

Energia Elétrica e Sustentabilidade 2

Jaqueline Oliveira Rezende
(Organizadora)



Atena
Editora

Ano 2018

JAQUELINE OLIVEIRA REZENDE

(Organizadora)

Energia Elétrica e Sustentabilidade

2

Atena Editora
2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Natália Sandrini

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
E56	Energia elétrica e sustentabilidade 2 [recurso eletrônico] / Organizadora Jaqueline Oliveira Rezende. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018. – (Energia Elétrica e Sustentabilidade; v. 2) Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-85107-46-8 DOI 10.22533/at.ed.468180110 1. Desenvolvimento energético – Aspectos ambientais. 2. Desenvolvimento sustentável. 3. Energia elétrica. I. Rezende, Jaqueline Oliveira. CDD 338.4
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

O conteúdo do livro e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A sustentabilidade pode ser entendida como a capacidade de o ser humano utilizar os recursos naturais para satisfazer as suas necessidades sem comprometer esses recursos para atender as gerações futuras. Nesse contexto, a sustentabilidade está inter-relacionadas em diversos setores, sendo os principais o social, o ambiental e o econômico. Dessa forma, constitui um dos desafios da sociedade moderna o desenvolvimento sustentável que objetiva preservar o meio ambiente durante a realização de outras atividades.

A energia elétrica representa um dos principais pilares para o progresso econômico de uma nação e, conseqüentemente, para o atendimento de inúmeras necessidades da humanidade. Portanto, esse setor também tem se preocupado com a geração, a transmissão, a distribuição de energia elétrica e a construção de novos empreendimentos, como as usinas hidrelétricas, de maneira a preservar o meio ambiente. Logo, a Engenharia Elétrica tem apresentado significativas pesquisas e resultados de ações pautadas na sustentabilidade.

Neste ebook é possível notar que a relação da Engenharia Elétrica e a Sustentabilidade é de preocupação de diversos profissionais envolvidos nesse setor, sendo esses advindos da academia, das concessionárias de energia elétrica e do governo. Dessa forma, são apresentados trabalhos teóricos e resultados práticos de diferentes formas de aplicação da preservação do meio ambiente na engenharia elétrica.

Inicialmente são apresentados artigos que discorrem sobre o desenvolvimento sustentável e a sustentabilidade ambiental, custos ambientais em empreendimentos de geração de energia elétrica, recuperação ambiental, conservação da fauna, políticas administrativas e direcionamento de resíduos eletrônicos.

Em seguida, são descritos estudos sobre formas de geração de energia elétrica renováveis não convencionais, sendo apresentadas a energia eólica e a energia solar fotovoltaica. Essas formas de geração contribuem para o desenvolvimento sustentável, uma vez que geram energia elétrica utilizando recursos naturais não finitos, o vento na geração eólica e o sol na geração fotovoltaica.

Além disso, neste exemplar são expostos artigos que contemplam diversas áreas da engenharia elétrica, como redes smart grids, sistema de proteção, operação remota de usinas hidrelétricas, inteligência computacional aplicada a usina termelétrica, transformadores de potência, linhas de transmissão, tarifa horária, lâmpadas led, prevenção de acidentes em redes de média tensão e eficiência energética.

Jaqueline Oliveira Rezende

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
PROSPECÇÃO DE PARQUES HIDROKINÉTICOS ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PROJETOS NOS RIOS IGUAÇU E PARANÁ	
<i>Marcos Aurélio de Araujo</i>	
CAPÍTULO 2	10
TROCADOR DE CALOR – INOVAÇÃO NO AQUECIMENTO DE ÁGUA, FUNCIONAMENTO, RESULTADOS E COMPARAÇÃO COM TECNOLOGIAS SEMELHANTES	
<i>Odair Deters</i>	
<i>Paulo Valdocci Pereira</i>	
<i>Valério Monteiro</i>	
CAPÍTULO 3	23
SISTEMA ÓPTICO CWDM COMO PLATAFORMA DE MONITORAÇÃO DE ATIVOS E DE COMUNICAÇÃO DE DADOS PARA REDES SMART GRIDS	
<i>João Batista Rosolem</i>	
<i>Danilo César Dini</i>	
<i>Claudio Antonio Hortêncio</i>	
<i>Eduardo Ferreira da Costa</i>	
<i>Rivael Strobel Penze</i>	
<i>João Paulo Vicentini Fracarolli</i>	
<i>Carlos Alexandre Meireles Nascimento</i>	
<i>Vítor Faria Coelho</i>	
CAPÍTULO 4	37
PORTAL OPERACIONAL DE EQUIPAMENTOS ESPECIAIS DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO - UMA FERRAMENTA PARA GESTÃO DA CONFORMIDADE E DA CONTINUIDADE NO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA	
<i>Rafael Cassiolato de Freitas</i>	
<i>Sadi Roberto Schiavon</i>	
CAPÍTULO 5	46
MODERNIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO, CONTROLE E SUPERVISÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE SAMUEL	
<i>Davi Carvalho Moreira</i>	
<i>Daniel Simões Pires</i>	
<i>Danilo Gomes Matias</i>	
<i>Heleno Fülber</i>	
<i>Bruno Merlin</i>	
CAPÍTULO 6	62
OPERAÇÃO REMOTA DE USINAS PELO CENTRO DE OPERAÇÃO DA GERAÇÃO DA ELETROBRAS ELETRONORTE	
<i>Davi Carvalho Moreira</i>	
<i>Daniel Simões Pires</i>	
<i>Danilo Gomes Matias</i>	
<i>Juliano Cortes de Souza</i>	
<i>Leonardo Siqueira Rodrigues</i>	
<i>Heleno Fülber</i>	
<i>Bruno Merlin</i>	
CAPÍTULO 7	70
ABORDAGEM DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL APLICADA PARA MODELAGEM PREDITIVA DE EMISSÕES DE NOX E CO DE UMA TURBINA A GÁS DE UMA USINA TERMELÉTRICA DE CICLO COMBINADO	
<i>Eduardo Massashi Yamao</i>	
<i>Juliano Pierezan</i>	

