energia, estudos revelaram a necessidade da criação do SIN (Sistema Interligado Nacional) que possibilitou a troca de energia entre regiões, permitindo, assim, o aproveitamento da desigualdade de regime dos rios das diferentes bacias hidrográficas brasileiras (KAGAN, 2005).

Como 88,5% da produção de energia elétrica brasileira provém de usinas hidrelétricas e estas encontram-se distantes dos grandes centros consumidores, o caminho percorrido pela energia elétrica através das linhas de transmissão geralmente é muito longo, sendo isso um fator que influencia a qualidade do nível de tensão no suprimento da carga (ONS, 2014).

Uma energia de qualidade corresponde à valores de tensão e frequência dentro dos limites estabelecidos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), pois qualquer problema de energia manifestado na tensão, na corrente ou nas variações de frequência resulta em falha ou má operação de equipamentos dos consumidores.

Cada vez mais as empresas fornecedoras de energia elétrica preocupam-se com a qualidade de seu produto, pois precisam se adequar às exigências do mercado e precisam se adaptar as normas e recomendações redigidas pela ANEEL.

Como hoje a maioria dos sistemas elétricos de potência opera com valores de tensão e potência próximos ao limite de operação dos equipamentos, a qualidade da energia que circula pelas linhas de transmissão pode ficar comprometida. Para que a energia elétrica chegue até o consumidor final com valores de tensão dentro dos limites estabelecidos pela agência reguladora, faz-se necessário a instalação de dispositivos para regulação de tensão. Tais equipamentos destinam-se basicamente

a manter a tensão num domínio de valores pré-fixados de forma a compensar os efeitos das variações do valor da tensão e das quedas de tensão.

Outro fator, desencadeado pelo constante aumento de carga atendida pelas concessionárias de energia elétrica é a necessidade de fornecer um suporte de potência reativa suficiente para atender às cargas indutivas e também manter os módulos das tensões nas barras mais próximos do valor nominal.

A potência reativa injetada no Sistema Elétrico de Potência (SEP) é fornecida principalmente pelas cargas capacitivas das linhas de transmissão que armazenam energia sob a forma de campo elétrico. Os cabos condutores utilizados nas linhas de transmissão também geram potência reativa, em razão da alta capacitância entre estes e o solo. Quando há excesso de potência reativa no sistema, o nível de tensão sobe, e quando há falta de potência reativa o nível de tensão cai.

Essa energia reativa faz parte do SEP, sendo que as cargas acopladas ao sistema consomem tanto a energia reativa quanto a energia ativa do sistema, dependendo da natureza destas cargas, porém, correntes indutivas nas linhas de transmissão tendem a reduzir o módulo da tensão transmitida com o aumento da extensão da linha de transmissão. Portanto, torna-se necessário reduzir os efeitos dessas correntes reduzindo o fluxo de potência reativa nos sistemas de transmissão (HAO, 2003).

Nos sistemas de energia elétrica são instalados bancos de capacitores em paralelo com as cargas para a correção de fator de potência, para deixá-lo o mais próximo possível do valor unitário. A potência ativa é sempre consumida para execução de trabalho. Já a potência reativa indutiva, além de não produzir trabalho, seja motor ou aquecimento, circula entre a carga e a fonte de alimentação, ocupando uma parcela da potência aparente que poderia ser utilizada para alimentar mais cargas. Esses bancos de capacitores reduzem as perdas em potência ativa nas linhas de transmissão e as perdas por queda de tensão (BAUAB, 2009).

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho tem como foco o estudo e a análise da regulação de tensão e do suporte de potência reativa em sistemas integrados de transmissão de energia elétrica. Foram estudados os efeitos no sistema elétrico com uso de compensadores

síncronos, dispositivos reguladores de tensão e também os efeitos decorrentes da exigência de potência reativa pelo SEP.

Com o intuito de comparar diferentes situações no SEP, foi utilizado como ferramenta de estudo o programa ANAREDE com o qual foram realizadas várias simulações do sistema elétrico, considerando diferentes tipos de carga e configurações e também foi analisada a compensação de energia reativa no sistema.

1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS

O sistema elétrico de potência é dividido basicamente em três subsistemas. São eles: a geração, a transmissão e a distribuição. Como os sistemas não funcionam de maneira ideal, ou seja, há perdas decorrentes de alguns fenômenos e/ou efeitos ocasionados pelo transporte de energia, foram criados dispositivos e recursos técnicos para realizar a compensação ou minimização desses efeitos. Sendo o Brasil um país de dimensões continentais, a estrutura para atender o máximo possível de consumidores também é muito extensa e complexa. As linhas de transmissão de energia elétrica são em geral muito extensas e o seu rendimento ou eficiência é bastante comprometido por tal fato.

A linha de transmissão (LT) é composta por um conjunto de condutores que transportam energia elétrica dos geradores às cargas (subestações). Um dos parâmetros importantes na definição da capacidade de transmissão de uma LT é a sua impedância.

Esta, por sua vez, depende principalmente da indutância. Sabe-se que uma corrente elétrica variável, produz um campo magnético e um fluxo magnético associado. A intensidade desse fluxo varia diretamente com a magnitude da corrente elétrica, relacionada com sua distribuição espacial e do meio no qual um condutor está inserido.

Outro parâmetro associado à impedância é a resistência elétrica do condutor. Esta consiste na oposição que um determinado material oferece à passagem da corrente elétrica, convertendo parte de sua energia em calor. A resistência elétrica de um condutor é função de sua seção transversal, do seu comprimento e da sua resistividade, esta última, intrínseca do material. Como descrito acima, a resistência elétrica total a passagem de corrente em um material condutor recebe o nome de

impedância. Então, chega-se a duas componentes para ela, uma resistiva (resistência) e uma reativa. Esta pode ser indutiva (componente série da LT) ou capacitiva (componente *shunt* da LT), provenientes da indutância ou da capacitância, respectivamente (HAO, 2003).

Os parâmetros da LT, citados acima, resistência e indutância, provocam uma queda de tensão indesejada no final da linha, seja por reatância indutiva ou por efeito Joule, ou seja, aquecimento nos condutores. Já a capacitância pode diminuir o fator de potência causando assim, uma perda na potência aparente do sistema (HAO, 2003).

O uso dos reguladores de tensão nos sistemas elétricos de potência e do suporte reativo injetado na rede elétrica é um recurso técnico utilizado para compensação das perdas por queda de tensão nas LTs e pelo consumo de reativo indutivo pelas cargas.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Estudar e analisar a regulação de tensão e o suporte de potência reativa, com auxílio do programa ANAREDE, considerando diferentes tipos de carga e configurações do sistema elétrico.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Estudar e descrever o controle de tensão nos sistemas elétricos;
- Estudar e descrever o gerador síncrono, operando como compensador síncrono;
- Estudar e descrever os equipamentos para compensação de energia reativa (banco de capacitores);
- Estudar a regulação de tensão no SEP;
- Estudar o suporte de energia reativa no SEP;
- Aprender a utilizar o programa ANAREDE para simulações de sistemas elétricos;

- Simular o sistema elétrico a ser estudado, utilizando o programa ANAREDE:
 - ✓ sem controle de tensão e sem suporte de reativo;
 - ✓ com controle de tensão e suporte de reativo por meio de compensadores síncronos;
 - ✓ com controle de tensão e suporte de reativo por meio de capacitores.

1.5 JUSTIFICATIVA

Hoje em dia, há cada vez mais a necessidade de se monitorar e estudar o SEP, devido a sua complexidade e a crescente demanda por energia no país. Os estudos abordando a operação do sistema elétrico têm por objetivo obter um nível maior de qualidade no fornecimento de energia elétrica, pois isto vai de encontro às exigências das agências reguladoras.

Desta forma, este trabalho pretende apresentar conclusões baseadas nos estudos e análises da utilização dos equipamentos de controle de tensão e suporte de potência reativa nos sistemas integrados de energia elétrica.

Com base nesses estudos e com o auxílio de um programa computacional que simula a operação do SEP foi possível, dentro do escopo de nosso estudo, desenvolver algumas análises referentes à aplicação ou não destes recursos técnicos ao sistema, assim como mostrar o comportamento do sistema para diferentes configurações.

Outro ponto, não menos importante, é que o estudo do controle de tensão e dos mecanismos para suporte de potência reativa, integrados ao sistema elétrico de energia, é de grande interesse também aos engenheiros eletricitas, por causa da sua complexidade e aplicabilidade ao SEP.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho iniciou-se com uma pesquisa bibliográfica, em livros, dissertações de mestrado, teses de doutorado, artigos científicos, sites da *internet* e outras referências bibliográficas nas quais foi dada a abordagem necessária referente a banco de capacitores, compensadores síncronos, reguladores de tensão, sistema de transmissão de energia elétrica, equipamentos atrelados ao SEP e

parâmetros que podem aparecer no decorrer do estudo realizado. Também foram estudados os procedimentos de rede do Operador Nacional do Sistema (ONS) relativos aos Serviços Ancilares de Controle de Tensão.

Após essa primeira etapa, a preocupação seguinte foi concentrada na descrição e aprofundamento do controle de tensão e dos equipamentos envolvidos, que são o compensador síncrono, o regulador de tensão e os bancos de capacitores. Para esses equipamentos o foco da pesquisa foi a descrição dos seguintes parâmetros: tipos de ligação, características construtivas, tipos de comando e princípios de funcionamento.

Tendo concluído a parte dos estudos e pesquisa bibliográfica, a terceira etapa foi a simulação do SEP utilizando o programa ANAREDE. Foram feitas simulações utilizando um sistema teste capaz de representar as principais características do SEP. Foram considerados diferentes cenários visando confrontar os resultados obtidos em uma análise. Os casos simulados foram: sem controle de tensão e sem suporte de reativo, com controle de tensão e suporte de reativo por meio de compensadores síncronos e com controle de tensão e suporte de reativo por meio de capacitores.

Com base nos dados levantados e com os resultados obtidos nas simulações, foi possível demonstrar as diferenças entre sistemas que tem compensação de reativos e sistemas que não os tem, visualizando as diferenças nos valores das tensões das barras e fluxos com suporte de energia reativa e para um sistema sem suporte de energia reativa.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de Conclusão de Curso é composto por cinco capítulos, sendo que os mesmos possuem as seguintes descrições:

- **Capítulo 1 – PROPOSTA DO TRABALHO:** contém a apresentação do tema do trabalho, os problemas e premissas, a justificativa para desenvolvimento do projeto, os procedimentos metodológicos.
- **Capítulo 2 – CONTROLE DE TENSÃO:** este capítulo apresenta os conceitos, explica a necessidade do controle de tensão e as características construtivas, o modo de funcionamento e o modo de operação dos equipamentos que fornecem e também que consomem reativo no SEP.

- **Capítulo 3 – SERVIÇOS ANCILARES DE CONTROLE DE TENSÃO:** este capítulo apresenta a definição e aplicações dos serviços ancilares de tensão, bem como o modo de funcionamento e operação de um compensador síncrono.
- **Capítulo 4 – ESTUDO E ANÁLISE:** descrições efetivas da pesquisa, assim como a análise através do uso do programa ANAREDE da importância do uso ou não de compensadores síncronos e de banco de capacitores no SEP.
- **Capítulo 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS:** capítulo final do trabalho em que apresenta a conclusão a respeito dos resultados obtidos.

2 CONTROLE DE TENSÃO

2.1 INTRODUÇÃO

O assunto compensação reativa e sua influência na qualidade da tensão de um SEP são itens que vêm sendo abordados por especialistas do setor elétrico há tempos. A compensação reativa é necessária para assegurar uma completa utilização do SEP existente, proporcionando uma igualdade entre a geração de energia elétrica e o consumo de potência reativa, e assim, liberar para a operação do SEP, uma situação adequada de controle de tensão e fornecimento de energia elétrica (BRIGATTO, 1994).

Conseqüentemente, a necessidade de se controlar os valores de tensão é justificada porque a grande maioria dos equipamentos utilizados em um SEP é projetada para atuar em um dado nível de tensão, sendo esta tensão nominal ou tensão de placa. Quando estes dispositivos atuam com valores de tensão diferentes dos fornecidos pelo fabricante, o seu funcionamento e sua vida útil são afetados diretamente. Pode-se citar como exemplo o motor de indução que tem seu conjugado proporcional ao quadrado da tensão aplicada. As justificativas que nos levam a controlar os níveis de tensão em um SEP são inúmeras e muito fortes. Por isso há necessidade de manter estes níveis de tensão em faixas de controle rigorosas e/ou muito próximas do valor nominal (BRIGATTO, 1994).

A carga mais comum em um SEP possui característica indutiva, ou seja, além da potência ativa, também é consumidora de energia reativa. Isso ocorre pelo fato de que grande parte das cargas industriais é constituída por motores que são grandes consumidores de energia reativa indutiva. Mas para criar e manter os campos eletromagnéticos das cargas indutivas se faz necessário a energia reativa indutiva, a qual não produz efetivamente trabalho e circula entre a fonte e a carga utilizando uma capacidade da linha de transmissão que poderia ser aproveitado para fornecer mais potência ativa para as cargas.

As linhas de transmissão de energia elétrica também necessitam de energia reativa capacitiva para realizar o transporte de potência ativa da fonte geradora até as subestações de energia elétrica. A melhor condição para o transporte de energia

elétrica em uma linha de transmissão é aquela em que ela transmite uma potência ativa de valor igual ao valor da sua potência natural, P_0 (RESENDE, 2005).

A Figura 1 ilustra a potência reativa capacitiva que deve ser gerada ou absorvida, a cada 100 km de linha, para linhas de transmissão de diversas classes de tensão. Nota-se que, a única situação em que uma linha de transmissão não precisa de potência reativa capacitiva adicional é quando ela está conduzindo a potência natural P_0 . A Figura 1 mostra explicitamente, representada pela região de potência reativa capacitiva negativa ($-Q$) que a linha de transmissão está gerando mais energia reativa capacitiva do que ela precisa para efetuar a transmissão de energia ativa. Isto é, a linha de transmissão está transportando potência ativa em valor inferior a sua potência natural P_0 . Essa potência reativa capacitiva adicional que é gerada pela linha de transmissão cresce com o nível de tensão e com o comprimento da mesma, ocasionando o aumento da tensão ao longo da linha de transmissão, fato conhecido como Efeito Ferranti (RESENDE, 2005).

Mas se a linha de transmissão estiver conduzindo potência ativa com valor superior ao valor da sua potência natural P_0 , essa linha terá que receber energia reativa capacitiva adicional ao valor que ela própria gera. Caso isto não ocorra, a tensão ao longo da linha de transmissão irá decrescer (RESENDE, 2005).

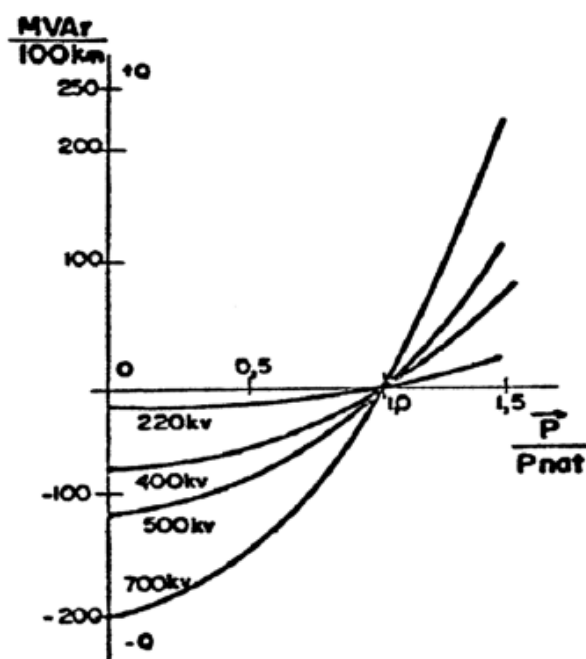


Figura 1 - Solicitação de potência reativa por linhas de transmissão, para vários níveis de tensão

Fonte: Resende (2005).

De acordo com Elgerd (1977) para o correto funcionamento do SEP é essencial que a energia reativa esteja compatível com a demanda da carga, isto é, que a demanda de carga reativa seja atendida pela energia reativa produzida pelos sistemas de geração.

Além disso, manter a tensão e a frequência de um SEP em valores bem próximos dos nominais é a segurança de que o balanço de potência ativa está sendo mantido no SEP. Manter a tensão de barra próxima de 1,0 pu assegura a estabilidade entre potência reativa produzida e potência reativa consumida. Sempre que houver variação no módulo da tensão em determinada barra, significa que o balanço de energia reativa está comprometido na barra analisada (ELGERD, 1977).

2.2 REGULAÇÃO DE TENSÃO

Segundo Stevenson (1986) a regulação de uma LT é o aumento de tensão na barra receptora, dado em percentagem da tensão de plena carga, quando toda a carga, a um determinado fator de potência, é retirada da linha, mantendo constante a tensão da barra transmissora. Tal fato pode ser comprovado pela equação 2.1.

$$\text{Regulação em \%} = \frac{|V_{R,NL}| - |V_{R,FL}|}{|V_{R,FL}|} \times 100 \quad (2.1)$$

Onde:

$|V_{R,NL}|$ = Amplitude da tensão em vazio na barra receptora;

$|V_{R,FL}|$ = Tensão de plena carga na mesma barra.

Quando a carga de uma LT curta é removida, a tensão na barra receptora é igual à tensão na barra transmissora. Para manter a tensão desejada na barra receptora, quando a corrente nesta barra estiver atrasada em relação à tensão, necessita-se de uma tensão mais elevada na barra transmissora. Quando a corrente estiver adiantada em relação à tensão, uma tensão ainda menor na barra transmissora se faz necessária para manter a tensão dada na barra receptora (STEVENSON, 1986).

Em todos os casos o valor da queda da tensão na impedância em série é a mesma, mas devido aos diferentes valores de fator de potência (FP), esta queda de tensão é acrescentada à tensão da barra receptora em ângulos diferentes, em cada caso. Para FP atrasado e menor a regulação é maior e para FP adiantado a regulação pode ser negativa. Em LTs a reatância indutiva é maior do que a resistência, fato que pode ser comprovado na Figura 2 abaixo.

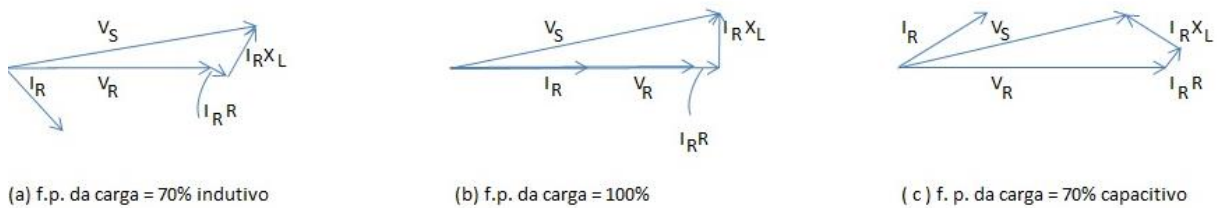


Figura 2 - Diagramas fasoriais de uma LT

Fonte: Stevenson (1986).

2.3 FLUXO DE POTÊNCIA REATIVA

Para uma operação em regime estacionário, o balanço de potência reativa deve ser mantido de modo que os módulos das tensões sejam mantidos dentro de um intervalo aceitável. Se o balanço de potência reativa entre cargas e geração não for ideal, isso acabará propiciando tensões com níveis incorretos (GOMÉZ-EXPÓSITO et al., 2009).

Em condições normais, o SEP é operado para que, quando ocorram quedas de tensão nas linhas, estas sejam pequenas. Com isso as tensões nas barras serão aproximadamente as mesmas (em pu). A rede elétrica é projetada para transmitir a potência ativa e não a potência reativa, no entanto os valores de tensão podem ser controlados pelo controle de potência reativa. Um aumento da produção de energia reativa resultará em um nível de tensão maior próximo a usina. Por outro lado, um aumento do consumo de reativo resultará em uma tensão de nível mais baixo nas barras de carga (GOMÉZ-EXPÓSITO et al., 2009).

Somente os geradores do sistema produzem potência ativa, mas há muitos geradores e consumidores de potência reativa. A potência reativa não pode ser transmitida por um percurso muito longo, devido à indutância ser muito maior que a resistência, em um sistema de potência. Por isso ela é considerada uma quantidade

bastante local, que deve ser produzida próxima aos pontos de consumo (GOMÉZ-EXPÓSITO et al., 2009).

2.3.1 Perdas Devido ao Fluxo de Potência Reativa

Para um sistema elétrico alternado sempre haverá a potência reativa (var), e esta sempre causa um aumento no módulo da corrente que resulta em perdas (MILLER, 1987).

Para as linhas de transmissão têm-se os seguintes parâmetros:

- Resistência do condutor;
- Indutância;
- Capacitância.

A perda de potência ativa na LT se dá pela corrente que passa através dela vezes a queda de tensão na linha, esta última devida à resistência (MILLER, 1987).

$$P_{(perda\ de\ potência)} = \dot{E}_{(queda\ de\ tensão)} \cdot \dot{I}_{(corrente\ de\ linha)} \quad (2.2)$$

Sendo a lei de Ohm:

$$\dot{E} = R \cdot \dot{I} \quad (2.3)$$

E isso resulta:

$$P_{(perda\ de\ potência)} = R \cdot \dot{I} \cdot \dot{I} = R \cdot I^2 \text{ (Watts)} \quad (2.4)$$

Esta relação serve para mostrar que quando for duplicado o módulo da corrente as perdas serão quadruplicadas, gerando assim uma diminuição da eficiência do sistema. Sendo assim, para um circuito com fator de potência de 0,5 o módulo da corrente será o dobro da corrente para um fator unitário, considerando a mesma potência ativa transmitida. Por causa do aumento da corrente, a queda de tensão na resistência da linha será maior do que seria para um fator de potência unitário (MILLER, 1987).

2.4 PRINCIPAIS GERADORES DE POTÊNCIA REATIVA

Os geradores síncronos sobre-excitados fornecem reativo à rede. Essa potência reativa gerada pode ser também denominada de reativa capacitiva. Além dos geradores síncronos, outros equipamentos, descritos a seguir, também são geradores de potência reativa (BORDIM, 2009).

2.4.1 Máquinas Síncronas Sobre-Excitadas

As máquinas síncronas sobre-excitadas podem gerar, durante sua operação, potência reativa devido à elevada corrente de excitação nos enrolamentos do campo.

Com base em seu funcionamento e sua aplicação em um sistema elétrico, pode-se mudar a corrente de excitação dos geradores síncronos, conforme uma necessidade específica. Sempre que a corrente de campo atinge valores máximos, isto é, perto dos valores térmicos dos condutores do campo, tem-se uma corrente de sobre-excitação. Neste caso, o gerador produz energia reativa capacitiva para o sistema, regulando assim o sistema em caso de excesso de energia indutiva (LIMA, 2002).

2.4.2 Banco de Capacitores

Os capacitores são fontes de potência reativa, geralmente instalados nas subestações dos sistemas de transmissão e distribuição, podendo também ser encontrados nas subestações de grandes consumidores industriais. A Figura 3 mostra um banco de capacitores a céu aberto, instalado em uma subestação.



Figura 3 - Banco de capacitores instalado em uma subestação

Fonte: Escola politécnica UFBA (2014).

Os principais tipos de instalações desses equipamentos são descritos a seguir:

a) Capacitores fixos

São os mais baratos e mais simples encontrados no mercado atual para sistemas de compensação de reativos. Basicamente é um banco de capacitor instalado no sistema que pode ou não estar associado a um compensador variável para poder obter a mínima potência reativa que será prevista (RESENDE, 2005).

b) Capacitores-série

Quando existem capacitores-série em uma linha, há uma queda de tensão na reatância capacitiva-série que é proporcional à corrente de linha. Com isso a queda reativa-capacitiva é vetorialmente oposta a queda da reatância indutiva da linha. Com isso tem-se então uma diminuição da regulação de tensão no terminal receptor da linha. Isso pode ser visto no diagrama vetorial mostrado na Figura 4 (MILLER, 1987).

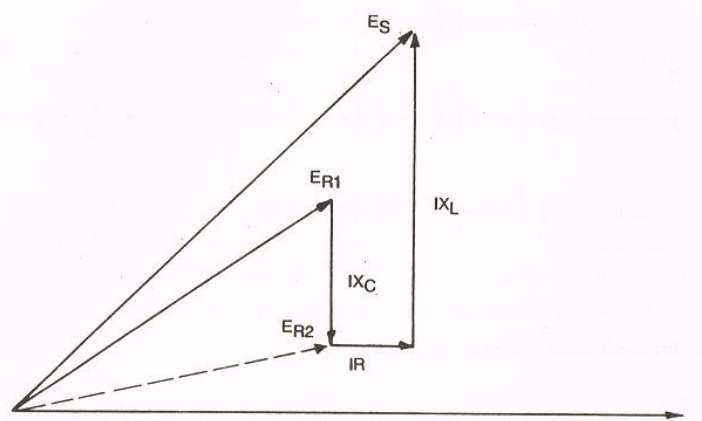


Figura 4 - Diagrama vetorial para linha de transmissão com capacitores-série instalados
 Fonte: Miller (1987).

No diagrama E_{R1} representa a tensão na barra receptora com capacitores-série instalados e E_{R2} representa a tensão na mesma barra, mas sem a compensação (MILLER, 1987).

Com esse diagrama pode-se concluir que a tensão E_{R1} , com capacitores-série em serviço, é consideravelmente maior que a tensão E_{R2} , sem capacitores-série. Outra diferença que ocorre, sendo E_S o terminal na barra transmissora e E_R o terminal na barra receptora, é a defasagem do ângulo entre as barras que diminui com a compensação. Segundo Miller (1987), “de fato os capacitores-série encurtam eletricamente a linha, e com isso é possível alimentar mais cargas sem a instabilidade que poderia ocorrer se não houvesse compensação”.

Os bancos de capacitores usados nas linhas de transmissão, com o intuito de compensação, são semelhantes aos bancos usados nas linhas de distribuição, para correção do fator de potência. Estes são conectados em série-paralelo. O número de bancos que são conectados em série com o sistema deve ser suficiente para suportar a máxima queda de tensão esperada através dos capacitores. Para as unidades ligadas em paralelo o número é definido pela corrente esperada da linha. Os capacitores-série operam em tensão de linha e devem ser dispostos em uma plataforma que tenha isolamento suficiente para suportar a tensão fase-terra (MILLER, 1987).

Os capacitores podem ser instalados tanto no meio da linha, nesse caso todos, ou nas extremidades, metade para cada lado. A Figura 5 mostra um diagrama unifilar com capacitores-série instalados no meio da linha e a Figura 6 mostra um diagrama unifilar no qual os capacitores-série foram instalados nas extremidades da

LT. Os dois casos são utilizados e para escolher um deles é levada em consideração a parte técnica, se o local onde vai ser instalado é viável e os custos envolvidos (MILLER, 1987).

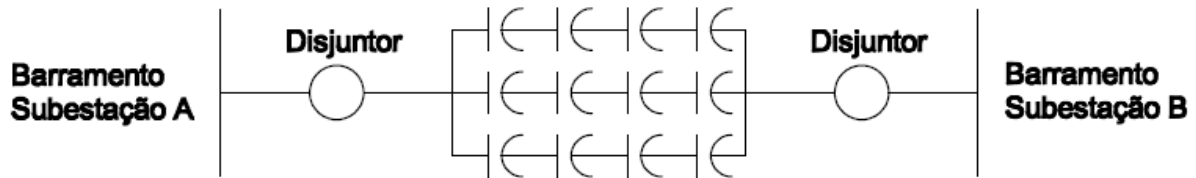


Figura 5 - Capacitores-série instalados no meio da linha
Fonte: Miller (1987).

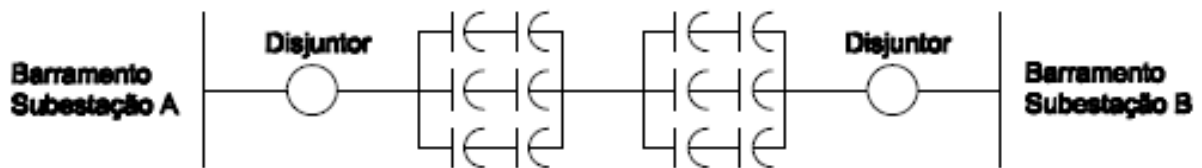


Figura 6 - Linha com metade dos capacitores-série instalados em cada extremidade
Fonte: Miller (1987).

2.4.3 A Capacitância de Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão acabam gerando uma diferença de potencial entre os condutores entre um trecho e outro do sistema, isso faz com que as linhas se carreguem do mesmo jeito que as placas de um capacitor. Para condutores paralelos essa capacitância é constante, variando somente a seção e a distância entre eles. Esse efeito aplica-se somente a linhas com extensão maior que 80 km, ou para linhas de alta tensão (ELGERD, 1977).

2.4.4 Controladores / Dispositivos FACTS

Os FACTS do termo em inglês *Flexible AC Transmission Systems* são equipamentos para controle de fluxo de potência, que controlam restrições de transmissão e potência, estas relacionadas com a estabilidade. A Figura 7 apresenta a instalação de FACTS em uma subestação. Os FACTS são controlados por dispositivos baseados em eletrônica de potência que controlam o fluxo de potência

nas LTs e controlam as rotas desses fluxos. Além disso, os FACTS controlam no sistema de corrente alternada: a impedância, a corrente, a tensão e o ângulo de fase (CORREIA, 2009).

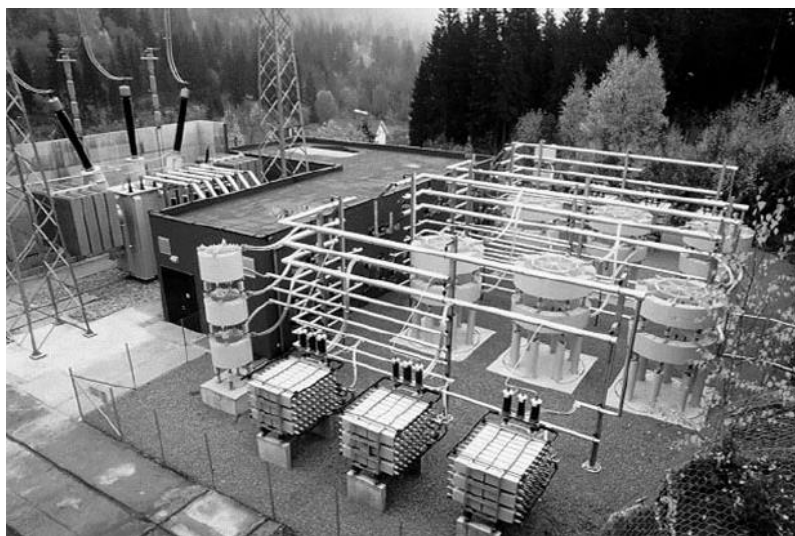


Figura 7 - Dispositivo FACT instalado em uma subestação

Fonte: Electrical engineering portal (2014).

Geralmente a classificação de controladores FACTS varia de trinta a várias centenas de Mvar. Usualmente, eles são integrados a subestação de corrente alternada. Como conversores de alta tensão de corrente contínua, eles exigem controles, sistemas de refrigeração, filtros de harmônicos, transformadores e obras civis relacionadas (ELECTRICAL ENGINEERING PORTAL, 2014).

Segundo Correia (2009) os FACTS trazem vários benefícios ao SEP sendo eles:

- a) Controle do fluxo de potência. O controle é feito de forma otimizada, deixando o sistema mais eficiente.
- b) Aumento dos limites de capacidade da linha até a sua capacidade térmica total. Os limites térmicos variam com o meio externo.
- c) Aumento da estabilidade gerando mais confiança e segurança ao sistema. Isso acaba limitando as sobre tensões e correntes de curto.
- d) Flexibilidade aumentada no local de produção.
- e) Diminui o fluxo de potência reativa.
- f) Diminui as inversões de fluxo de potência.
- g) Acaba reduzindo os custos de produção.

h) Também diminui o impacto ambiental, isso devido a instalação dos FACTS se dar em locais já construídos. Sendo assim não a necessidade de construir um local específico para aloca-lo.

Com relação a esses fatores, pode-se destacar a utilização dos FACTS em dois setores:

a) Aplicação em efeitos localizados com o intuito de controlar a tensão e o amortecimento de modos locais de oscilação.

b) Também em aplicações globais com o intuito de amortecer os modos de oscilação entre áreas.

Os FACTS estão sendo cada vez mais utilizados para sanar os problemas citados acima, isso tudo operando de modo dinâmico e confiável. Ajudam a reduzir os problemas ambientais e os altos custos de ampliação das linhas, porque eles deixam as linhas mais eficientes, pois aumentam a capacidade de transmissão das mesmas (GOMÉZ-EXPÓSITO et al., 2009).

2.5 PRINCIPAIS CONSUMIDORES DE POTÊNCIA REATIVA

Os consumidores de potência reativa absorvem o reativo da rede. Essa potência reativa consumida ser também é denominada de reativa indutiva. Além dos reatores, outros equipamentos, descritos a seguir, também são consumidores de potência reativa (BORDIM, 2009).

2.5.1 Cargas Indutivas

Em qualquer sistema de corrente alternada que haja bobina, haverá a ocorrência de indução. Esse fato acaba defasando os ângulos dos vetores de corrente e tensão e com isso há a existência de uma carga indutiva (ALEXANDER, 2008).

As principais cargas indutivas descritas pela definição anterior são os transformadores e motores elétricos, mostrados na Figura 8.



Figura 8 - Transformador e motor elétrico

Fonte: WEG (2014).

2.5.2 Geradores Síncronos Sub-Excitados

Ao contrário das máquinas sobre-excitadas, as sub-excitadas, operam com valores muito pequenos da corrente de campo, nesse caso o gerador está absorvendo energia reativa. Com isso o gerador assemelha-se a um indutor (LIMA, 2002).

2.5.3 Motores de Indução

Os motores de indução apresentam consumo de energia indutiva devido à energização de sua bobina. Também apresentam um grande consumo de potência reativa em situações em que há queda de tensão e, para esse último caso precisa de muita atenção nos estudos de segurança de tensão, ainda mais quando grandes partes desta carga estão situadas em áreas críticas (GUEDES, 1994).

2.5.4 Reatores *Shunt*, Derivação ou Paralelo

Atualmente, cada vez mais consumidores se situam distantes das unidades geradoras, com isso as LTs estão mais longas acarretando com mais frequência o efeito de capacitância. Para sanar esse problema é preciso colocar reatores em

paralelo com a linha, também conhecidos como reatores *shunt*, de modo a tornar possível a regulação da potência reativa (SIEMENS, 2014).

Essa compensação em derivação ou *shunt* é necessária pelo fato das linhas de transmissão criarem um efeito capacitivo, como citado no item 2.4.3. Geralmente são linhas muito longas que estão operando abaixo da sua potência natural P_0 , com isso tem-se elevação da tensão no barramento receptor. Isso implica em alguns riscos (RESENDE, 2005):

a) efeito Ferranti: a tensão tem um aumento contínuo ao longo da linha, resultando que a tensão ao final da linha é maior que a tensão no início da linha (MUZITANO, 2007).

b) auto excitação: é uma perturbação elétrica relacionada à carga capacitiva que a linha de transmissão gera, por causa disso há um abrupto aumento da tensão da linha (PORTUGAL, 2007).

Isto é, para condições de carga leve e corrente de carga capacitiva da linha, a mesma poderá ter tensões acima da capacidade no terminal da subestação receptora. Por isso faz-se a compensação por reatores. Para esse caso são instaladas reatâncias indutivas entre a linha e a terra ou também por enrolamentos terciários de bancos de transformadores, com o objetivo de compensar o contínuo crescimento da tensão, devido às correntes de cargas capacitivas (MILLER, 1987). Segundo Miller (1987) tais instalações absorvem corrente em atraso e corrigem a elevação de tensão que ocorre nas linhas sob condições de carga leve.

A melhor forma para realizar essa compensação seria distribuir os reatores *shunt* ao longo da linha, mas essa possibilidade é inviável devido ao alto custo envolvido. Por isso os reatores são instalados nas subestações ou até numa subestação intermediária, se houver (PORTUGAL, 2007).

Um reator *shunt*, cuja instalação seja fase-terra, se parece com o enrolamento primário de um transformador abaixador de alta-tensão. Isso é claro, sem o secundário. Esses reatores são bobinas que estão sobre um núcleo de ferro, imersos dentro de um tanque de óleo. O número de espiras da bobina vai ser proporcional à reatância indutiva gerada, por isso deve ser calculado qual o tamanho do reator a ser utilizado (MILLER, 1987).

Para a instalação em terciários de bancos de transformadores, normalmente os reatores são a núcleos de ar e projetados para compensar apenas sob a tensão de operação (MILLER, 1987).

Na Figura 9 tem-se representações dos dois tipos de configuração.