João Paulo Silva Gonçalves
Marcos Cesar Gritti
Luís Gustavo Tomal Ribas
Flávio Chiesa
Victor Manuel Lopes dos Santos
Marcos de Freitas
André da Silva Orlandi
Leandro dos Santos Coelho

CAPÍTULO 8 82

CONFIRMAÇÃO DA EFICÁCIA DO ENSAIO DE RESPOSTA DO DIELÉTRICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA E BUCHAS CAPACITIVAS COMO TÉCNICA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

Hugo Rafael Freitas Negrão
Fernando de Souza Brasil
Bárbara Medeiros Campos
Maria Emília de Lima Tostes
Jorge Augusto Siqueira Tostes
Paulo Roberto Moutinho de Vilhena

CAPÍTULO 9 96

A EXPERIÊNCIA DA ELETRONORTE NA IMPLANTAÇÃO DA ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA PARA DIAGNÓSTICO DE REATORES E TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Vanessa de Cássia Viana Martins Beltrão

CAPÍTULO 10 113

ANÁLISE DE DESEMPENHO DA LINHA DE TRANSMISSÃO 230 KV DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE RONDÔNIA OPERANDO COM CABOS PARA-RAIOS ISOLADOS E ENERGIZADOS EM MÉDIA TENSÃO

José Ezequiel Ramos
Alexandre Piantini
Ary D'Ajuz
Valdemir Aparecido Pires
Paulo Roberto de Oliveira Borges

CAPÍTULO 11 126

ESTUDO DE APLICAÇÃO DO DISPOSITIVO SVC NA LINHA DE TRANSMISSÃO MESQUITA VIANA II

Alcebíades Rangel Bessa
Lucas Frizera Encarnação
Paulo José Mello Menegáz

CAPÍTULO 12 143

IMPLANTAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEA 230KV CIRCUITO DUPLO DA COPEL

Márcio Tonetti
Ilmar da Silva Moreira
João Nelson Hoffmann

CAPÍTULO 13 153

TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO: ESTUDO POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA E ACOPLAMENTO MAGNÉTICO RESSONANTE

Guilherme Hideki Shibukawa
Eric Eduardo Goveia Pandolfo
Ricardo Andreola
Emerson Charles Martins da Silva

CAPÍTULO 14 168

TARIFAS HORÁRIAS PARA SISTEMA DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO O SINAL LOCACIONAL

Marcio Andrey Roselli
André Meister

Denis Perez Jannuzzi
Robson Kuhn Yatsu
André Veiga Gimenes
Miguel Edgar Morales Udaeta

CAPÍTULO 15..... 178

AVALIAÇÃO DAS LÂMPADAS LED NO MERCADO BRASILEIRO (ARTIGO APRESENTADO NO XXIV SNPTEE)

Alessandra da Costa Barbosa Pires de Souza
Maurício Barreto Lisboa
Willians Felipe de Oliveira Rosa

CAPÍTULO 16..... 185

AVALIAÇÃO DO MÉTODO INDEPENDENTE DE MEDIÇÃO DE PERTURBAÇÕES RADIADAS – ANEXO B DA CISPR 15 (ARTIGO APRESENTADO NO XXIV SNPTEE)