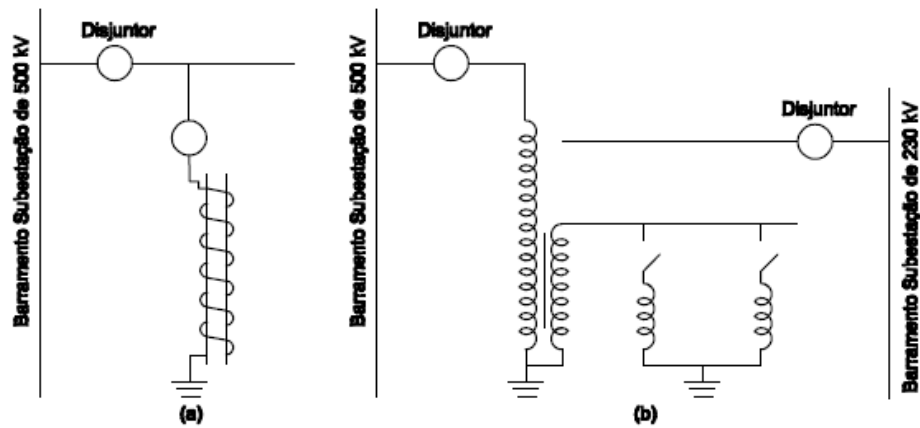


Figura 9—(a) Reator com núcleo de ferro (b) Reator com núcleo a ar no enrolamento terciário de um banco de transformadores

Fonte: Miller (1987).

2.5.5 A Indutância das LTs

As LTs são as conexões das unidades geradoras com as consumidoras. A impedância de um LT depende basicamente da indutância que por sua vez é um dos parâmetros mais importantes relacionados à capacidade de transmissão de energia. Sabe-se que uma corrente elétrica em movimento produz campo magnético e fluxo magnético, a magnitude do fluxo é diretamente proporcional à intensidade da corrente. Além disso, depende também do meio que o condutor está inserido e da distribuição espacial do mesmo (CHAVES, 2012).

O valor da indutância em corrente alternada também depende do comprimento da linha (CHAVES, 2012).

A Equação que relaciona fluxo e corrente é a lei de Ampère:

$$I = \oint H \cdot dl \quad (2.5)$$

Onde:

I = Fluxo de corrente elétrica;

H = Módulo do campo magnetizante;

$\oint dl$ = Integral fechada, sendo dl o comprimento do condutor.

2.5.6 A Indutância de Transformadores

A queda nos valores de tensão do transformador ocorre por meio da indutância. Nesse equipamento, as indutâncias (mútua e de dispersão) também consomem energia reativa do sistema elétrico. Num transformador, quanto maior a tensão da bobina de AT, maior será a relação X/R (reatância/resistência), de forma que muitas vezes a resistência do transformador é desprezada (ALEXANDER, 2008).

2.6 MECANISMOS DE CONTROLE DE TENSÃO

As tensões (módulos) nos sistemas de potência são influenciadas principalmente por:

- Tensão nos terminais dos geradores;
- Impedância das linhas;
- Fluxos de potência ativa e reativa;
- Relação de espiras dos transformadores.

2.6.1 Tensões nos Terminais do Gerador

Os geradores síncronos instalados nas usinas geralmente possuem reguladores automáticos de tensão (RAT). A saída do RAT controla a excitação do gerador de forma que a tensão seja igual a um valor especificado (GOMÉZ-EXPÓSITO et al., 2009).

A tensão no lado de AT do transformador elevador conectado ao gerador pode ser medida e enviada ao RAT, que compensa as quedas de tensão na armadura do gerador e nos enrolamentos do transformador.

Os geradores síncronos também podem operar como compensadores síncronos de modo a controlar a tensão de determinadas barras do sistema por meio de injeção de potência reativa na rede ou pela absorção desse reativo (GOMÉZ-EXPÓSITO et al., 2009).

2.6.2 Impedância das Linhas

Como já foi dito, as impedâncias nas linhas podem causar quedas ou elevação de tensão na barra final da LT. Por isso, se for possível alterar a impedância da LT por meio dos dispositivos FACTS, então é possível controlar a tensão em determinados pontos da rede.

Para dispositivos baseados em eletrônica de potência a resposta é rápida e segura quanto à regulação, isso justifica o seu custo para certas aplicações. Frequentemente há a necessidade de instalar reatores *shunt* para que a tensão seja estável. Em todas as redes em que há um grande número de cabos por fase também é necessário a instalação destes, pois essas redes geram mais reativos (GOMÉZ-EXPÓSITO et al., 2009).

2.6.3 Potência Reativa Injetada na Barra

Quando há um grande transporte de potência reativa, acaba ocorrendo queda de tensão nas barras que pode até resultar em uma instabilidade no sistema. Para que isso não ocorra, deve-se fornecer potência reativa o mais perto possível das cargas. Isso pode ser feito através da excitação de máquinas síncronas, porém os geradores nem sempre estão perto das cargas. Então, a solução mais viável é usar capacitores *shunt* que são chaveados de acordo com a necessidade das cargas do sistema elétrico de potência (GOMÉZ-EXPÓSITO et al., 2009).

2.6.4 Relação de Espiras dos Transformadores

A relação de espiras de um transformador é diretamente proporcional às tensões, tanto no primário como no secundário do transformador. A equação que representa a relação de transformação de um transformador é dada por:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.6)$$

Onde:

V_1 = é a tensão no primário;

V_2 = é a tensão no secundário;

N_1 = é o número de espiras do primário;

N_2 = é o número de espiras do secundário.

Com isso, conclui-se que um transformador reduz a tensão se o número de espiras do secundário for menor que o número de espiras do primário e vice-versa. A relação de transformação pode ser alterada e controlada por meio de tapes no transformador, como será visto no item 2.7.2.

O uso correto destes dispositivos produz um nível de tensão desejado (GOMÉZ-EXPÓSITO et al., 2009).

2.7 CONTROLE PRIMÁRIO E CONTROLE SECUNDÁRIO DE TENSÃO

O controle primário de tensão tem como principal objetivo controlar a geração de reativos de um dispositivo e dessa forma fazer o balanço de reativos no sistema, de modo que as tensões nas barras fiquem dentro do intervalo desejado. Frequentemente a barra de tensão controlada é a mesma ou está próxima à barra que gera potência reativa. O ajuste do valor do reativo é definido conforme o perfil de tensão desejado para o sistema elétrico de potência. A escolha dos valores ajustados é objetivo do controle secundário de tensão (GOMÉZ-EXPÓSITO et al., 2009).

A regulação secundária de tensão, também chamada de controle secundário de tensão vem sendo implementada em alguns países da Europa com o objetivo de melhorar a estabilidade de tensão do SEP (GOMÉZ-EXPÓSITO et al., 2009). Além de aumentar a capacidade de transmissão das linhas (pelos ajustes de potência reativa injetada no sistema), o controle secundário de tensão melhora a segurança do SEP, melhorando a estabilidade de tensão.

O controle secundário de tensão é um controle hierárquico e centralizado, parecido com o controle automático de tensão. Esse tipo de controle supervisiona as tensões de todas as barras e coordena os reguladores primários de tensão (ou RAT – Regulador Automático de Tensão) dos geradores síncronos e outras fontes de potência reativa pertencentes a uma determinada região, de modo a melhorar os parâmetros necessários à estabilidade de tensão do SEP (GOMÉZ-EXPÓSITO et al., 2009).

Os principais dispositivos para o controle da potência reativa e da tensão são descritos a seguir.

2.7.1 Máquinas Síncronas com RAT (Regulador Automático de Tensão)

A operação das máquinas síncronas como geradores normalmente é feita em tensão constante. A manutenção desse valor de tensão pré-estabelecido ocorre através da utilização de um Regulador Automático de Tensão (RAT), cuja função é controlar a excitação do gerador por meio da excitatriz do campo elétrico, de modo que a tensão nos terminais do gerador seja igual ao valor desejado.

O sistema de excitação tem a função de fornecer corrente contínua para o enrolamento de campo da máquina síncrona de modo a gerar o fluxo eletromagnético no rotor. Por isso, a tensão nos terminais da máquina (tensão no estator) pode variar de acordo com a excitação da máquina (GOMÉZ-EXPÓSITO et al., 2009).

A Figura 10 mostra a foto de um regulador automático de tensão eletrônico, e a Figura 11 mostra um diagrama esquemático do gerador com seu sistema de excitação.



Figura 10 - Regulador automático de tensão
Fonte: Reivax (2014).

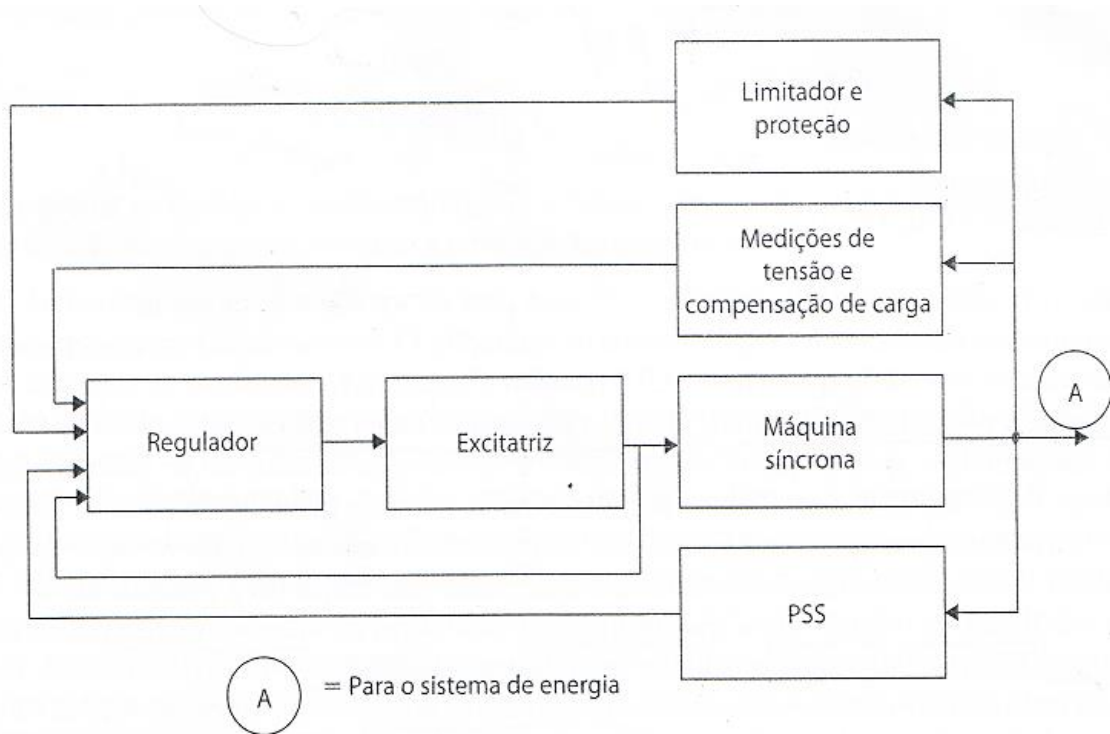


Figura 11- Diagrama esquemático de uma máquina síncrona com regulador automático de tensão, sistema de excitação, funções de controle, proteção e supervisão
 Fonte: Gómez-Expósito et al. (2009).

A excitatriz fornece alimentação ao enrolamento de campo, por meio de uma corrente contínua. Por isso a excitatriz faz parte da “potência do sistema” de excitação.

O regulador trata e amplifica o sinal de controle de uma forma que seja adequado ao controle da excitatriz (GOMÉZ-EXPÓSITO et al., 2009).

As unidades de medições da tensão e compensação de carga medem a tensão nos terminais do gerador, sendo esta retificada e filtrada. A compensação de carga pode ser feita para um ponto distante do gerador, como por exemplo os terminais de AT do transformador, ligado ao gerador (GOMÉZ-EXPÓSITO et al., 2009).

O estabilizador do sistema de potência (*PSS - Power Stability System*) envia um sinal que aumenta o amortecimento do regulador. Geralmente, esses sinais são desvios na velocidade do rotor e aceleração da potência ou frequência da tensão (GOMÉZ-EXPÓSITO et al., 2009).

O limitador e a proteção têm um grande número de funções que garantem que os limites físico e térmico da excitatriz não sejam excedidos. As funções

frequentemente usadas são: proteção de sobre-excitação, de sub-excitação e limitadores de corrente. Dessas funções, muitas não deixam que a máquina síncrona consuma ou produza potência reativa além dos limites (GOMÉZ-EXPÓSITO et al., 2009).

2.7.2 Controle de Mudanças no TAP do Transformador

Os transformadores que possuem a característica de mudança de tapes também são conhecidos como LTC (*Line Tap Change*). Eles controlam o nível de tensão do SEP através da mudança da posição de seus tapes, acarretando uma redistribuição do fluxo de potência reativa no lado primário e no lado secundário do transformador. Os tapes do transformador, geralmente, são subdivididos em 16 ou 32 *steps*, que correspondem a um determinado número de espiras, ou seja, 1,25% ou 0,625% para cada *step*, acarretando uma variação de $\pm 10\%$ em relação a sua tensão nominal. Variando a posição dos tapes do transformador, altera-se a sua relação de transformação, modificando assim a sua tensão na entrada e/ou saída (CORTEZ, 2001).

Existem dois tipos de transformadores com tapes, os que possuem tapes variáveis sobre carga, que operam de forma contínua, e os transformadores com tapes fixos, que precisam ser desenergizados para que seja realizada a mudança do tape. Esses transformadores com mudança de tape são utilizados em sistemas onde há muita variação de tensão, sendo necessário a alteração da relação de transformação dos mesmos para se obter um controle rigoroso de tensão na carga. O uso desses dispositivos é um pouco engessado, pois eles possuem número máximo e mínimo de tapes.

Segundo Blanchon (1987), a operação de um LTC pode contribuir para a instabilidade da tensão em um SEP, pois para manter o valor da tensão da carga dentro dos valores especificados ele varia seus tapes a medida que a carga aumenta, aumentando assim o valor da corrente da rede, alterando o perfil de tensão da carga.

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

A regulação de tensão em uma LT é um processo muito complexo com várias variáveis que se encontram da geração até o final da linha. Na geração, o controle se dá através dos sistemas de excitação das máquinas síncronas acopladas a um regulador de tensão, que equipado com sensores, compara as tensões de saída e de entrada visando obter um nível tensão correto, previamente estipulado.

Tanto na geração de energia como na transmissão há um ponto muito importante a ser considerado que é a potência reativa. Na geração e na transmissão, o controle de tensão é muito afetado pelo fluxo e geração de potência reativa, sendo que essa potência não pode ser transmitida por longas distâncias. Por isso sua regulação da tensão normalmente ocorre no começo da linha ou final, com dispositivos que compensam esses reativos.

Nas LTs ocorrem vários tipos de perdas, e essas perdas afetam o valor da tensão no final da linha, são elas: resistivas, capacitivas e indutivas. As perdas resistivas geram queda de tensão devido à resistividade dos cabos. As perdas capacitivas são geradas através de uma fase com outra ou uma fase com a terra que se comportam como as placas de um capacitor, mas isso só ocorrerá para LTs longas, com comprimento superior a 80 km e altas tensões. Esse efeito capacitivo das linhas gera uma elevação da tensão ao final da LT, o que também não é desejado. As perdas indutivas são geradas através da corrente que passa pela linha do terminal transmissor ao receptor, causadas pela indutância da LT. Essas perdas também reduzem o módulo de tensão na barra final.

Para reduzir as perdas nas linhas, deve-se usar reatores *shunt* e banco de capacitores nos terminais receptores, estes geralmente alocados em subestações. A instalação desses equipamentos reduz o fluxo de reativos na linha, pois diminui a necessidade do reativo das cargas, aproximando o fator de potência total da barra receptora (que é visto pela rede) para o valor unitário. Com isso, as perdas por efeito Joule (resistivas) são reduzidas. Outro tipo de regulação das LTs são os dispositivos FACTS que controlam o fluxo de potência na linha através do uso de dispositivos de eletrônica de potência, tendo como principal objetivo o “encurtamento da linha”, ou seja, diminuição da reatância da LT.

Outra forma de regulação de tensão é através dos transformadores com taps, que nada mais são do que transformadores que podem mudar a tensão de

saída através de um chaveamento da bobina de saída, que pode se dar automaticamente e/ou manualmente. Esse transformador é muito aplicado devido às constantes mudanças das cargas que há no sistema, conseguindo de uma forma simples regular o nível de tensão.

3 SERVIÇOS ANCILARES DE CONTROLE DE TENSÃO

3.1 INTRODUÇÃO

Na literatura existem várias definições sobre serviços ancilares (SAs). Tais definições possuem aspectos que podem variar, mas geralmente os SAs são aceitos como os recursos e ações executadas pelo operador ou agente do SEP que garantem a continuidade do fornecimento de energia elétrica, a segurança do sistema e a manutenção dos valores de frequência e tensão. Segundo Costa (2013), os Serviços Ancilares (SAs) são serviços inseridos de forma implícita à venda de energia elétrica e que não são associados de forma direta à própria energia. O mercado de competição exige que os SAs sejam divididos e a eles sejam dirigidos valores e que sejam comercializados em separado em subconjuntos de serviços para os usuários que deles precisarem.

Conforme Costa (2013), a classificação dos SAs pode ser quanto ao tipo, como formas de suprimento de energia diferentes da carga base à potência constante, como serviços de coordenação, avaliação de segurança. Os SAs têm como principal objetivo prestar serviços à operação do sistema elétrico de geração e transmissão e também serviços requeridos pelos usuários individuais do sistema.

De acordo com a regulamentação da ANEEL, todos os provedores de SAs devem elaborar um Contrato de Prestação de Serviços Ancilares (CPSAs) com o ONS. Os provedores de SAs principais são os provedores de energia reativa por unidades geradoras solicitadas a operar como compensador síncrono, de controle automático de geração (CAG), de sistemas especiais de proteção (SEP) e de auto reestabelecimento (*black start*).

Pela grande dificuldade que se teria em separar cada um dos SAs e custeá-los individualmente, estes foram reunidos segundo aspectos técnicos e econômicos, por ramo de atividade para facilitar seu entendimento e diferenciar sua cobrança também. Segundo Lescano (2004), os SAs ficam assim apresentados.

- Programação, controle e despacho: objetivos de despacho de geração, programação de geração, programação de corte de carga;

- Fornecimento de reativos e controle de perfil de tensão: objetivos de suporte da tensão durante o regime dinâmico do sistema, suporte local de reativo e suporte de reativo ao nível de sistema;
- Regulação e resposta da frequência: objetivos de regulação da frequência, regulação da carga (gerenciamento) e previsão da carga;
- Desequilíbrio da carga x geração: objetivo de controle automático de geração;
- Reserva operativa (reserva girante): objetivos de reserva girante, corte de carga e reserva de transmissão;
- Reserva operativa (reserva suplementar): objetivos de reserva não girante, planejamento da reserva e fornecimento de *backup* automático.

Os custos de operação são remunerados, assim como os de manutenção dos equipamentos de supervisão e controle e de comunicação necessários à participação da usina no CAG. A remuneração ocorre também a toda energia reativa provida por unidades geradoras solicitadas a operar como compensador síncrono, atendidas pela Tarifa de Serviços Ancilares (TSA), aos custos de implantação, operação e manutenção de SEPs e aos custos de operação e manutenção dos equipamentos de *black start* (ONS, 2014).