Alessandra da Costa Barbosa Pires de Souza
Maurício Barreto Lisboa
Willians Felipe de Oliveira Rosa

CAPÍTULO 17 193

PADRÕES DE QUALIDADE PARA SERVIÇOS DE PINTURA ANTICORROSIVA APLICADOS AO SETOR ELÉTRICO

Alberto Pires Ordine
Cristina da Costa Amorim
Marcos Martins de Sá
Elber Vidigal Bendinelli

CAPÍTULO 18..... 209

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO, PRODUTIVIDADE E CUSTOS DE TECNOLOGIAS DE PROTEÇÃO ANTICORROSIVA PARA ESTRUTURAS ENTERRADAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Cristina da Costa Amorim
Alberto Pires Ordine
Marcos Martins de Sá
Wendell Porto de Oliveira

CAPÍTULO 19..... 221

ANÁLISE DE QUASE-ACIDENTES, OCORRIDOS NA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE MÉDIA TENSÃO, COMO MEIO EFICAZ E PROATIVO NA PREVENÇÃO DE ACIDENTES

Cristiano José Gober
Cresencio Silvio Segura Salas

CAPÍTULO 20..... 235

PORTAL R3E COMO FERRAMENTA INDUTORA E DISSEMINADORA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

Clara Ovídio de Medeiros Rodrigues
Marcelo Bezerra de Melo Tinoco
Aldomar Pedrini
Edison Alves Portela Junior
João Queiroz Krause
Marco Aurélio Ribeiro Gonçalves Moreira
Fernando Pinto Dias Perrone

CAPÍTULO 21..... 246

HIERARQUIA DAS NECESSIDADES E RESILIÊNCIA NO PAGAMENTO DE SERVIÇOS PÚBLICOS UTILIZADOS: UM ESTUDO DE CASO VOLTADO A ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL

Ana Lúcia Rodrigues da Silva
Fernando Amaral de Almeida Prado Jr.
Carolina Rodrigues de Almeida Prado

CAPÍTULO 22 258

PROJETO PILOTO PARCELAMENTO PRÓ-ATIVO DE DÉBITOS DE IRREGULARIDADE

Diego Rivera Mendes

Julio Eloi Hofer

Rafael Luís de Avila

CAPÍTULO 23 267

MODELAGEM ESTRATÉGICA PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ANTECIPAÇÃO DO ATENDIMENTO AO CLIENTE PARA A MELHORIA OPERACIONAL E DE SERVIÇOS

Carlos Alberto Fróes Lima

Anderson Diego Machiaveli

Luciano E. A. Peres

Tales Neves Anarelli

SOBRE A ORGANIZADORA 287

ESTUDO DE APLICAÇÃO DO DISPOSITIVO SVC NA LINHA DE TRANSMISSÃO MESQUITA VIANA II

Alcebiádes Rangel Bessa

Universidade Federal do Espírito Santo -
Departamento de Engenharia Elétrica
Vitória – Espírito Santo

Lucas Frizera Encarnação

Universidade Federal do Espírito Santo -
Departamento de Engenharia Elétrica
Vitória – Espírito Santo

Paulo José Mello Menegáz

Universidade Federal do Espírito Santo -
Departamento de Engenharia Elétrica
Vitória – Espírito Santo

RESUMO: Este trabalho apresenta o estudo de modelagem de sistema elétrico em 500 kV interligando as subestações de Mesquita e Viana II, realizando o estudo de estabilidade de tensão na subestação de Viana II com a aplicação do dispositivo SVC. O sistema elétrico com os seus cenários de operação desenvolvidos foi baseado nos dados técnicos do ONS. Os resultados de simulação do sistema com a inserção do SVC foram desenvolvidos no programa de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC comprovando o desempenho do equipamento proposto.

PALAVRAS-CHAVE: SVC, Linha de Transmissão, Subestação, Modelagem, Compensação de Reativos e Regulação de Tensão.

ABSTRACT: This paper presents a modelling study of 500 kV electrical system interconnecting the substations Mesquita and Viana II, conducting the study of voltage stability in Viana II substation with the application of SVC device. The electrical system with its operation scenarios were developed based on technical data from ONS. The simulation results of the system by entering the SVC were developed in the electromagnetic transient program PSCAD / EMTDC proving the performance of the proposed equipment.

KEYWORDS: SVC, Transmission Line, Substation, Modeling Reactive Compensation and Voltage Regulation.

1 . INTRODUÇÃO

Com a desregulamentação do setor elétrico brasileiro, ocorrida na década de 90, a relação entre produtores e consumidores de energia elétrica passou por uma mudança substancial, tendo em vista que os consumidores passaram a comprar energia livremente de qualquer agente gerador. Desta forma, foi garantida uma maior competitividade entre os agentes do mercado de energia elétrica. Em contrapartida, o sistema de transmissão teve que se adequar a novos padrões de carregamento e a novas exigências de controle e operação.

Esse novo cenário da transmissão de energia levou à necessidade de níveis de confiabilidade mais elevados, com o desenvolvimento de projetos de novas linhas e a duplicação de linhas já existentes, entre outras ações, as quais implicam em maiores custos de implantação, operação e manutenção; além de toda a problemática ambiental inerente à aprovação de projetos deste tipo.

Atualmente, o sistema de transmissão de energia elétrico brasileiro é composto, em sua maioria, por linhas de transmissão em corrente alternada que operam com tensões entre 230 e 750 kV. Na maioria das vezes, o controle do fluxo de potência nestas linhas é feito de uma forma mais simples, fazendo com que a regulação da tensão nas linhas seja altamente influenciada pela carga que elas alimentam.

Aliado ao fato da adaptação do sistema de transmissão ao novo mercado do setor elétrico existe também a problemática do crescimento do consumo de energia nos próximos anos. Segundo estimativas da EPE, a demanda de energia elétrica no país deverá crescer a uma taxa média de 4,3% ao ano, saindo de um patamar de consumo total de 472,2 mil GWh no ano de 2013 para 656,1 mil GWh até 2021 (EPE, 2011). Em sistemas pequenos e de complexidade menor, o superdimensionamento em relação à capacidade de geração e transmissão pode resolver parcialmente os problemas de controle e operação. Porém, em sistemas de transmissão grandes e de maior complexidade, esta alternativa é impraticável (Watanabe et al., 1998).

Com o desenvolvimento da eletrônica de potência, ao longo dos últimos anos, surgiu um novo conceito de dispositivos que permitem o controle do fluxo de potência, bem como do perfil de tensão nas linhas de transmissão, tornando sua operação mais flexível e confiável. Estes dispositivos, comumente conhecidos como FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) têm sido pesquisados a fim de atender dois principais objetivos:

- Aumentar a capacidade de transmissão de potência das redes;
- Controlar diretamente o fluxo de potência em rotas específicas de transmissão.

(Watanabe et al., 1998).

Dentre os dispositivos FACTS comumente utilizados, o SVC (*Static Var Compensator*) é um compensador constituído por reatores e capacitores chaveados por tiristores, capaz de injetar ou absorver reativos da rede. Desta forma, o SVC é utilizado em aplicações que envolvam controle de fator de potência, regulação de tensão, aumento da capacidade de transmissão e da estabilidade de sistemas de transmissão. (Hingorani and Gyugyi, 2000)

Neste cenário de expansão do mercado energético brasileiro e, mais ainda, num cenário propício ao desenvolvimento do estado do Espírito Santo, com a previsão de crescimento de suas cargas, bem como da implementação de novas usinas termelétricas, este trabalho se propõe a estudar os efeitos da inserção de um dispositivo SVC na subestação de Viana II, a qual receberá uma nova linha de transmissão de 500 kV, interligando o sistema de transmissão do estado a Minas Gerais (SE Mesquita). O principal aspecto a ser avaliado com a inserção do SVC será a melhoria da regulação

de tensão na barra da SE Viana II, dentro dos cenários de carga previstos para o estado do Espírito Santo nos próximos anos.

Na próxima seção serão apresentados os dados levantados sobre o sistema elétrico que interliga os estados do Espírito Santo e Minas Gerais (Furnas), bem como a modelagem deste sistema com a inclusão da nova LT Mesquita-Viana II de 500 kV. A seguir, será apresentado o modelo da topologia SVC utilizada na simulação e os resultados obtidos através da sua inserção junto à barra de Viana II. Por fim, será feita uma breve conclusão, ressaltando os benefícios alcançados com o uso do SVC proposto.

2 | SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA ES/MG

O estado do Espírito Santo é atendido em sua totalidade por duas companhias de distribuição de energia: a EDP ESCELSA e a Empresa de Luz e Força Santa Maria S.A., que, além de realizar a distribuição de energia para os consumidores, também administra pequenas usinas geradoras do tipo PCH, em sua maioria. Além destas pequenas usinas hídricas, ao longo dos últimos anos, o estado recebeu algumas usinas termelétricas para suprimento da demanda em condições específicas de baixo nível dos reservatórios ou condições de pico do sistema.

A geração de energia no estado é responsável por menos de 20% da energia total consumida, demonstrando sua forte dependência da energia produzida em outras regiões do país. Conforme mostrado na Figura 1, atualmente, o Espírito Santo é interligado ao SIN (Sistema Interligado Nacional) por meio das seguintes linhas de transmissão:

- Campos/Vitória e Ouro Preto II/Vitória, ambas de 345 kV, pertencentes a Furnas;
- Aimorés/Mascarenhas, e Mascarenhas/Verona sob responsabilidade respectivamente da EVRECY e ETS, ambas com tensão de 230 kV.