3.2 SERVIÇOS DE CONTROLE DE TENSÃO

Segundo Chaves (2009), o SA de potência reativa, no âmbito do controle de tensão, está inserido nos serviços primários. Por sua vez, estes compreendem todos os serviços utilizados pelos consumidores e/ou usuários que de forma direta os pagam, como capacidade, consumo de energia, transmissão e distribuição. É um serviço ancilar muito importante para manter a qualidade da energia e a segurança do sistema, principalmente no que se refere à estabilidade de tensão.

A energia reativa é tratada por um SA no aspecto de suporte do perfil de tensão do sistema. Este serviço relaciona-se com a manutenção da integridade do mesmo sistema. A eficácia das 'injeções' de potência reativa é local e as fontes de reativo devem ser localizadas de acordo com topologia da rede. A carga reativa não deve ser suprida remotamente, pois pode causar o aumento de perdas, além de riscos de colapso de tensão. Os geradores independentes não têm obrigatoriedade

de alocarem-se em posições mais favoráveis da rede. De forma direta, o suporte de reativo é um SA do sistema por excelência e deve ser suprido onde necessário, como aspecto inerente do projeto da rede (COSTA, 2013).

O suporte de reativo para as barras de carga resulta da necessidade das cargas do consumidor com fator de potência em atraso. O fornecimento de reativo não pode ser prestado eficientemente pelo gerador do sistema. O sistema de geração, usualmente, supre potência ativa com um fator de potência unitário ou próximo desse valor. A potência reativa fornecida pelos geradores deve existir para atender à necessidade do sistema de transmissão. O suporte de reativo para a carga é responsabilidade do usuário final que pode ser obtido através de meios próprios ou de um provedor (COSTA, 2013).

Tanto em condições normais de operação quanto em debilidades do sistema, a provisão de potência reativa deve manter a tensão e o fator de potência (FP) dentro dos limites de tolerância, a todo instante. Por isto, a todos os agentes do sistema são requeridos à manutenção da tensão e os reativos em níveis toleráveis. Um aspecto importante refere-se à localização dos provedores, pois os requerimentos de reativos e os problemas de tensão são de caráter local, já que a transmissão de reativos resulta em perdas consideráveis e diminui a capacidade de transmissão de potência ativa. Por isso, planejar esse SA bem próximo do lugar onde ele é necessário é o ideal (CHAVES, 2009).

De forma direta, o controle de tensão nada mais é que o suporte de potência reativa ou absorção da mesma pelos geradores ou pelos próprios equipamentos instalados na transmissão para manter os níveis de tensão do sistema entre os limites estabelecidos, ou ainda em cada nó da rede que possua pontos de cargas no limite.

3.2.1 Resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL N°265

Para orientação deste tópico, os itens, definições, artigos, incisos, parágrafos e etc. apresentados abaixo são relativos ao suporte de reativo para regulação de tensão no sistema elétrico de potência (SEP).

A resolução n° 265, de 10 de junho de 2003, estabelece os procedimentos para prestação de serviços ancilares de geração e transmissão.

O DIRETOR-GERAL DA AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, no uso de suas atribuições regimentais, de acordo com deliberação da Diretoria, tendo em vista o disposto no art. 18 do Decreto nº 2.655, de 2 de julho de 1998, no art. 13, parágrafo único, alínea "d" e art. 14, parágrafo único, alínea "e" da Lei nº 9.648, de 27 de maio de 1998, com a redação dada pelo art. 5º da Lei nº 10.433, de 24 de abril de 2002, no inciso IV, art. 4º, Anexo I, do Decreto nº 2.335, de 6 de outubro de 1997, o que consta do Processo nº 48500.005409/02-15, e considerando que os serviços ancilares constituem requisitos técnicos essenciais para que o Sistema Elétrico Interligado Nacional - SIN opere com qualidade e segurança e que a prestação dos serviços ancilares é atividade imprescindível à operação eficiente do SIN em ambiente competitivo e ainda que os montantes de energia a serem reduzidos dos Contratos Iniciais a partir de 2003 foram homologados conforme art. 3º da Resolução nº 267, de 13 de agosto de 1998, em face do que os agentes de geração poderão contratar a prestação de serviços ancilares na proporção da redução de seus respectivos contratos e que em função da Audiência Pública nº 034, de 2002, realizada no período de 23 de dezembro de 2002 a 13 de fevereiro de 2003, foram recebidas sugestões de diversos agentes do setor elétrico, representantes dos consumidores, bem como da sociedade em geral, que contribuíram para o aperfeiçoamento deste ato regulamentar, resolve:

Art. 2º. Definição de serviço ancilar: VI – Suporte de reativos é o fornecimento ou absorção de energia reativa destinada ao controle de tensão da rede de operação, mantendo-a dentro dos limites de variação estabelecidos nos Procedimentos de Rede.

Art. 6º. O Suporte de Reativos deverá ser provido por todas as unidades geradoras integrantes do SIN, que estejam fornecendo potência ativa, sempre que solicitado pela ONS, sem ônus para os demais agentes e consumidores.

§ 1º Ficam excepcionados do disposto no "caput" os casos de unidades geradoras que sejam solicitadas a operar como compensador síncrono, cujo serviço será provido de forma obrigatória e remunerado pela Tarifa de Serviços Ancilares - TSA, a ser estabelecida em resolução específica, visando recuperar os custos adicionais de operação e manutenção, pagos via ESS, devendo ser celebrado Contrato de Prestação de Serviços Ancilares - CPSA entre o ONS e os agentes.

§ 2º O ONS e o Mercado Atacadista de Energia Elétrica - MAE deverão elaborar procedimento específico visando tratar como perdas sistêmicas o consumo das unidades geradoras que operem como compensador síncrono.

Disposições Gerais

"Art. 8º. A ANEEL poderá determinar, mediante justificativa do ONS respaldada em estudos, que os agentes de geração, transmissão e distribuição tenham possibilidade de prestar os serviços ancilares descritos nesta Resolução."

Art. 9º. Os equipamentos dos concessionários de transmissão destinados ao controle de tensão e do fluxo de potência fazem parte de suas respectivas concessões e serão remunerados pelas mesmas regras e procedimentos aplicados às demais instalações de transmissão.

Disposições Transitórias

Art.10. Fica estabelecido o prazo de noventa dias, contado da data de publicação desta Resolução, para que o ONS apresente a ANEEL o Módulo 14 dos Procedimentos de Rede, fixando os procedimentos e as rotinas quanto à contratação, administração e apuração dos serviços ancilares, para fins de análise e aprovação pela Agência.

"Parágrafo único. O ONS deverá efetuar modificações nos respectivos Submódulos dos Procedimentos de Rede, de modo a adequá-los às alterações introduzidas nesta Resolução."

Art. 11. O MAE deverá efetuar as modificações pertinentes nas Regras de Mercado e Procedimentos de Mercado, adequando-os a esta Resolução, para entrar em vigor a partir de 1º de janeiro de 2004.

“Parágrafo único. A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE, sucessora do MAE, conforme Art. 5º da Lei nº 10.848 de 15 de março de 2004, deverá efetuar as modificações pertinentes nas Regras e nos Procedimentos de Comercialização e no que for necessário em seus sistemas computacionais, de modo a adequá-los às alterações desta Resolução, e contabilizar em intervalos de 5 (cinco) minutos, a energia reativa das unidades geradoras quando em operação como compensador síncrono, para entrar em vigor a partir de 1º de março de 2007.” (ONS, 2014).

3.2.2 Procedimentos da ONS

O procedimento de rede que trata dos serviços ancilares é o módulo 14 (Administração dos Serviços Ancilares: Visão Geral). De forma objetiva e sucinta, este módulo será descrito a seguir assim como seu submódulo 14.2 (Arranjos Comerciais para os Serviços Ancilares Prestados pelos Agentes de Geração, de Transmissão e de Distribuição). Já o submódulo 14.3 (Apuração dos Serviços Ancilares), não será discutido neste trabalho.

3.2.3 Administração dos Serviços Ancilares: Visão Geral

Como descrito anteriormente, os serviços ancilares contribuem para o bom funcionamento do SIN e, segundo regulamentação vigente, entre eles está o suporte de reativo. O módulo 14 define que o SA de suporte de reativo é aquele fornecido pelas seguintes fontes:

1. Unidades geradoras que fornecem potência ativa;
2. Unidades geradoras que operam como compensadores síncronos;
3. Equipamentos das concessionárias de transmissão e de distribuição para controle de tensão (ONS, 2014).

O módulo 14 tem como objetivo apresentar os critérios referentes à administração dos serviços ancilares, ou seja, estabelecer os critérios não só para os arranjos comerciais dos serviços ancilares prestados pelos agentes, como também para a celebração dos CPSA e para o processo de apuração referente a esses serviços (ONS, 2014).

A data de vigência deste módulo é de 05 de agosto de 2009.

A Figura 12 mostra o processo de administração dos serviços ancilares prestados pelos agentes e o relacionamento entre as entidades envolvidas.

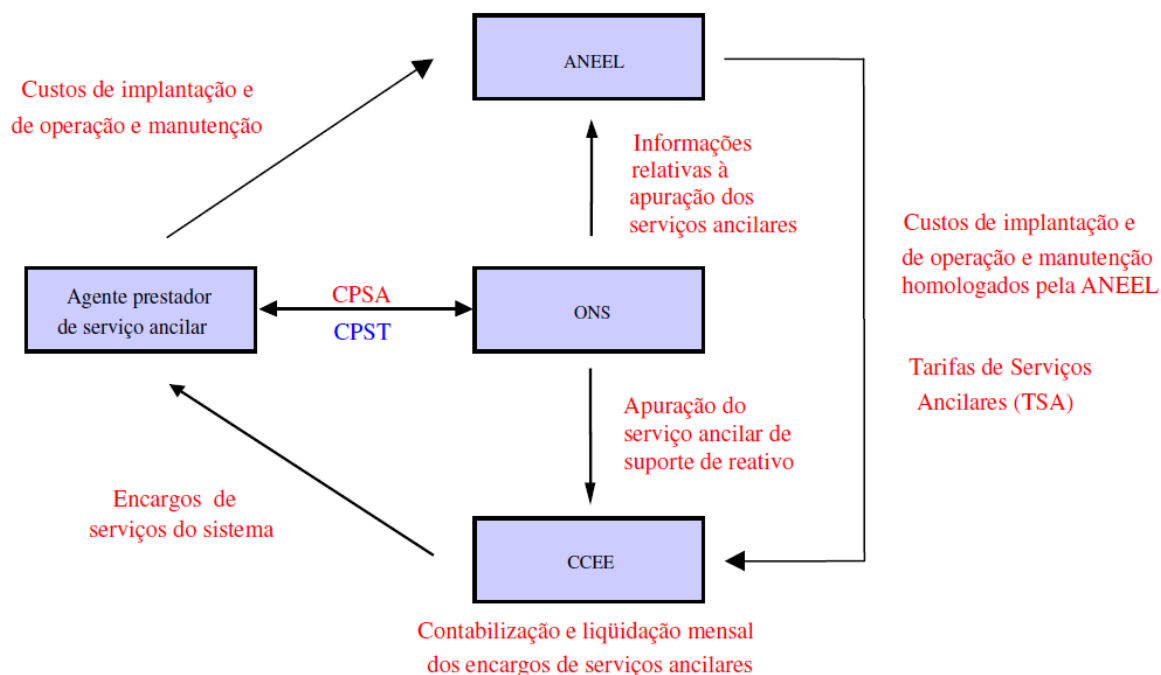


Figura 12 - Esquema do processo de administração de serviços ancilares

Fonte: ONS (2014).

3.2.3.1 Arranjos Comerciais para os Serviços Ancilares Prestados pelos Agentes de Geração, de Transmissão e de Distribuição

Este submódulo 14.2 estabelece as diretrizes para administração desses serviços no que se refere ao estabelecimento dos arranjos comerciais.

O item 2.1 deste submódulo descreve que “o objetivo deste submódulo é estabelecer as diretrizes básicas referentes aos arranjos comerciais dos serviços ancilares prestados pelos agentes de geração, de transmissão e de distribuição, bem como atribuir responsabilidades relativas ao estabelecimento desses arranjos comerciais” (ONS, 2014).

O suporte de reativo prestado por unidades geradoras é descrito abaixo:

- O suporte de reativo deve ser disponibilizado por todas as unidades geradoras integrantes do SIN que estejam fornecendo potência ativa, sem ônus para os demais agentes de operação.
- Ficam excepcionados do disposto no item 5.1.4 (a) deste submódulo as unidades geradoras que sejam solicitadas a operar como compensador síncrono e cujos serviços devem ser prestados de forma obrigatória e ser

remunerados pela Tarifa de Serviços Ancilares – TSA, para recuperar os custos adicionais de operação e manutenção pagos por meio de Encargos de Serviços de Sistema (ESS). Nesses casos, deve ser celebrado CPSA entre o ONS e o agente de geração.

(1) Para novas usinas, a ANEEL pode determinar, no edital de licitação ou em ato autorizativo, respaldada em estudos realizados pelo ONS e definidos no Módulo 4, que a implantação dos sistemas necessários para as unidades geradoras operarem como compensador síncrono deve estar prevista no projeto básico dessas usinas, ou seja, não reverterá em ônus para os demais agentes de operação.

(2) As usinas existentes em operação que venham a operar como compensador síncrono por determinação da ANEEL – com respaldo em estudos realizados pelo ONS e definidos no Módulo 4, bem como para reposição dos sistemas existentes, terão o custo de implantação ou de reposição dos sistemas necessários para essa operação auditado e aprovado pela ANEEL e ressarcido por meio de ESS, devendo ser celebrado CPSA entre o ONS e os agentes de geração.

(3) Os estudos realizados pelo ONS, para propor a prestação desse serviço ancilar, serão realizados conforme os Procedimentos de Rede do ONS e deverão demonstrar a necessidade e a viabilidade técnica e econômica da implantação, incluindo o respectivo orçamento detalhado e a comparação com a alternativa tecnicamente equivalente de geração, transmissão ou distribuição, conforme o caso.

(4) Será tratado como perda sistêmica¹ o consumo² das unidades geradoras que operam como compensador síncrono (ONS, 2014).

Já o suporte de reativo prestado pelos equipamentos das concessionárias de distribuição é descrito, como segue:

(a) Os equipamentos que venham a prestar esse serviço, por determinação da ANEEL, com respaldo em estudos realizados pelo ONS e definidos no Módulo 4, bem como para reposição dos sistemas existentes, terão o custo de implantação ou de reposição dos sistemas necessários para a prestação do serviço de suporte de reativo auditado e aprovado pela ANEEL e ressarcido por meio de ESS, devendo ser celebrado CPSA entre o ONS e os agentes de distribuição.

(b) Os estudos realizados pelo ONS, para propor a prestação desse serviço ancilar, serão realizados conforme Procedimentos de Rede do ONS e deverão demonstrar a necessidade e a viabilidade técnica e econômica da implantação, incluindo o respectivo orçamento detalhado e a comparação com a alternativa tecnicamente equivalente de geração, transmissão ou distribuição, conforme o caso.

A Tabela 1, apresenta uma descrição dos arranjos comerciais dos serviços ancilares, no caso para os relativos ao suporte de reativo, que são prestados pelos agentes de geração, de transmissão e de distribuição.

¹ Perda inerente à operação de um sistema elétrico.

² O consumo da unidade geradora é a potência ativa absorvida pela unidade diretamente do SIN, quando opera como compensador síncrono.

Tabela 1- Descrição dos arranjos comerciais dos serviços ancilares prestados pelos agentes de geração, de transmissão e de distribuição (suporte de reativo)

Tipo de Serviço Ancilar	Forma de Administração	Celebração de CPISA (Sim / Não)	Tipos de Custos a Serem Recuperados pelos Agentes de Geração, de Transmissão e de Distribuição		
			Custos Fixos	Custos Variáveis	
				O&M	Perdas Adicionais
Suporte de Reativo (Geradores)	Obrigatória	Não	-	-	-
Suporte de Reativo (Unidade Geradora que Opera como Compensador Síncrono)	Obrigatória	Sim	X	X	X
Suporte Reativo (Equipamentos das Concessionárias de Distribuição)	Obrigatória	Sim	X	-	-

Fonte: ONS (2014).

3.3 GERADOR OPERANDO COMO COMPENSADOR SÍNCRONO

Quando o gerador opera de forma isolada em um sistema elétrico, o sistema estará sendo alimentado exclusivamente pelo gerador síncrono. A corrente elétrica que alimenta o campo, no enrolamento do rotor, é denominada corrente de excitação. A forma de onda e a frequência da tensão deste sistema separado serão determinadas pelo gerador e a tensão elétrica gerada controlada diretamente pela excitação do campo. Estando o gerador conectado a um sistema elétrico que possui vários geradores interligados, a potência reativa que a máquina vai entregar ao sistema será controlada pela excitação do seu campo, assim a tensão local pode ser eventualmente controlada.

De modo geral, o controle de reativo é realizado com o auxílio de equipamentos, de máquinas ou de dispositivos que, conectados em paralelo, possuem a capacidade de absorver e/ou gerar reativos ao sistema elétrico de potência.

Para Ragnev (2005), o gerador síncrono funcionando como compensador é utilizado para compensar variações lentas de tensão. Assim, fornece ao sistema de transmissão a possibilidade de se entregar para o consumo a máxima potência ativa possível sob um valor nominal de tensão. Para obter isso do gerador síncrono, é suficiente deixar de fornecer água à sua turbina, então, este gerador funciona como um motor síncrono, fornecendo ou absorvendo potência reativa.

Nesta condição, pode-se atuar na regulação de tensão e observa-se que mesmo sobre-excitando ou sub-excitando o gerador, ele continua girando por estar sincronizado ao sistema. Isto ocorre porque a máquina síncrona tem excitação própria que independe do sistema e fica conectada a este operando como motor ou como gerador.

Considerando que um gerador síncrono entrega potência com uma frequência e uma tensão terminal nominal constantes a uma carga com fator de potência constante, a curva chamada de composta, na Figura 13, mostra a corrente de campo necessária para manter constante a tensão nominal de terminal, quando a carga de fator de potência constante for variada (FITZGERALD et al., 2006).

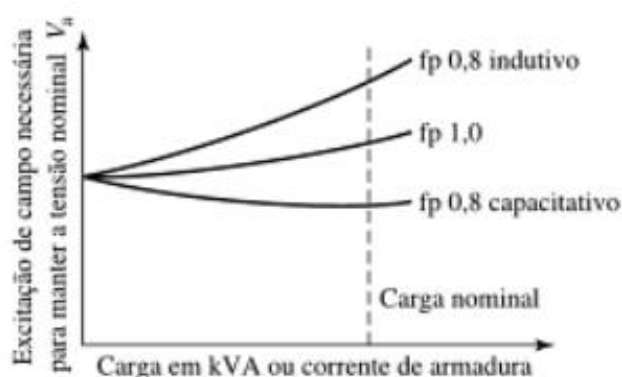


Figura 13 - Forma característica das curvas compostas de um gerador síncrono

Fonte: Fitzgerald et al. (2006).