Uma nova linha de transmissão de 500 kV está em fase de construção entre as subestações Mesquita e Viana II. Esta linha estará sob a responsabilidade da MGE Transmissão, consórcio formado por FURNAS (49%), J. Malucelli Construtora (20%) e Engevix Engenharia S.A (31%). Nesse contexto Furnas tem como objetivo aumentar a estabilidade e a confiabilidade do sistema elétrico capixaba, além de aumentar a flexibilidade no despacho de energia no estado. Além destes fatos, poder-se-ia dizer que outro fator de grande importância face à construção desta linha é a expectativa de crescimento nos investimentos em geração térmica no Espírito Santo que poderão utilizar esta linha como meio de conexão ao SIN.



Figura 1. Ligação do Sistema Elétrico do ES ao SIN.

Levantamento dos dados da área do sistema em estudo

Inicialmente, foram obtidos junto ao ONS (Operador Nacional do Sistema) os parâmetros elétricos da malha de todo o Sistema Elétrico Nacional, nos cenários de carga previstos para 2015. A partir destes dados, utilizou-se o programa ANAREDE para isolar apenas a área de interesse de estudo deste trabalho, compreendida entre as subestações de Mesquita e Viana II. Desta forma, o programa foi utilizado para obter os dados do equivalente externo do sistema nas fronteiras de interesse deste estudo, conforme apresentado na Figura 2.

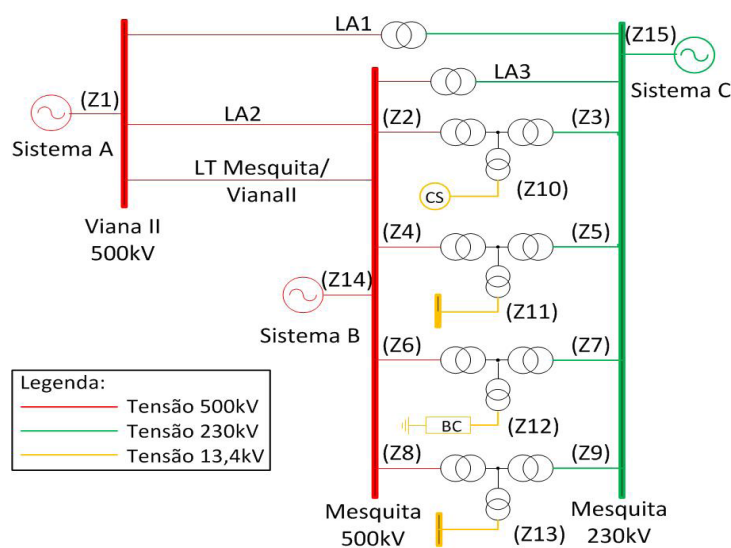


Figura 2. Sistema elétrico equivalente da área em estudo

As impedâncias do sistema mostradas na Figura 2 estão representadas em p.u. no Quadro 1, sendo calculadas considerando a base de 100 MVA.

As linhas LA1, LA2 e LA3, são linhas auxiliares geradas durante a obtenção do equivalente externo nas fronteiras do sistema. Elas representam a contribuição da interligação da área em estudo com o SIN através de outras linhas de transmissão não representadas no diagrama.

A Figura 3 apresenta, em forma de diagrama de blocos, a representação do

sistema equivalente da área em estudo (Figura 2), sendo este modelado e simulado através do programa PSCAD/EMTDC.

Imped.	R1	X1	R0	X0
Z1	0,15	3,76	0,06	2,56
Z2	0	2,69	0	2,69
Z3	0	-0,22	0	-0,22
Z4	0	2,69	0	2,69
Z5	0	-0,28	0	-0,28
Z6	0	2,69	0	2,69
Z7	0	-0,2	0	-0,2
Z8	0	2,69	0	2,69
Z9	0	-0,28	0	-0,28
Z10	0	23,63	0	7,63
Z11	0	7,6	0	0
Z12	0	7,37	0	0
Z13	0	7,6	0	7,6
LT	0,21	3,37	2,77	10,16
LA1	57,29	200,9	166k	133k
LA2	166,61	117,2	Inf.	Inf.
LA3	12,19	38,75	1550,7	1654,2

Quadro 1. Impedâncias em p.u. do sistema da área em estudo

A seguir, é apresentada a descrição de cada bloco do diagrama mostrado na Figura 3:

- Sistema A – representa o equivalente elétrico da subestação Viana II e de sua interligação com a subestação Viana I e demais linhas de transmissão. A SE Viana II possui 01 transformador de 03 enrolamentos, 900 MVA e 500/345 kV, além de 01 reator de 136 MVar/500 kV;

- Sistema B – representa o equivalente elétrico da interligação da barra de 500 kV da subestação Mesquita às linhas de transmissão Mesquita/Vespasianos II e Mesquita/Neves I;

- Sistema C – representa o equivalente elétrico da interligação da barra de 230 kV da subestação Mesquita às linhas de transmissão Mesquita/Usiminas, Mesquita/Ipatinga, Mesquita/Timoteo II, Mesquita/Governador Valadares e Mesquita/Baguari;

- Subestação Mesquita – representa os equipamentos da subestação Mesquita, contendo 04 bancos de capacitores de 28,8 MVar/13,8kV, 01 compensador síncrono 100/-60 MVar/13,4kV, 01 reator de 136 MVar/500kV e 04 transformadores de 03 enrolamentos, 400 MVA e 500/230kV;

- LT Mesquita-Viana II – representa a linha de transmissão Mesquita/Viana II, com comprimento de 248 km, circuito simples, capacidade de operação de longa duração (CPST) de 2400 A e capacidade de operação de curta duração (CPST) de 3050 A;

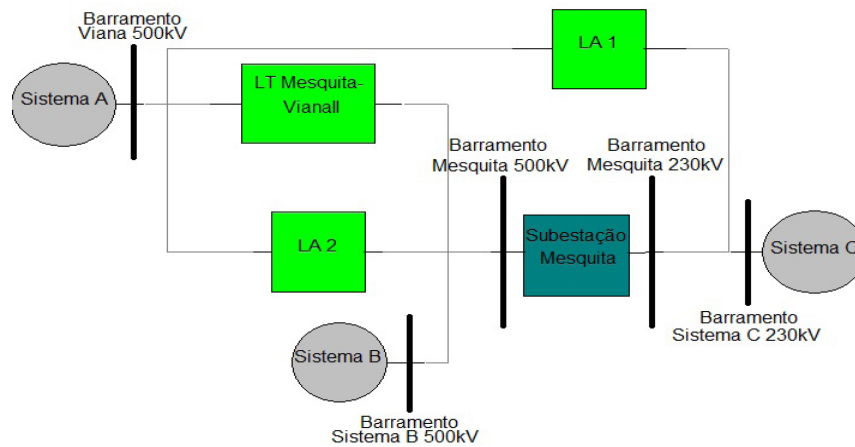


Figura 3. Sistema modelado no PSCAD/EMTDC.

- LA1, LA2 e LA3 – são linhas auxiliares que representam as demais interligações da área de estudo ao SIN, por meio de outras linhas de transmissão.

Sendo o objetivo do trabalho estudar a regulação de tensão da barra de 500 kV da subestação Viana II devido à entrada em operação da nova linha Mesquita-Viana II, apresentaremos a seguir o modelo de simulação implementado no PSCAD do Sistema A. Logo após, será feita a validação deste modelo, utilizando como base dados de operação obtidos junto ao ONS.

Modelo de simulação do Sistema A

A Figura 4 apresenta o modelo implementado no PSCAD/EMTDC para simular o Sistema A. Nele, observamos o equivalente externo representando a interligação desta barra com o resto do sistema, sendo este modelado por uma fonte de tensão em série com uma impedância, cujo valor está mostrado no Quadro 1 (Z1).

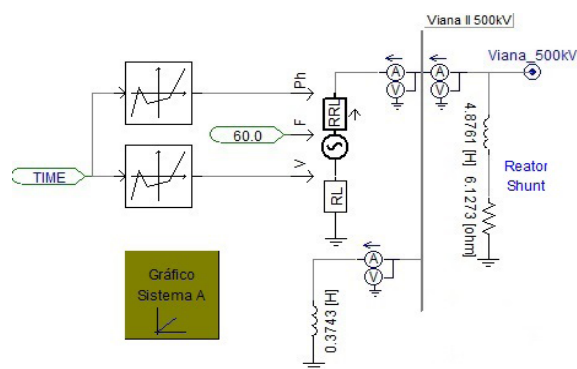


Figura 4. Modelo de simulação do Sistema A sem o SVC

Validação do Sistema simulado

Para fins de comparação e de validação dos modelos de simulação propostos, foram utilizados os valores apresentados nos “casos de referência utilizados para estudos elétricos de fluxo de potência dentro do horizonte do Plano de Ampliações e

Reformas da rede básica PAR para os anos de 2014 a 2016”, disponibilizados no sítio do ONS (ONS, 2013).