A máquina síncrona girando a vazio absorve do sistema uma potência suficiente para vencer as suas perdas internas, como o atrito, a ventilação, o aquecimento, etc, pode oferecer a possibilidade de variação da tensão terminal, além de fornecer reativos necessários ao SEP, operando como um compensador síncrono (RAGNEV, 2005).

Os geradores síncronos, assim como todas as máquinas, têm limites de capacidade que devem ser respeitados para se obter a máxima confiabilidade do sistema. Os limites são estabelecidos pelas curvas de capacidade ou *capability*, que somente serão apresentados e não discutidos neste trabalho. São eles:

- (a) Limite de aquecimento da armadura;
- (b) Limite de aquecimento do enrolamento de campo;
- (c) Limite de potência primária;
- (d) Limite de estabilidade;

(e) Limite de excitação mínima.

A composição de todos estes limites forma a curva de capacidade que pode ser visualizada na Figura 14. Esses limites também restringem a operação do gerador como compensador síncrono, principalmente quando o gerador absorve reativos (opera com fator de potência capacitivo).

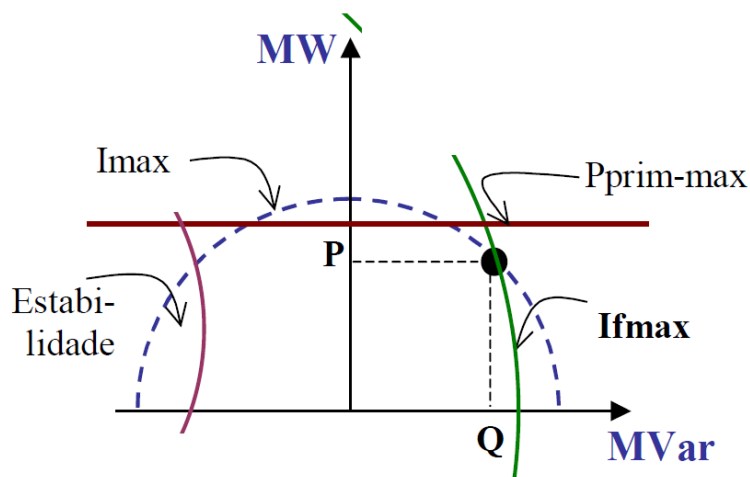


Figura 14 – Fatores que limitam a Curva de Capacidade de um gerador síncrono
 Fonte: Webensino (2014).

Há duas situações que devem ser consideradas na operação do compensador síncrono quanto à amplitude da carga do sistema. Podem ser:

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

De carga leve em que a tensão tende a aumentar devido ao efeito capacitivo das linhas de transmissão, o compensador deverá ser sub-excitado, absorvendo energia reativa e assim reduzindo a tensão nos pontos de consumo (RAGNEV, 2005).

Neste tipo de configuração da máquina síncrona para o sistema, Ragnev (2005) destaca que uma das vantagens que estes compensadores trazem à operação do sistema é evitar que os geradores trabalhem com tensão de geração próxima de seus valores limites e evitar a variação constante nos tapetes dos transformadores elevadores equipados com modificação automática de tapetes sob carga.

Outra vantagem é que o número de manobras com reatores são reduzidas ou manobras de linhas de transmissão, no caso de necessidade de se corrigir o valor de tensão. O ajuste de tensão é facilitado:

Com isto, apenas o ajuste da excitação do compensador síncrono, em uma atuação bastante simples e rápida, evita-se uma série de outras manobras, que seriam necessárias, para se conseguir o mesmo efeito e que envolveriam mais equipamentos, maior comunicação entre unidades, maior tempo e conseqüentemente maior probabilidade de falhas. (RAGNEV, 2005).

3.4 GERADORES DE USINAS ADAPTADOS PARA OPERAR COMO COMPENSADORES SÍNCRONOS

Quando um gerador passa a funcionar como compensador síncrono, a água é retirada da turbina através de uma injeção de ar sob pressão. Ao funcionar apenas com ar sob pressão, a turbina gira livremente em sincronia com o sistema elétrico. Com isto o gerador passa a gerar somente potência reativa para o sistema, também há menos desgaste das partes mecânicas, pois não passará mais água pelo tubo, somente ar. O gasto de potência ativa necessário para o compensador funcionar em sincronia com o sistema é pequeno, da ordem de 2% da potência nominal do gerador, dessa forma evita-se a variação de temperatura do gerador, reduzindo o desgaste dos materiais responsáveis pela isolação dos geradores e transformadores (PERFIL NEWS, 2014).

Na usina de Ilha Solteira foram instalados cinco compressores de ar interligados a um acumulador que mantém o ar sob pressão. Essa é a base do funcionamento do compensador em síncrono. Quando o ONS solicita a operação do compensador, o ar sob pressão é injetado na máquina para a retirada da água do tubo de sucção até um nível abaixo da parte inferior da turbina. Assim, a turbina passa a girar livre, sincronizada ao sistema e sem atrito com a água. O nível da água é controlado por sensores que acionam a injeção de mais ar sob pressão quando o nível fica acima daquele determinado para a operação como compensador síncrono (PERFIL NEWS, 2014).

Para a conversão de gerador para compensador o primeiro passo é o fechamento das palhetas do distribuidor da turbina, seguido da injeção de ar sob pressão. A partir desse momento, passa a ser gerada apenas energia reativa. A

reversão de compensador para gerador é feita com a abertura das palhetas do distribuidor. A água que entra no caracol expulsa o ar que está no local e produz uma bolha na saída da água a jusante, gerando-se a partir de então predominantemente energia ativa para suprimento das cargas do sistema (PERFIL NEWS, 2014).

Na data de 1º de dezembro de 2010, a usina de Ilha Solteira começou a operar com quatro unidades geradoras funcionando como compensadores síncronos. Essa usina está localizada entre os municípios de Ilha Solteira (SP) e Selvíria (MS). A Companhia Elétrica de São Paulo (CESP) investiu 11 milhões de reais em adaptações das quatro unidades geradoras, com o intuito de gerar apenas potência reativa. Cada unidade está gerando aproximadamente 168 Mvar e todo esse gasto com as adaptações foi ressarcido pelos encargos de serviço do sistema (ESS), conforme resolução prevista pela ANEEL (PERFIL NEWS, 2014).

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Neste capítulo foram vistos vários aspectos da regulação de tensão e de suporte de reativo em sistemas de potência, sendo esses denominados de serviços Ancilares de Controle de Tensão.

O Operador Nacional do Sistema (ONS), mas também a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) atuam diretamente sobre o sistema conforme a resolução nº 265.

Alguns conceitos sobre os SAs foram estabelecidos e confirmados pela própria resolução da ANEEL e pelo módulo 14 e submódulos da ONS. Desta forma, ficou evidente e definido qual será o SA de estudo deste trabalho, suporte de reativo ao sistema.

Ainda, pelos estudos sobre os geradores síncronos, foram apresentados os conceitos pertinentes à área de interesse, fazer com que o gerador síncrono opere como um compensador síncrono. Alguns tópicos relacionados à máquina síncrona não foram abordados de forma mais profunda por não serem o objetivo deste trabalho, podendo ser encontrados na bibliografia sobre Máquinas Síncronas.

4 ESTUDO E ANÁLISE

4.1 INTRODUÇÃO

Para a análise de sistemas de energia elétrica é cada vez mais comum a utilização de ferramentas computacionais, sendo totalmente inviável a análise de sistemas elétricos de médio e grande porte sem o uso destas ferramentas. No Brasil o Centro de Pesquisas da Eletrobrás (CEPEL) é responsável pelo desenvolvimento de tais programas capazes de simular e testar o sistema elétrico brasileiro, considerando a operação em regime permanente ou operação com contingências.

O CEPEL desenvolve programas que são muito úteis para as concessionárias de energia elétrica, na área de operação e planejamento de sistemas elétricos. Como por exemplo, o programa ANAREDE (Programa de Análise de Redes) que é muito utilizado por empresas que atuam na área de sistemas de potência. Para as simulações deste trabalho, foi utilizada a versão do programa ANAREDE disponibilizada gratuitamente pelo CEPEL, com número limitado de barras, para fins de ensino e pesquisa.

O software ANAREDE realiza a análise do sistema elétrico em regime permanente e utiliza um conjunto de aplicações computacionais que realizam a análise das redes elétricas. Este programa dispõe de várias ferramentas de análise para o sistema elétrico, tais como análise de fluxo de potência, análise de equivalência de redes, análise de contingências, análise de sensibilidade de tensão, análise de sensibilidade de fluxo, análise de redespacho de potência ativa e análise de fluxo de potência continuado.

Neste trabalho, devido ao tema abordado, foi utilizada a ferramenta de análise de sensibilidade de tensão, que tem como objetivo o cálculo de fatores de sensibilidade de primeira ordem, que informam o comportamento de certas grandezas da rede elétrica, denominadas variáveis dependentes, em relação à variação de uma grandeza de controle, denominada variável de controle. Os fatores de sensibilidade de uma variável dependente também podem ser calculados em relação a um conjunto de variáveis de controle (CEPEL, 2009).

Como variáveis de controle são consideradas as magnitudes de tensão em barras de geração, injeções de potência reativa em barras de geração, injeções de

potência reativa em barras de carga e tapes de transformadores. E como variáveis dependentes são consideradas as magnitudes de tensão em barras de carga e gerações de potência reativa (CEPEL, 2009).

4.2 ESTUDO DO CASO BASE

O estudo do caso base foi desenvolvido utilizando o *software* ANAREDE para simulação de diferentes situações no SEP, considerando diferentes tipos de carga e configurações e também analisando a compensação de energia reativa no sistema. Para isto foi utilizado um sistema elétrico padrão do IEEE de 14 barras. O modelo disponibilizado pelo *software* não possui limite de geração e tensão, por isso as capacidades de geração e carregamento, máximas e mínimas, das linhas foram estimadas, já os valores referentes aos limites de tensão são baseados na Resolução N° 505/2001 da ANEEL.

Primeiramente são apresentadas as simulações do sistema de 14 barras de forma detalhada, e depois é feito o estudo comparativo com os resultados alcançados.

4.2.1 Sistema IEEE 14 Barras – Construção do Caso Base

O programa ANAREDE disponibiliza em sua galeria de exemplos o modelo de sistema de potência do IEEE de 14 barras, sendo que após carregá-lo obtém-se o diagrama unifilar, mostrado na Figura 15.

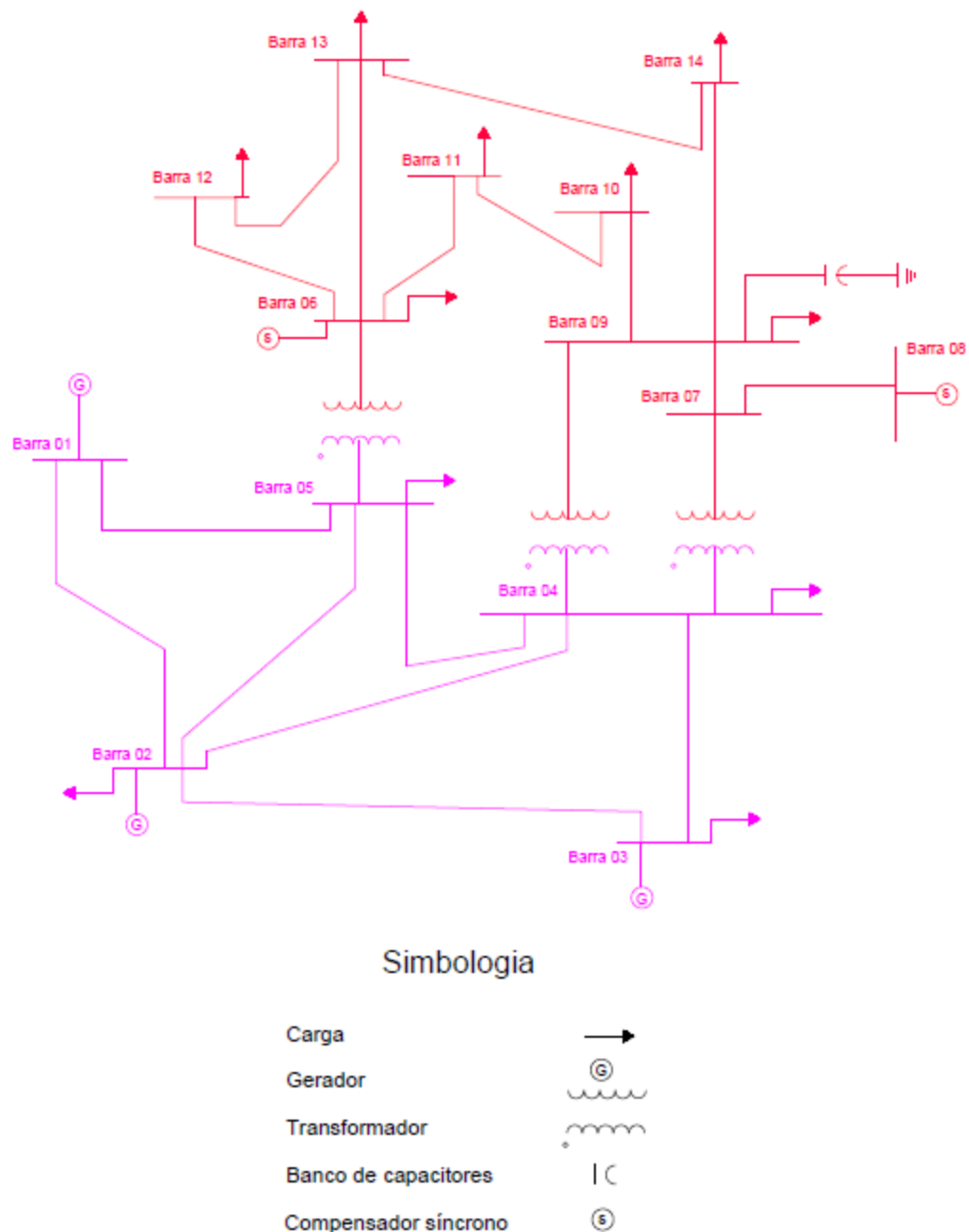


Figura 15 - Representação gráfica do sistema de potência IEEE 14 barras através do ANAREDE
 Fonte: Adaptado do ANAREDE.

Inicialmente, foram modificadas as tensões de base antes e depois dos transformadores. As tensões do sistema de 14 barras originais são de 1kV para todas as barras e no sistema simulado foram modificadas para 138kV (cor roxo) no primário dos transformadores e para 32kV (cor rosa) no secundário dos transformadores.

Após essas mudanças de tensão, o sistema foi simulado obtendo-se o resultado do fluxo de potência usando o comando gerenciador de dados, foi

exportado o relatório de características dos equipamentos presentes no sistema. Os dados do sistema de 14 barras são mostrados nas tabelas a seguir. Os dados das barras são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados das barras (IEEE14)

Barra	Tipo	Tensão (pu)	Tensão (kV)	Ângulo (graus)	Tensão Base (kV)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)	Geração Reativa Mínima (Mvar)	Geração Reativa Máxima (Mvar)	Shunt (Mvar)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)
1	Ref	1.060	146.3	0	138	232.3	-16.6	Aberto	Aberto	0	0	0
2	PV	1.045	144.2	-5	138	40.0	43.5	-40	50	0	21.7	12.7
3	PV	1.01	139.4	-12.7	138	0	25.0	0	40	0	94.2	19
4	PQ	1.018	140.4	-10.3	138	0	0	0	0	0	47.8	-3.9
5	PQ	1.020	140.7	-8.8	138	0	0	0	0	0	7.6	1.6
6	PV	1.070	34.2	-14.2	32	0	12.7	-6	24	0	11.2	7.5
7	PQ	1.062	34	13.4	32	0	0	0	0	0	0	0
8	PV	1.090	34.9	13.4	32	0	17.6	-6	24	0	0	0
9	PQ	1.056	33.8	14.9	32	0	0	0	0	21.2	29.5	16.6
10	PQ	1.051	33.6	-15.1	32	0	0	0	0	0	9	5.8
11	PQ	1.057	33.8	14.8	32	0	0	0	0	0	3.5	1.8
12	PQ	1.055	33.8	-15.1	32	0	0	0	0	0	6.1	1.6
13	PQ	1.050	33.6	-15.2	32	0	0	0	0	0	13.5	5.8
14	PQ	1.036	33.1	-16.0	32	0	0	0	0	0	14.9	5.0

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

A Tabela 3 apresenta os dados dos geradores. Os limites de geração ativa máxima são considerados ABERTOS, ou seja, não existe um limite máximo.

Tabela 3 - Dados dos geradores (IEEE14)

Barra	Tipo	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Ativa Mínima (MW)	Geração Ativa Máxima (MW)	Geração Reativa (Mvar)	Geração Reativa Mínima (Mvar)	Geração Reativa Máxima (Mvar)	Geração (MVA)
1	Ref	1.060	0	232.3	0	Aberto	-16.6	Aberto	Aberto	232.9
2	PV	1.045	-5	40.0	0	Aberto	43.5	-40	50	59.1
3	PV	1.01	-12.7	0	0	Aberto	25.0	0	40	25
6	PV	1.070	-14.2	0	0	Aberto	12.7	-6	24	12.7
8	PV	1.090	13.4	0	0	Aberto	17.6	-6	24	17.6

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

A Tabela 4 apresenta os dados das linhas. Os limites de fluxo de potência (normal, emergência e do equipamento) são considerados ABERTOS, ou seja, não existe um limite máximo.

Tabela 4 - Dados de linha (IEEE14)

Barra		Tap	Limites de Fluxo de Potência (MVA)			Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (Mvar)
De	Para		Normal	Emergência	Equipamento			
1	2		Aberto	Aberto	Aberto	1.94	5.92	5.280
1	5		Aberto	Aberto	Aberto	5.40	22.30	4.920
2	3		Aberto	Aberto	Aberto	4.70	19.80	4.380
2	4		Aberto	Aberto	Aberto	5.81	17.63	3.400
2	5		Aberto	Aberto	Aberto	5.69	17.39	3.460
3	4		Aberto	Aberto	Aberto	6.70	17.10	1.280
4	5		Aberto	Aberto	Aberto	1.33	4.21	0
4	7	0.969	Aberto	Aberto	Aberto	0	20.91	0
4	9	0.978	Aberto	Aberto	Aberto	0	55.62	0
5	6	0.932	Aberto	Aberto	Aberto	0	25.20	0
6	11		Aberto	Aberto	Aberto	9.50	19.89	0
6	12		Aberto	Aberto	Aberto	12.29	25.58	0
6	13		Aberto	Aberto	Aberto	6.62	13.03	0
7	8		Aberto	Aberto	Aberto	0	17.62	0
7	9		Aberto	Aberto	Aberto	0	11	0
9	10		Aberto	Aberto	Aberto	3.18	8.45	0
9	14		Aberto	Aberto	Aberto	12.71	27.04	0
10	11		Aberto	Aberto	Aberto	8.20	19.21	0
12	13		Aberto	Aberto	Aberto	22.09	19.99	0
13	14		Aberto	Aberto	Aberto	17.09	34.80	0

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

Como é possível visualizar na Tabela 2, existem cinco barras de geração, essas barras mantêm o módulo da tensão em valores fixos, portanto é necessário que se mude as tensões originais (da Tabela 2) para valores de tensão que estejam dentro da faixa determinada pela agência reguladora. Os limites de tensão determinados pela ANEEL são encontrados na Resolução da N° 505/01, e podem ser conferidos nas tabelas 5 e 6 a seguir.