A partir destes dados, o comportamento da área em estudo foi simulado por meio do modelo proposto usando a plataforma do PSCAD/EMTDC, sendo considerado o cenário de junho de 2015 com cargas leve, média e pesada. Os resultados de simulação obtidos foram então comparados com os valores disponibilizados pelo ONS a fim de validar o modelo de simulação proposto. A Tabela 1 apresenta a comparação destes valores apenas na situação de carga pesada e a Tabela 2, apresenta os erros percentuais dos valores simulados, tomando como base os valores fornecidos pelo ONS.

Componente	Pot. Ativa (MW)	Pot. Reativ (MVar)	Tensão Mód./Âng. (pu / °)
Valores fornecidos pelo ONS			
LT Mesquita/Viana II	306,4	31,2	-
Shunt Equivalente	0	2024,4	-
Equivalente Externo	440,1	2032	-
Barra Viana II	-	-	1,069/-91,2°
Valores simulados utilizando o modelo proposto			
LT Mesquita/Viana II	313,4	35,2	-
Shunt Equivalente	0	2025	-
Equivalente Externo	445,3	2024	-
Barra Viana II	-	-	1,069/-93,3°

Tabela 1. Comparação da tensão e dos fluxos de potência obtidos para o Sistema A, no cenário de carga pesada.

Componente	Pot. Ativa	Pot. Reativa	Tensão Mód./Âng.
LT Mesquita/Viana II	2,29%	12,82%	-
Shunt Equivalente	0%	0,03%	-
Equivalente Externo	1,18%	-0,39%	-
Barra Viana II	-	-	0/-2,3%

Tabela 2. Erros percentuais entre valores simulados e valores fornecidos pelo ONS no Sistema A para cenário de carga pesada.

Observando a Tabela 2, pode-se verificar que os erros percentuais dos valores simulados são pequenos, a exceção do fluxo reativo na linha de transmissão Mesquita/Viana II, porém em valor absoluto tal erro é pequeno perante aos fluxos de potência da linha de transmissão. Tal situação acontece para que na modelagem do sistema obtenham-se os valores de tensão de barra próximos ao valor real fornecido pelo ONS. O mesmo acontece quando se comparam os valores obtidos por simulação nos

cenários de carga média e carga pesada do Sistema A e dos demais sistemas da área em estudo, validando o modelo de simulação desenvolvido no PSCAD/EMTDC.

3 | MODELO DO SVC

O compensador SVC do tipo TCR-TSC foi desenvolvido inicialmente com o objetivo de oferecer uma compensação dinâmica para sistemas de transmissão, diminuindo suas perdas em regime permanente e aumentando sua flexibilidade de operação. Para isto, o compensador terá uma faixa de variação de reativos que estarão dentro de uma faixa com potência injetada capacitiva (QC) até uma faixa de potência absorvida indutiva (QL).

A configuração básica do SVC do tipo TCR-TSC é apresentada na Figura 5, compondo o sistema dessa maneira pelo TCR, TSC e o filtro de correntes harmônicas, geralmente de 5^a e 7^a ordem.

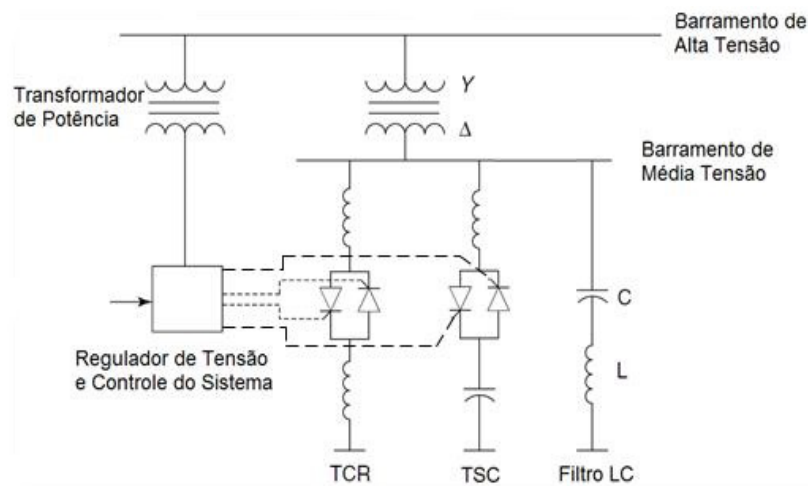


Figura 5: Configuração geral do SVC.

Tiristor Controlando Reator

O TCR é um dos componentes do dispositivo SVC, que também pode ser encontrado na compensação de reativos de maneira isolada. Na maioria dos projetos de compensador de reativos o TCR é encontrado em paralelo com um banco de capacitores fixo ou com capacitores chaveados por tiristor.