Tabela 5 - Faixa de variação da tensão nominal para as barras de 1kV a 69kV

Classificação da Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)
Adequada	$0,93 TC \leq TL \leq 1,05 TC$
Precária	$0,90 TC \leq TL \leq 0,93 TC$
Crítica	$TL < 0,90 TC$ ou $TL > 1,05 TC$

Fonte: ANEEL, Resolução N° 505, de 26 de Novembro de 2001.

Tabela 6 - Faixa de variação da tensão nominal para as barras de 69kV a 230kV

Classificação da Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)
Adequada	$0,95 TC \leq TL \leq 1,05 TC$
Precária	$0,90 TC \leq TL \leq 0,95 TC$ ou $1,05 TC < TL \leq 1,07 TC$
Crítica	$TL < 0,90 TC$ ou $TL > 1,07 TC$

Fonte: ANEEL, Resolução Nº 505, de 26 de Novembro de 2001.

Além das barras PV as barras PQ também precisam se enquadrar aos limites de tensão estabelecidos pela ANEEL, por isso foi modificado os parâmetros de limite de tensão do ANAREDE no menu Dados de Grupo de Tensão (DGLT).

Após esta análise percebeu-se que seria melhor para o estudo se todos os compensadores de reativo e capacitores do sistema fossem retirados, para se criar um déficit de energia reativa e assim simular maneiras de solucionar esse déficit de reativo e os problemas causados. Assim foi retirado o banco de capacitor que existia na barra 9 e as barras 6 e 3 foram alteradas para barras PQ, isso porque as barras 6 e 3 só geravam potência reativa, isto é, estavam com compensadores síncronos conectados às suas barras³. As tensões nas barras foram alteradas conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Modificação de tensão nas barras

Barra	Tensão (pu)	Tensão Modificada (pu)
1	1.6	1
2	1.045	1.015
8	1.090	1.020

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

Os limites de tensões nas barras foram ajustados conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Ajuste dos limites de tensão

Tensão (kV)	Tensão (pu)				Grupo
	Mínima	Máxima	Mínima Emergência	Máxima Emergência	
138	0.95	1.05	0.9	1.07	0
32	0.93	1.05	0.9	1.05	1

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

³A barra 8 é PV e está conectada a um compensador síncrono, mas não será modificada porque este compensador na verdade faz a função da reatância de um transformador de 3 saídas. Isto porque o ANAREDE não possui transformador de 3 enrolamentos na modelagem de entrada de dados, portanto esta é uma maneira encontrada para contornar este problema.

Após todos os ajustes descritos obtém-se um novo sistema de 14 barras, o qual foi usado como sistema base para todas as simulações. Após inseri-lo no programa ANAREDE, e simular o fluxo de potência, obtém-se os resultados apresentados nas tabelas 9 e 10.

Os dados das barras são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados das barras do Caso Base para as simulações

Barra	Tipo	Tensão (pu)	Tensão (kV)	Ângulo (graus)	Tensão Base (kV)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)	Geração Reativa Mínima (Mvar)	Geração Reativa Máxima (Mvar)	Shunt (Mvar)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)
1	Ref	1	138	0	138	235.8	-65.3	Aberto	Aberto	0	0	0
2	PV	1.015	140.1	-6.1	138	40.0	160.9	-40	50	0	21.7	12.7
3	PQ	0.934	128.9	-14.1	138	0	0	0	0	0	94.2	19
4	PQ	0.952	131.4	-11.5	138	0	0	0	0	0	47.8	-3.9
5	PQ	0.955	131.8	-9.8	138	0	0	0	0	0	7.6	1.6
6	PQ	0.965	30.9	-16.2	32	0	0	0	0	0	11.2	7.5
7	PQ	0.976	31.2	-15.1	32	0	0	0	0	0	0	0
8	PV	1.020	32.6	-15.1	32	0	25.36	-6	24	0	0	0
9	PQ	0.952	30.5	-17	32	0	0	0	0	0	29.5	16.6
10	PQ	0.946	30.3	-17.2	32	0	0	0	0	0	9	5.8
11	PQ	0.952	30.5	-16.9	32	0	0	0	0	0	3.5	1.8
12	PQ	0.949	30.4	-17.2	32	0	0	0	0	0	6.1	1.6
13	PQ	0.944	30.2	-17.3	32	0	0	0	0	0	13.5	5.8
14	PQ	0.928	29.7	-18.4	32	0	0	0	0	0	14.9	5.0

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

A Tabela 10 apresenta os dados do fluxo de potência nas barras do sistema Base.

Tabela 10 - Dados do fluxo de potência nas barras para o Caso Base

Barra		Fluxo			Perdas		Tap
De	Para	MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	
1	2	161.1	-70.9	176.1	5.94	12.76	
1	5	74.7	5.7	74.9	3.05	7.89	
2	1	-155.2	83.7	173.7	5.94	12.76	
2	3	73.3	26.4	76.7	2.82	7.73	
2	4	57.7	17.9	59.5	2.09	3.06	
2	5	42.5	20.2	46.4	1.27	0.51	
3	2	-70.5	-18.6	78	2.82	7.73	
3	4	-23.7	-0.4	25.4	0.43	-0.04	
4	2	-55.6	-14.9	60.4	2.09	3.06	
4	3	24.2	0.3	25.4	0.43	-0.04	
4	5	-61	12.7	65.5	0.57	1.8	
4	7	28.4	-0.4	29.9	0	1.79	0.978
4	9	16.2	6.2	18.2	0	1.73	0.969
5	1	-71.6	2.2	75	3.05	7.89	
5	2	-41.3	-19.7	47.9	1.27	0.51	
5	4	61.6	-10.8	65.5	0.57	1.8	
5	6	43.7	26.7	53.7	0	6.3	0.932
6	5	-43.7	-20.4	50	0	6.3	
6	11	7.1	3.3	8.1	0.06	0.13	
6	12	7.8	2.5	8.5	0.09	0.18	
6	13	17.7	7.2	19.7	0.26	0.51	
7	4	-28.4	2.2	29.2	0	1.79	
7	8	0	-24.3	24.9	0	1.09	
7	9	28.4	22.1	36.9	0	1.5	
8	7	0	25.4	24.9	0	1.09	
9	4	-16.2	-4.5	17.6	0	1.73	
9	7	-28.4	-20.6	36.9	0	1.5	
9	10	5.5	4.5	7.5	0.02	0.05	
9	14	9.6	3.9	10.9	0.15	0.32	
10	9	-5.5	-4.5	7.5	0.02	0.05	
10	11	-3.5	-1.3	4	0.01	0.03	
11	6	-7.0	-3.1	8.1	0.06	0.13	
11	10	3.5	1.3	4	0.01	0.03	
12	6	-7.7	-2.3	8.5	0.09	0.18	
12	13	1.6	0.7	1.8	0.01	0.01	
13	6	-17.4	-6.7	19.7	0.26	0.51	
13	12	-1.6	-0.7	1.8	0.01	0.01	
13	14	5.5	1.6	6	0.06	0.13	
14	9	-9.5	-3.6	10.9	0.15	0.32	
14	13	-5.4	-1.4	6	0.06	0.13	

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

A Tabela 11 apresenta os totais de geração, carga e perdas do Caso Base.

Tabela 11 - Totais de geração, carga e perdas do Caso Base

Geração		Carga		Perdas	
MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar
275.8	121	259	73.5	16.8	47.5

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

Pode-se observar na Tabela 10 que tais modificações causaram 4 problemas:

- A tensão na barra 3 ficou abaixo do mínimo estipulado pela ANEEL;
- A tensão na barra 14 ficou abaixo do mínimo estipulado pela ANEEL;
- A barra 2 ultrapassou o limite de geração de reativos;
- A barra 8 ultrapassou o limite de geração de reativos.

4.2.2 Simulações – Correções dos Problemas

As simulações descritas a seguir mostram como o suporte adequado de reativos ao sistema é capaz de solucionar os problemas mostrados na Tabela 10. As simulações consideram que não houve alterações nos parâmetros da rede, ou seja, os transformadores e linhas continuam iguais ao Caso Base.

São apresentadas duas situações distintas para análise e verificação de possíveis soluções:

Caso 1: correção de reativo inserindo compensadores síncronos.

Caso 2: correção das tensões e do reativo usando banco de capacitores.

Caso 1

Objetivo: Corrigir a potência reativa e controlar a tensão das barras do sistema colocando geradores síncronos para trabalhar a vazio fornecendo ou absorvendo reativos do sistema (funcionando como compensadores síncronos).

Para esta simulação o primeiro problema foi designar o melhor local para alocar o compensador síncrono. Sabendo que a energia reativa normalmente é compensada perto das cargas ou nas usinas, com isso há duas alternativas a serem analisadas, nas barras de geração ou nas barras de carga (subestações). Contudo, considerando que as unidades geradoras das usinas podem ser adaptadas para operarem a vazio como compensadores síncronos, optou-se por alocar os compensadores síncronos nas barras de geração.

A barra escolhida para alocar o compensador síncrono foi a barra 2. Para determinar a potência necessária desse compensador, as tensões das barras 1 e 2 (que são barras de tensão controlada) foram sendo aumentadas, até que todas as tensões nas barras do sistema estivessem dentro do intervalo determinado pela ANEEL, descrito nas Tabelas 5 e 6.

Se as tensões nas barras do sistema não estivessem dentro dos limites estabelecidos, o teste era considerado inválido. A Tabela 12 mostra os testes feitos, mostrando os valores de tensão nas barras 1 e 2 escolhidos em cada teste. Para cada tensão escolhida, os geradores das barras 1 e 2 têm que gerar o reativo necessário a essa tensão como mostrado na Tabela 12.

Os testes 4, 6 e 7 resultaram em tensões válidas para todas as barras, porém a opção escolhida foi o teste 7.

Na Tabela 12, pode-se ver que para os valores de tensão $V_1=1,045$ e $V_2=1,03$, obtém-se o menor valor de reativo gerado pelos geradores 1 e 2, por isso o teste 7 foi escolhido.

Tabela 12 - Potência (Mvar) gerada x Tensão gerada

Teste Compensador Síncrono	Tensão Barra 1 (pu)	Tensão Barra 2 (pu)	Potência Gerada (Mvar) Barra 1	Potência Gerada (Mvar) Barra 2	Limites de Tensão Barras PQ
1	1,0	1,0	-36.1	127.6	Inválido
2	1,01	1,01	-35.9	128.7	Inválido
3	1,02	1,02	-35.8	129.9	Inválido
4	1,03	1,03	-35.6	131.2	Válido
5	1,035	1,025	-15.3	109.4	Inválido
6	1,04	1,03	-15.1	110	Válido
7	1,045	1,03	-4.7	99.4	Válido

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

No Caso Base, o gerador da barra 2 está gerando 50 Mvar, ou seja, o seu limite máximo, como pode ser visto na Tabela 9. Para se obter o perfil de tensão encontrado no teste 7, é necessário ter quase 100 Mvar gerados na barra 2. Por isso, no Caso 1 foi considerado que foi instalado um compensador síncrono de 50 Mvar nessa barra.

Os dados obtidos para o Caso 1 encontram-se nas tabelas 13 e 14. Os dados das barras são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 - Dados de barra obtidos para o Caso 1

Barra	Tipo	Tensão (pu)	Tensão (kV)	Ângulo (graus)	Tensão Base (kV)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)	Geração Reativa Mínima (Mvar)	Geração Reativa Máxima (Mvar)	Shunt (Mvar)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)
1	Ref	1.045	144.2	0.	138.0	233.9	-4.75	Aberto	Aberto	0	0	0
2	PV	1.030	142.1	-5.2	138.0	40.	99.36	-40.	100.	0	21.7	12.7
3	PQ	0.953	131.5	-13.	138.0	0	0	0	0	0	94.2	19.
4	PQ	0.971	134.0	-10.	138.0	0	0	0	0	0	47.8	-3.9
5	PQ	0.977	134.8	-8.8	138.0	0	0	0	0	0	7.6	1.6
6	PQ	0.986	31.6	-15.	32.0	0	0	0	0	0	11.2	7.5
7	PQ	0.988	31.6	-14.	32.0	0	0	0	0	0	0	0
8	PV	1.020	32.6	-14.	32.0	0	18.36	-6.	24.	0	0	0
9	PQ	0.967	30.9	-16.	32.0	0	0	0	0	0	29.5	16.6
10	PQ	0.963	30.8	-16.	32.0	0	0	0	0	0	9.	5.8
11	PQ	0.970	31.0	-16.	32.0	0	0	0	0	0	3.5	1.8
12	PQ	0.970	31.0	-16.	32.0	0	0	0	0	0	6.1	1.6
13	PQ	0.964	30.8	-16.	32.0	0	0	0	0	0	13.5	5.8
14	PQ	0.946	30.3	-17.	32.0	0	0	0	0	0	14.9	5.

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

É possível comparar como o perfil das tensões melhorou em relação ao Caso Base. Os valores das tensões ficaram mais próximos dos valores de referência estipulados pela ANEEL. A Figura 16 mostra o perfil das tensões em ambos os casos.

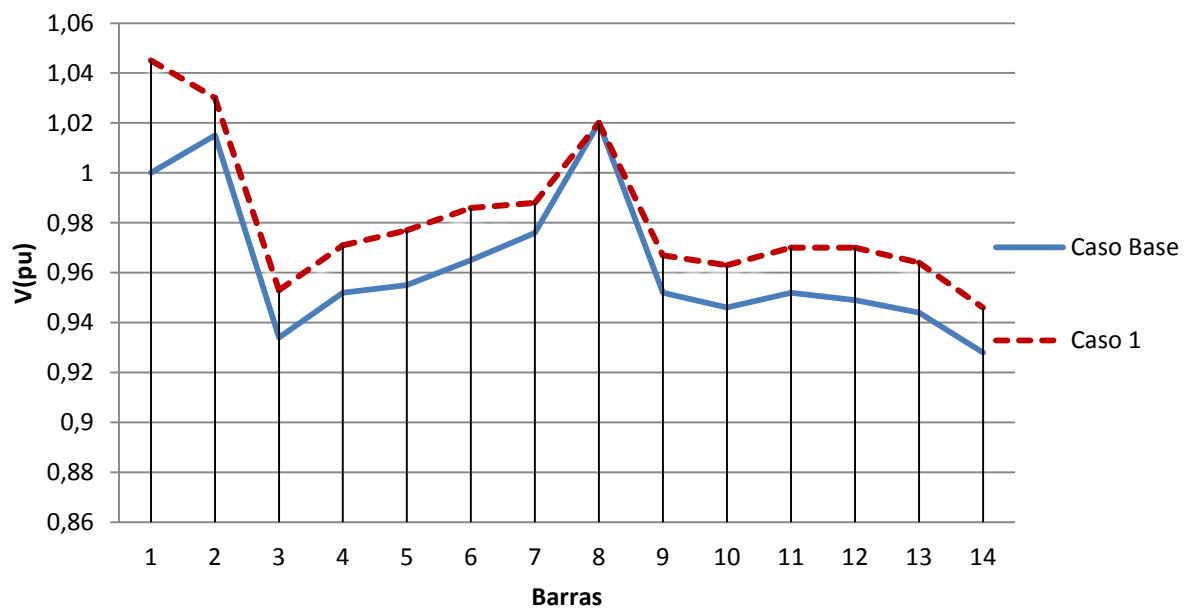


Figura 16 - Perfil das tensões para o Caso Base e Caso 1

Fonte: Própria.

A Tabela 14 apresenta os resultados do fluxo de potência obtidos após a simulação.

Tabela 14 - Dados de fluxo obtidos para o Caso 1

Barra		Fluxo			Perdas		Tap
De	Para	MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	
1	2	159.1	-21	153.6	4.55	8.21	
1	5	74.8	16.3	73.2	2.94	7.12	
2	1	-154.6	29.2	152.7	4.55	8.21	
2	3	73	25	75	2.69	7.04	
2	4	57.4	15.9	57.8	1.97	2.58	
2	5	42.5	16.5	44.3	1.15	0.02	
3	2	-70.4	-18.0	76.2	2.69	7.04	
3	4	-23.8	-1	25.1	0.42	-0.11	
4	2	-55.4	-13.3	58.6	1.97	2.58	
4	3	24.3	0.9	25	0.42	-0.11	
4	5	-61	6.1	63.1	0.53	1.68	
4	7	28.2	3.2	29.2	0	1.70	0.978
4	9	16.1	7.1	18.1	0	1.71	0.969
5	1	-71.8	-9.1	74.1	2.94	7.12	
5	2	-41.3	-16.5	45.5	1.15	0.02	
5	4	61.5	-4.4	63.1	0.53	1.68	
5	6	44.1	28.5	53.7	0	6.31	0.932
6	5	-44.1	-22.1	50	0	6.31	
6	11	7.3	4.3	8.6	0.07	0.15	
6	12	7.8	2.6	8.4	0.09	0.18	
6	13	17.8	7.7	19.6	0.26	0.50	
7	4	-28.2	-1.5	28.5	0	1.70	
7	8	0	-17.8	18	0	0.57	
7	9	28.2	19.3	34.5	0	1.31	
8	7	0	18.4	18	0	0.57	
9	4	-16.1	-5.3	17.5	0	1.71	
9	7	-28.2	-17.9	34.5	0	1.31	
9	10	5.3	3.5	6.6	0.01	0.04	
9	14	9.5	3.2	10.3	0.14	0.29	
10	9	-5.3	-3.5	6.6	0.01	0.04	
10	11	-3.7	-2.3	4.5	0.02	0.04	
11	6	-7.2	-4.2	8.6	0.07	0.15	
11	10	3.7	2.4	4.5	0.02	0.04	
12	6	-7.7	-2.5	8.4	0.09	0.18	
12	13	1.6	0.9	1.9	0.01	0.01	
13	6	-17.5	-7.2	19.6	0.26	0.50	
13	12	-1.6	-0.8	1.9	0.01	0.01	
13	14	5.6	2.2	6.3	0.07	0.14	
14	9	-9.3	-2.9	10.3	0.14	0.29	
14	13	-5.6	2.1	6.3	0.07	0.14	

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

A Tabela 15 apresenta os totais de geração, carga e perdas do Caso 1, obtidos após a simulação.

Tabela 15–Totais de geração, carga e perdas obtidos para o Caso 1

Geração		Carga		Perda	
MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar
273.9	113	259	73.5	14.9	39.5

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

Análise dos resultados do Caso 1 com relação ao Caso Base

A Tabela 16 apresenta um resumo dos resultados dos casos Base e Caso 1. Pode-se observar nessa tabela que todas as barras PQ tiveram um aumento no nível de tensão, isso ocorreu devido ao aumento do fornecimento de potência reativa ao sistema. Através desse aumento, o déficit de potência reativa no sistema foi sanado com apenas um compensador síncrono de 50 MVA na barra 2. Além disso, um fator importante para melhorar os níveis de tensão com apenas um compensador síncrono, foi o aumento da tensão das barras 1 e 2, como pode ser visualizado na Tabela 12. Com esse aumento de tensão nas barras de geração foi assegurado um valor de tensão maior nas barras mais distantes dos geradores, pois estas barras estão sem nenhum tipo de compensação de potência reativa nas suas mediações.

Tabela 16 - Diferenças entre tensões e potência reativa do Caso Base em relação ao Caso 1

Caso Base				Caso 1				Diferenças		
Barra	Tensão (pu)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)	Barra	Tensão (p.u.)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)	Tensão	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)
1	1	235,8	-65,3	1	1,045	233,9	-4,75	0,045	-1,9	60,55
2	1,015	40	160,9	2	1,03	40	99,36	0,015	0	-61,54
3	0,934	0	0	3	0,953	0	0	0,019	0	0
4	0,952	0	0	4	0,971	0	0	0,019	0	0
5	0,955	0	0	5	0,977	0	0	0,022	0	0
6	0,965	0	0	6	0,986	0	0	0,021	0	0
7	0,976	0	0	7	0,988	0	0	0,012	0	0
8	1,02	0	25,36	8	1,02	0	18,36	0	0	-7
9	0,952	0	0	9	0,967	0	0	0,015	0	0
10	0,946	0	0	10	0,963	0	0	0,017	0	0
11	0,952	0	0	11	0,97	0	0	0,018	0	0
12	0,949	0	0	12	0,97	0	0	0,021	0	0
13	0,944	0	0	13	0,964	0	0	0,02	0	0
14	0,928	0	0	14	0,946	0	0	0,018	0	0

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

As linhas que tiveram maior alteração no fluxo de potência foram as linhas que estão conectadas à barra 1, como pode ser visto na Tabela 17. Isso porque na barra 1 houve um aumento significativo da tensão na barra, como pode-se visualizar na Tabela 16. Sabendo-se que o aumento da tensão reflete um aumento proporcional da potência reativa, a mudança nos valores da tensão causam uma diminuição no consumo de potência reativa de 60,55 Mvar na barra 1, conforme pode ser constatado na Tabela 16. Assim, pode-se observar que quando o sistema consome menos reativo, a compensação de tensão necessária para sua estabilização é pequena.

Tabela 17 - Diferenças entre os fluxos do Caso Base em relação ao Caso 1

Barra		Fluxo (Caso Base)			Fluxo (Caso 1)			Diferenças		
De	Para	MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	MVA
1	2	161,1	-70,9	176,1	159,1	-21	153,6	-2	49,9	-22,5
1	5	74,7	5,7	74,9	74,8	16,3	73,2	0,1	10,6	-1,7
2	3	73,3	26,4	76,7	73	25	75	-0,3	-1,4	-1,7
2	4	57,7	17,9	59,5	57,4	15,9	57,8	-0,3	-2	-1,7
2	5	42,5	20,2	46,4	42,5	16,5	44,3	0	-3,7	-2,1
3	4	-23,7	-0,4	25,4	-23,8	-1	25,1	-0,1	-0,6	-0,3
4	5	-61	12,7	65,5	-61	6,1	63,1	0	-6,6	-2,4
4	7	28,4	-0,4	29,9	28,2	3,2	29,2	-0,2	3,6	-0,7
4	9	16,2	6,2	18,2	16,1	7,1	18,1	-0,1	0,9	-0,1
5	6	43,7	26,7	53,7	44,1	28,5	53,7	0,4	1,8	0
6	11	7,1	3,3	8,1	7,3	4,3	8,6	0,2	1	0,5
6	12	7,8	2,5	8,5	7,8	2,6	8,4	0	0,1	-0,1
6	13	17,7	7,2	19,7	17,8	7,7	19,6	0,1	0,5	-0,1
7	8	0	-24,3	24,9	0	-17,8	18	0	6,5	-6,9
7	9	28,4	22,1	36,9	28,2	19,3	34,5	-0,2	-2,8	-2,4
9	10	5,5	4,5	7,5	5,3	3,5	6,6	-0,2	-1	-0,9
9	14	9,6	3,9	10,9	9,5	3,2	10,3	-0,1	-0,7	-0,6
10	11	-3,5	-1,3	4	-3,7	-2,3	4,5	-0,2	-1	0,5
12	13	1,6	0,7	1,8	1,6	0,9	1,9	0	0,2	0,1
13	14	5,5	1,6	6	5,6	2,2	6,3	0,1	0,6	0,3

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

A Tabela 18 demonstra que houve uma diminuição das perdas na maioria das linhas de transmissão, ocasionado pela diminuição do fluxo de potência reativa através delas. Com menos fluxo de potência reativa, o módulo da corrente na linha é menor, de modo que a potência dissipada na resistência e na reatância indutiva da linha diminui, reduzindo as perdas, uma vez que essas perdas são definidas pelos parâmetros da linha e pela corrente que circula na LT.

Os resultados mostrados na Tabela 18 demonstram que a compensação de reativos do sistema, além de melhorar o perfil das tensões das barras, também é capaz de reduzir as perdas sistêmicas.

Essa redução das perdas se reflete em um melhor aproveitamento da capacidade da rede de transmissão, bem como em economia dos recursos energéticos das fontes de geração.

Tabela 18 - Diferenças entre tensões e potência reativa do Caso Base em relação ao Caso 1

Barra		Perdas (Caso Base)		Perdas (Caso 1)		Diferenças	
De	Para	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar
1	2	5,94	12,76	4,55	8,21	-1,39	-4,55
1	5	3,05	7,89	2,94	7,12	-0,11	-0,77
2	3	2,82	7,73	2,69	7,04	-0,13	-0,69
2	4	2,09	3,06	1,97	2,58	-0,12	-0,48
2	5	1,27	0,51	1,15	0,02	-0,12	-0,49
3	4	0,43	0,04	0,42	0,11	-0,01	0,07
4	5	0,57	1,8	0,53	1,68	-0,04	-0,12
4	7	0	1,79	0	1,7	0	-0,09
4	9	0	1,73	0	1,71	0	-0,02
5	6	0	6,3	0	6,31	0	0,01
6	11	0,06	0,13	0,07	0,15	0,01	0,02
6	12	0,09	0,18	0,09	0,18	0	0
6	13	0,26	0,51	0,26	0,5	0	-0,01
7	8	0	1,09	0	0,57	0	-0,52
7	9	0	1,5	0	1,31	0	-0,19
9	10	0,02	0,05	0,01	0,04	-0,01	-0,01
9	14	0,15	0,32	0,14	0,29	-0,01	-0,03
10	11	0,01	0,03	0,02	0,04	0,01	0,01
12	13	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0
13	14	0,06	0,13	0,07	0,14	0,01	0,01

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

Caso 2

Objetivo: Corrigir a potência reativa e controlar a tensão das barras do sistema, alocando capacitores nas barras.

Para a compensação de potência reativa, este caso é o mais utilizado e o mais barato. Para esta simulação o primeiro problema foi designar as melhores barras para alocar os capacitores. Sabe-se que quando a energia reativa é fornecida

para barra, além de compensar o reativo, a tensão da barra se eleva. Portanto, seria a melhor opção colocar os capacitores nas barras com as menores tensões.

Para otimizar o sistema foram realizadas simulações para alocar os bancos de capacitores de modo que sua potência reativa fosse a menor possível, e também a quantidade de capacitores fosse a mínima possível, e com isso resolver os problemas do sistema do Caso Base. A Tabela 19 foi criada a partir de várias simulações sucessivas, para que se atingissem os seguintes objetivos:

- Níveis de tensão nas barras PV próximos de 1 pu;
- Limites de tensão nas barras PQ dentro dos limites estabelecidos pela ANEEL;
- Potência reativa gerada dentro do limite máximo suportado pelos geradores.

As barras escolhidas para alocar os bancos de capacitores foram as barras 3, 4, 5, 10, 13 e 14. Para determinar a potência necessária desses bancos de capacitores, as tensões das barras 1 e 2 (que são as barras de tensão controlada) foram sendo ajustadas, até que todas as tensões nas barras do sistema estivessem dentro do intervalo determinado pela ANEEL, descrito nas Tabelas 5 e 6.

Se as tensões nas barras do sistema não estivessem dentro dos limites estabelecidos, o teste era considerado inválido. A Tabela 19 mostra os testes feitos, mostrando os valores de tensão nas barras 1 e 2 escolhidos em cada teste. Para cada tensão escolhida, os bancos de capacitores das barras 3, 4, 5, 10, 13 e 14 têm que gerar o reativo necessário a essa tensão como mostrado na Tabela 19.

Através da Tabela 19 pode-se concluir que as simulações 15, 16, 17 e 18 resolvem todos os problemas do Caso Base. Destas simulações a que está com as tensões mais próximas de 1 pu é a barra 18, portanto esta que será utilizada para o estudo.

Tabela 19 - Potência (Mvar) gerada x Tensão gerada

Testes Banco de Capacitores	Tensão Barra 1	Tensão Barra 2	Barra 3 (Mvar)	Barra 4 (Mvar)	Barra 5 (Mvar)	Barra 10 (Mvar)	Barra 13 (Mvar)	Barra 14 (Mvar)	Potência Gerada (Mvar)	Limites de Tensão Barras PQ
1	1,00	1,015	5	-	-	-	-	5	Inválido	Inválido
2	1,01	1,025	5	-	5	-	-	5	Inválido	Inválido
3	1,01	1,025	5	-	5	-	5	5	Inválido	Válido
4	1,01	1,025	5	5	5	-	5	5	Inválido	Válido
5	1,02	1,025	5	5	5	-	5	5	Inválido	Válido
6	1,025	1,025	5	5	5	-	5	5	Inválido	Válido
7	1,03	1,025	5	5	5	-	5	5	Inválido	Válido
8	1,04	1,025	5	5	5	-	5	5	Inválido	Válido
9	1,04	1,03	5	5	5	5	5	5	Inválido	Válido
10	1,04	1,03	5	5	5	5	5	5	Inválido	Válido
11	1,04	1,03	15	5	5	5	5	5	Inválido	Válido
12	1,04	1,03	15	10	10	5	5	5	Inválido	Válido
13	1,04	1,03	15	10	10	5	5	10	Inválido	Válido
14	1,04	1,03	20	10	10	5	5	10	Inválido	Válido
15	1,04	1,02	20	10	10	5	5	10	Válido	Válido
16	1,03	1,02	20	10	10	5	5	10	Válido	Válido
17	1,035	1,015	20	10	10	5	5	10	Válido	Válido
18	1,02	1,00	20	10	10	5	5	10	Válido	Válido

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

No Caso Base o gerador da barra 2 está gerando 50 Mvar, ou seja, o seu limite máximo, como pode ser visto na Tabela 9. Para se obter o perfil de tensão encontrado no teste 18, é necessário ter bancos de capacitores gerando entre 5 Mvar e 20 Mvar nas barras 3, 4, 5, 10, 13 e 14.

Os resultados obtidos para o Caso 2 encontram-se nas tabelas a seguir. Os dados das barras são mostrados na Tabela 20.

Tabela 20 - Dados de barra obtidos para o Caso 2

Barra	Tipo	Tensão (pu)	Tensão (kV)	Ângulo (graus)	Tensão Base (kV)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)	Geração Reativa Mínima (Mvar)	Geração Reativa Máxima (Mvar)	Shunt (Mvar)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)
1	Referência	1020	140.8	0.	138.0	233.7	-5.3	Aberto	Aberto	0	0	0
2	PV	1000	138.0	-5.4	138.0	40.	45.63	-40.	50.	0	21.7	12.7
3	PQ	0.954	131.7	-14.	138.0	0	0	0	0	20.	94.2	19.
4	PQ	0.968	133.6	-11.	138.0	0	0	0	0	10.	47.8	-3.9
5	PQ	0.972	134.1	-9.5	138.0	0	0	0	0	10.	7.6	1.6
6	PQ	1003	32.1	-16.	32.0	0	0	0	0	0	11.2	7.5
7	PQ	0.995	31.8	-15.	32.0	0	0	0	0	0	0	0
8	PV	1020	32.6	-15.	32.0	0.	14.66	-6.	24.	0	0	0
9	PQ	0.983	31.5	-16.	32.0	0	0	0	0	0	29.5	16.6
10	PQ	0.982	31.4	-17.	32.0	0	0	0	0	5.	9.	5.8
11	PQ	0.988	31.6	-16.	32.0	0	0	0	0	0	3.5	1.8
12	PQ	0.991	31.7	-17.	32.0	0	0	0	0	0	6.1	1.6
13	PQ	0.989	31.6	-17.	32.0	0	0	0	0	5.	13.5	5.8
14	PQ	0.981	31.4	-18.	32.0	0	0	0	0	10.	14.9	5.

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

A Figura 17 permite comparar o perfil das tensões do Caso 2 com o Caso Base.

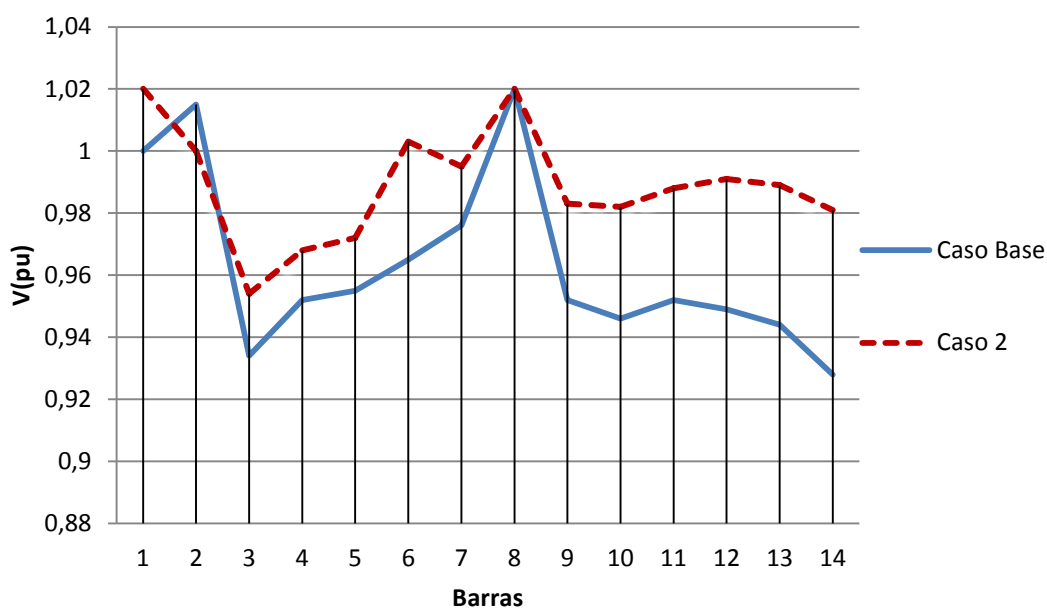


Figura 17 - Perfil das tensões para o Caso Base e Caso 2

Fonte: Própria.

Comparando os resultados obtidos no Caso 1 e no Caso 2, pode-se observar que o nível de tensão obtido pelas barras PQ no Caso 2 foram significativamente melhores, isso porque no Caso 2 é possível alocar os bancos de capacitores diretamente nas barras em que os níveis de tensão eram mais baixos.

A

Tabela 21 apresenta os resultados do fluxo de potência nas linhas do sistema do Caso 2 obtidos após a simulação.

Tabela 21 - Dados de fluxo obtidos para o Caso 2

Barra		Fluxo			Perdas		Tap
De	Para	MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	
1	2	157,8	-12,4	155,2	4,66	8,83	
1	5	75,9	7,1	74,7	3,04	7,65	
2	1	-153,2	21,3	154,6	4,66	8,83	
2	3	73,1	8,9	73,6	2,57	6,64	
2	4	56,5	0,7	56,5	1,86	2,34	
2	5	41,8	2,1	41,9	1	-0,3	
3	2	-70,5	-2,2	74	2,57	6,64	
3	4	-23,6	1,4	24,8	0,41	-0,13	
4	2	-54,6	1,7	56,4	1,86	2,34	
4	3	24	-1,6	24,9	0,41	-0,13	
4	5	-61,2	11	64,2	0,55	1,74	
4	7	28	-1,5	28,9	0	1,67	0.978
4	9	16	3,6	17	0	1,5	0.969
5	1	-72,8	0,5	74,9	3,04	7,65	
5	2	-40,8	-2,4	42,1	1	-0,3	
5	4	61,7	-9,3	64,2	0,55	1,74	
5	6	44,2	19,1	49,6	0	5,38	0.932
6	5	-44,2	-13,7	46,2	0	5,38	
6	11	7,5	3,7	8,3	0,07	0,14	
6	12	7,6	1,1	7,6	0,07	0,15	
6	13	18	1,5	18	0,21	0,42	
7	4	-28,2	3,2	28,3	0	1,68	
7	8	0	-14,3	14,4	0	0,36	
7	9	28	11,1	30,3	0	1,01	
8	7	0	14,7	14,4	0	0,36	
9	4	-16	-2,1	16,5	0	1,51	
9	7	-28	-10,1	30,3	0	1,01	
9	10	5,1	-0,7	5,3	0,01	0,02	
9	14	9,4	-3,7	10,2	0,13	0,28	
10	9	-5,1	0,7	5,3	0,01	0,02	
10	11	-3,9	-1,7	4,3	0,02	0,04	
11	6	-7,4	-3,5	8,3	0,07	0,15	
11	10	3,9	1,7	4,3	0,02	0,04	
12	6	-7,5	-0,9	7,6	0,07	0,15	
12	13	1,4	-0,7	1,6	0,01	0,01	
13	6	-17,8	-1,1	18	0,22	0,42	
13	12	-1,4	0,7	1,6	0,01	0,01	
13	14	5,7	-0,6	5,8	0,06	0,12	
14	9	-9,2	4	10,2	0,13	0,28	
14	13	-5,7	0,7	5,8	0,06	0,12	

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

Tabela 22 - Totais de geração, carga e perdas obtidos para o Caso 2

Geração		Carga		Perda	
MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar
273,7	55	259	73,5	14,7	37,9

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

Análise dos resultados do Caso 2 com relação ao Caso Base

A Tabela 23 mostra como o fornecimento de reativo pelos bancos de capacitores melhoram os níveis de tensão nas barras PQ. Com os bancos de capacitores pode-se distribuir melhor entre as barras o fornecimento da potência reativa capacitiva ao sistema, com isso diminuem-se as perdas de reativo na transmissão aumentando a eficácia da compensação de reativo. Ao final da compensação de potência reativa na barra, o fluxo de potência aumenta e com o aumento de potência reativa capacitiva tem-se também aumento dos níveis de tensão nas barras.

Tabela 23 - Diferenças entre tensões e potência reativa do Caso Base em relação ao Caso 2

Caso Base				Caso 2				Diferenças		
Barra	Tensão (pu)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)	Barra	Tensão (pu)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)	Tensão	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)
1	1	235,8	-65,3	1	1,02	233,7	-5,3	0,02	-2,1	60
2	1,015	40	160,9	2	1	40	45,63	-0,015	0	-115,27
3	0,934	0	0	3	0,954	0	0	0,02	0	0
4	0,952	0	0	4	0,968	0	0	0,016	0	0
5	0,955	0	0	5	0,972	0	0	0,017	0	0
6	0,965	0	0	6	1,003	0	0	0,038	0	0
7	0,976	0	0	7	0,995	0	0	0,019	0	0
8	1,02	0	25,36	8	1,02	0	14,66	0	0	-10,7
9	0,952	0	0	9	0,983	0	0	0,031	0	0
10	0,946	0	0	10	0,982	0	0	0,036	0	0
11	0,952	0	0	11	0,988	0	0	0,036	0	0
12	0,949	0	0	12	0,991	0	0	0,042	0	0
13	0,944	0	0	13	0,989	0	0	0,045	0	0
14	0,928	0	0	14	0,981	0	0	0,053	0	0

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

A Tabela 24 mostra os fluxos de potência nas linhas, comparando o Caso 2 com o Caso Base.

A partir da diferença dos fluxos do Caso Base para o Caso 2, pode-se concluir que o fluxo de potência nas linhas diminuiu para a maioria, principalmente da barra 1 para a barra 2. Na prática esse resultado demonstra que a capacidade dessa linha ficou com uma sobra de 20,9 MVA de potência, como pode ser observado na Tabela 24, e isso mostra como a potência reativa pode sobrecarregar uma linha de

transmissão, reduzindo a capacidade de transmissão de potência ativa. A compensação dos reativos melhora o rendimento das linhas, o que pode ajudar a postergar a construção de novas linhas.

Tabela 24 - Diferenças entre os fluxos do Caso Base em relação ao Caso 2

Barra		Fluxo (Caso Base)			Fluxo (Caso 2)			Diferenças		
De	Para	MW	Mvar	Mva	MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	MVA
1	2	161,1	-70,9	176,1	157,8	-12,4	155,2	-3,3	58,5	-20,9
1	5	74,7	5,7	74,9	75,9	7,1	74,7	1,2	1,4	-0,2
2	3	73,3	26,4	76,7	73,1	8,9	73,6	-0,2	-17,5	-3,1
2	4	57,7	17,9	59,5	56,5	0,7	56,5	-1,2	-17,2	-3
2	5	42,5	20,2	46,4	41,8	2,1	41,9	-0,7	-18,1	-4,5
3	4	-23,7	-0,4	25,4	-23,6	1,4	24,8	0,1	1,8	-0,6
4	5	-61	12,7	65,5	-61,2	11	64,2	-0,2	-1,7	-1,3
4	7	28,4	-0,4	29,9	28	-1,5	28,9	-0,4	-1,1	-1
4	9	16,2	6,2	18,2	16	3,6	17	-0,2	-2,6	-1,2
5	6	43,7	26,7	53,7	44,2	19,1	49,6	0,5	-7,6	-4,1
6	11	7,1	3,3	8,1	7,5	3,7	8,3	0,4	0,4	0,2
6	12	7,8	2,5	8,5	7,6	1,1	7,6	-0,2	-1,4	-0,9
6	13	17,7	7,2	19,7	18	1,5	18	0,3	-5,7	-1,7
7	8	0	-24,3	24,9	0	-14,3	14,4	0	10	-10,5
7	9	28,4	22,1	36,9	28	11,1	30,3	-0,4	-11	-6,6
9	10	5,5	4,5	7,5	5,1	-0,7	5,3	-0,4	-5,2	-2,2
9	14	9,6	3,9	10,9	9,4	-3,7	10,2	-0,2	-7,6	-0,7
10	11	-3,5	-1,3	4	-3,9	-1,7	4,3	-0,4	-0,4	0,3
12	13	1,6	0,7	1,8	1,4	-0,7	1,6	-0,2	-1,4	-0,2
13	14	5,5	1,6	6	5,7	-0,6	5,8	0,2	-2,2	-0,2

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

Outra conclusão que pode-se observar na Tabela 24 é que as barras que estão localizadas perto das barras de geração aumentaram a sua capacidade de transmissão. Isso porque com o sistema compensado em vários pontos, diminuiu a potência reativa que sai dos geradores e vai para o sistema.

A Tabela 25 mostra as perdas em cada linha de transmissão, para o Caso Base e Caso 2. Como aconteceu no Caso 1, a compensação dos reativos feita com os bancos de capacitores também ajudou a reduzir as perdas.

Tabela 25 – Perdas de potência nas linhas para o Caso Base e para o Caso2

Barra		Perdas (Caso Base)		Perdas (Caso 2)		Diferenças	
De	Para	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar
1	2	5,94	12,76	4,66	8,83	-1,28	-3,93
1	5	3,05	7,89	3,04	7,65	-0,01	-0,24
2	3	2,82	7,73	2,57	6,64	-0,25	-1,09
2	4	2,09	3,06	1,86	2,34	-0,23	-0,72
2	5	1,27	0,51	1	-0,3	-0,27	-0,81
3	4	0,43	0,04	0,41	-0,13	-0,02	-0,17
4	5	0,57	1,8	0,55	1,74	-0,02	-0,06
4	7	0	1,79	0	1,67	0	-0,12
4	9	0	1,73	0	1,5	0	-0,23
5	6	0	6,3	0	5,38	0	-0,92
6	11	0,06	0,13	0,07	0,14	0,01	0,01
6	12	0,09	0,18	0,07	0,15	-0,02	-0,03
6	13	0,26	0,51	0,21	0,42	-0,05	-0,09
7	8	0	1,09	0	0,36	0	-0,73
7	9	0	1,5	0	1,01	0	-0,49
9	10	0,02	0,05	0,01	0,02	-0,01	-0,03
9	14	0,15	0,32	0,13	0,28	-0,02	-0,04
10	11	0,01	0,03	0,02	0,04	0,01	0,01
12	13	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0
13	14	0,06	0,13	0,06	0,12	0	-0,01

Fonte: Adaptado do ANAREDE.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Com a análise dos diversos resultados obtidos conclui-se que o compensador síncrono, assim como o banco de capacitores, têm seu papel fundamental em um sistema de potência. Pode-se dizer que o compensador síncrono tem a vantagem de fornecer potência reativa para o sistema na quantidade necessária, variando os valores de forma suave, porém quando um gerador funciona a vazio, gerando apenas potência reativa, seu custo é muito elevado. Apesar disso, esses equipamentos são bastante utilizados para melhorar o desempenho do sistema de transmissão, que não poderia operar de forma satisfatória sem os compensadores síncronos. Mas vale lembrar que o compensador síncrono compensa a falta ou excesso de reativo apenas no local ou nas barras próximas, uma vez que a energia reativa não pode viajar por longas distâncias no SEP.

Com a simulação do Caso 1 feita com o compensador síncrono, pode-se concluir nas análises dos resultados, que com apenas um compensador síncrono gerando 50 Mvar no sistema, as tensões nas barras PV precisaram ser aumentadas para se alcançar o perfil de tensões desejado. Isso foi feito para que as tensões das

demais barras chegassem a níveis adequados até mesmos nas barras de carga mais distantes, e para que a potência reativa consumida na geração diminuísse.

Já os bancos de capacitores se mostraram mais versáteis, colocando bancos em várias barras distribuídas pelo sistema, conseguiu-se elevar a tensão nas barras PQ. Isso tudo de uma maneira mais uniforme e distribuída pelo sistema, tendo assim uma melhor regulação das tensões nas barras não controladas. Na simulação do Caso 2 o objetivo foi usar o mínimo de bancos para regular as tensões e fornecer a potência reativa, não se esquecendo dos limites mínimos de tensão estipulados pela ANEEL. Além disso, a regulação de tensão quando feita pontualmente, diminuiu as perdas da linha, porque o fluxo de potência foi menor na maioria das linhas, comparado ao Caso 1 com o uso do compensador síncrono.

Portanto, devido ao baixo custo dos capacitores em relação aos compensadores síncronos, para casos gerais, os bancos de capacitores sempre serão a primeira opção. Em casos especiais nos quais a necessidade de geração de potência reativa seja muito alta, torna-se viável economicamente adaptar um gerador síncrono para funcionar como compensador síncrono.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um estudo sobre as principais causas de desvios nos níveis de tensão que podem ocorrer durante a transmissão de energia elétrica desde a geração até as subestações, onde estão as cargas. Além disso, o trabalho descreve os principais geradores e consumidores de potência reativa do sistema elétrico de potência, destacando os seus principais mecanismos de controle de tensão.

Neste estudo, foram verificados pontos críticos e de grande importância no processo de transmissão de potência no SEP. Foi constatado que o controle de tensão e o fluxo de potência são muito afetados quando as linhas de transmissão são muito longas. Por isso, seus controles são realizados no começo e/ou final da linha, por geradores síncronos operando como compensadores síncronos no início da linha e bancos de capacitores conectados às barras de carga, no final das LTs. O estudo apresentado sobre os serviços ancilares, módulo 14 dos Procedimentos de Rede do ONS, permitiu uma abordagem técnica de como é contratado e operado na prática o suporte de reativo nos sistemas elétricos de potência, um dos objetos deste trabalho. O estudo sobre o gerador síncrono operando como compensador síncrono mostrou algumas questões relativas à operação de máquinas síncronas que devem ser levadas em consideração ao se colocar tal equipamento para suprir a demanda de reativos do sistema.

Para comprovar os estudos teóricos, foram realizadas simulações utilizando o programa ANAREDE que possui uma interface gráfica amigável e que permite uma visão do sistema funcionando como um todo, assim como cada um dos elementos de sua composição.

Com base nos estudos, foi possível realizar simulações no sistema exemplo IEEE de 14 barras disponibilizado pelo próprio programa.

O programa ANAREDE tem ferramentas que permitem o usuário aplicar seus conhecimentos na construção de novos modelos e analisar com precisão suas anomalias e possíveis soluções. Pode-se também limitar algumas grandezas na simulação do sistema, por meio de filtros durante o processo de parametrização, possibilitando visualizar os problemas por meio de destaque nos equipamentos que tiveram seus limites extrapolados.

Com isto, foram estudados dois casos distintos bastante importantes para o estudo do suporte de reativo, a do gerador síncrono operando como compensador síncrono e do banco de capacitores.

Analisado o primeiro caso, constatou-se que o compensador síncrono tem bastante relevância quanto a fornecer reativo para o sistema. Em contrapartida, para um gerador síncrono operar a vazio, seu custo torna-se elevado. Portanto, a usina geradora deveria ter um gerador sobressalente ou não estar operando no máximo da capacidade de geração. Como estudado, isto é um SA bastante aplicado, sempre que possível e necessário. Outro ponto, é que este tipo de compensação é interessante no local de correção ou próximo dele.

No segundo caso, foram obtidos resultados mais significativos, pois os bancos de capacitores são mais versáteis e fáceis de aplicar em relação aos equipamentos do primeiro caso. Com isso, obteve-se uma melhor regulação das tensões nas barras não controladas, sempre obedecendo aos limites de operação impostos pela ANEEL.

Ainda poderiam ser abordadas simulações para correção das violações do sistema utilizando compensadores síncronos e bancos de capacitores, simultaneamente, transformadores com regulação automática de tapes, regulação de tensão para cargas variáveis. Ainda mais, estimar os custos reais para cada tipo de operação e serviço de regulação de tensão e suporte de reativo.

Portanto, é de grande importância inserir este tipo de ferramenta na vida acadêmica dos alunos de engenharia elétrica, principalmente na área de sistemas elétricos de potência, para um melhor entendimento desta área, já que a demanda por profissionais com esta competência será cada vez maior, tendo em vista a ampliação do SIN.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, Charles K. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 3ª Edição, Editora McGraw-Hill do Brasil, 2008.

ANAREDE -Análise de Redes Elétricas. Disponível em: <http://www.anarede.cepel.br/>>. Acesso em: 25 de mai. de 2014.

ANEEL. **Resolução nº 505/2001**. De 26 de novembro de 2001.

BAUAB, Gabriela Helena Sérgio. **Melhoria da Regulação de Tensão e do Suporte de Potência Reativa em Sistemas Integrados de Transmissão e Distribuição**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

BLANCHON, G.; GIRARD, N.; LOGEAY, Y.; MESLIER, F. **New Developments in Planning of Reactive Power Compensation Devices**. IEEE/PES WinterMeeting. New Orleans, 1987.

BORDIM, João Ricardo Graminha. **Instalação de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica para Correção de Fator de Potência e Regulação de Tensão: Projeto e Simulação Computacional**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

BRIGATTO, Gelson Antônio Andrêa. **Análise de Contingências em Redes Elétricas: Um estudo do problema reativo através de fatores de sensibilidade e de distribuição**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

CEPEL – Programa de Análise de Redes. Manual do usuário, V09.05.05.

CHAVES, Fabrício Silveira. **Análise da Tensão ao Longo da Linha de Transmissão**. Artigo, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

CHAVES, Francisco David Moya. **Serviços Ancilares Através da Geração Distribuída: Reserva de Potência Ativa e Suporte de Reativos**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

CORREIA, Vitor Teles. **Controladores FACTS**. Artigo, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

CORTEZ, A. N. **Crítérios e Procedimentos para Avaliação da Estabilidade de Tensão**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

COSTA , Antônio Simões. **Serviços Ancilares. NET**, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: <<http://www.labspot.ufsc.br/~simoes/plnjop/ServAnc.pdf>>. Acessado em 17 dez. 2013.

COSTA , Antônio Simões. Sistemas de Excitação de Geradores Síncronos. **NET**, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: **PROFESSOR ANTÔNIO SIMÕES COSTA**. Disponível em: <<http://www.labspot.ufsc.br/~simoes/dincont/dc-cap5.pdf>>. Acessado em 06 mar. 2014.

ELECTRICAL ENGINEERING PORTAL. Disponível em: <<http://electrical-engineering-portal.com/facts-flexible-ac-transmission-systems>>. Acessado em 05 mar. 2014.

ELGERD, O.I.; **Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica**. 1ª Edição, Editora McGraw-Hill do Brasil, 1977.

ENGELÉTRICA. Disponível em: <http://www.engeletrica.com.br/manual_correcao_fatordepotencia.pdf>. Acessado em 19 fev. 2014.

ESCOLA POLITÉCNICA UFBA. Disponível em: <http://www.materiaiseletricos.ufba.br/materiais_eletricos.html>. Acessado em 01 mar. 2014.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., Charles; UMANS, Stephen. **Máquinas Elétricas com Introdução à Eletrônica de Potência**. 6ª Edição, Editora Bookman, 2006.

GOMÉZ-EXPÓSITO, Antonio; CONEJO, Antonio J.; CAÑIZARES, Claudio. **Sistemas de Energia Elétrica – Análise e Operação**. Editora CRC Press, 2009.

GUEDES, Manuel Vaz. **O Motor de Indução Trifásico – Seleção e Aplicação**. Apostila da Disciplina Máquinas Elétricas, Universidade do Porto, Portugal, 1994.

HAO, Shangyou. **A Reactive Power Management Proposal for Transmission Operators**. IEEE Transactionson Power Syst., Vol. 18, pgs 1374-1381, 2003.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 1ª Edição, Editora Edgard Blucher Ltda, 2005.

LESCANO, Gerardo; OHISHI, Takaaki. **Um Modelo de Despacho Econômico Para Reservas Operativas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

LIMA, Júlio César Marques, **Aspectos de Proteção e Controle do Gerador Síncrono Subexcitado**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

MILLER, Robert H. **Operação de Sistemas de Potência**. 1ª Edição, Editora McGraw-Hill do Brasil, Eletrobrás, 1987.

MUZITANO, Grazielle Frazão. **Comparação da Compensação de Reativo entre Linhas Convencionais e não Convencionais**. Monografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

ONS. Disponível em: <http://www.ons.org.br/administracao_transmissao/servicos_ancilares.aspx>. Acessado em 05 jan. 2014.

ONS. Disponível em: <http://www.ons.org.br/historico/geracao_energia_out.aspx?area=>>. Acessado em 01 mai. 2014.

PERFIL NEWS. Disponível em: <<http://www.perfilnews.com.br/brasil-mundo/usina-vai-operar-4-maquinas-como-compensadores-sincronos>>. Acessado em 20 jul. 2014.

PORTUGAL, Paulo M. M. **Análise de Auto-Excitação e Curto-Circuito Capacitivo em Geradores Síncronos Conectados a Grandes Sistemas de Transmissão CCAT e CAAT.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

RAGNEV, Walter. **Estudo de Potência Reativa, Tensão, Contingência e Perdas em Empresas de Energia Elétrica Localizadas na Grande São Paulo.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

REIVAX. Disponível em: <<http://www.reivax.com/br/pt-br/linha-energy/regulador-de-tensao-rtx-energy.html>>. Acessado em 02 mar. 2014.

RESENDE, J. W. **Introdução a Compensação Reativa.** Apostila da Disciplina Cargas Elétricas não Convencionais na Rede Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

REZENDE, Paulo H. O.; SANTILHO, Fabrício P.; VASCONCELOS, Lucas E.; SILVA, Thiago V. **Compensação de Reativos em Linhas de Transmissão Utilizando Compensadores Estáticos Fixos.** Artigo, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

STEVENSON, W. D. Jr. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência.** 2ª Edição, Editora McGraw-Hill do Brasil, 1986.

SIEMENS. Disponível em: <<http://www.energy.siemens.com/br/pt/transmissao-de-energia/transformadores/reatores.htm>>. Acessado em 18 fev. 2014.

WEBENSINO. Disponível em: <<http://webensino.unicamp.br/disciplinas/ET720-283647/apoio/29/aula19.pdf>>. Acessado em 05 mar. 2014.

WEG. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acessado em 20 fev. 2014.