O TCR é composto por um par de tiristores em anti-paralelo, T1 e T2, ligado em série com um reator linear de núcleo a ar, conforme ilustrado na Figura 6. O ângulo de disparo de tiristor será medido a partir do momento que a tensão nos seus terminais V_s passa por zero.

A faixa de controle do ângulo de disparo α dos tiristores está entre 90° à 180° . Para o ângulo $\alpha=90^\circ$ a corrente sobre o indutor será senoidal, enquanto que para o ângulo $\alpha=180^\circ$ a corrente no indutor será nula. Para ângulos α com valores intermediários a corrente no indutor será descontínua, variando com o valor de α .

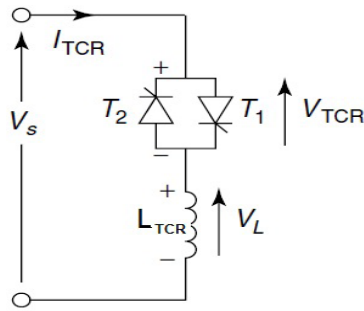


Figura 6: Configuração do TCR.

Operação com ângulo de disparo α abaixo de 90° introduzirá componentes de corrente contínua no sistema, causando distúrbio na atuação simétrica dos dois tiristores em antiparalelo e, portanto, deverá ser evitada. Outro ponto importante do controle da indutância com tiristores é que a chave formada por tiristores terá como características de seccionamento da condução de forma independente do ângulo de disparo, ou seja, não haverá este controle. A interrupção se dará no momento em que a corrente no ramo do tiristor passar por zero, conhecido como comutação de linha. Além disso, outra característica da comutação de linha é que após iniciada, em determinado momento, qualquer alteração de disparo só poderá ocorrer no próximo meio ciclo de onda. As equações 1, 2 e 3 apresentam o comportamento da corrente sobre o TCR (Mohan and Rajiv, 2002).

$$I_1(\alpha) = V \cdot B_{TCR}(\alpha) \quad (1)$$

$$B_{TCR}(\alpha) = B_{m\acute{a}x} \cdot \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi} \text{sen}(2\alpha) \right) \quad (2)$$

$$B_{m\acute{a}x} = \frac{1}{\omega \cdot L} \quad (3)$$

TSC – Tiristor Chaveando Capacitor

O TSC monofásico é apresentado na Figura 7, sendo composto por um capacitor e uma chave bidirecional formada por dois tiristores em antiparalelo com um pequeno indutor limitador de corrente. Este limitador de corrente terá a função de limitar a corrente de pico sobre o tiristor em correntes anormais ocasionadas, por exemplo, pelo mau funcionamento dos tiristores e chaveamento em momento errado, além disso, evitando a ressonância entre dispositivos da rede para frequências múltiplas do sistema.

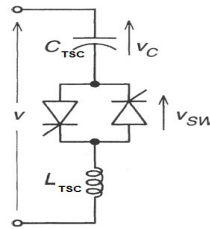


Figura 7: Configuração do TSC.

A chave tiristorizada do TSC terá a função básica de conectar ou não o banco de capacitores ao sistema. Atuando desta forma como uma chave ON-OFF para o banco de capacitores, ao contrário do TCR na qual a chave irá controlar a indutância total do banco de indutores visto pelo sistema.

SVC modelado

O SVC adotado neste projeto foi instalado na barra de Viana II/500 kV, Figura 8, e será composto por 2 TCRs, 1 TSC e 1 filtro de harmônicas, conforme ilustrado na Figura 9.

Para dimensionamento do SVC foram feitas simulações com perfil de carga leve, média e pesada, avaliando a inserção do SVC com valores variados. Através da variação do valor dos bancos de capacitores do TSC e dos reatores do TCR, buscou-se manter o perfil de tensão do barramento da subestação de Viana II entre valores de 1,045 e 1,07 p.u.

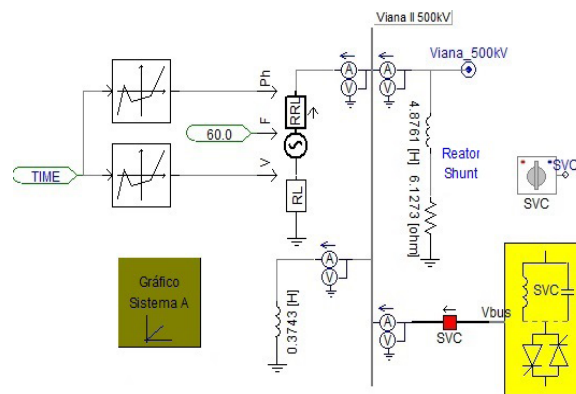


Figura 8: Sistema A com SVC.

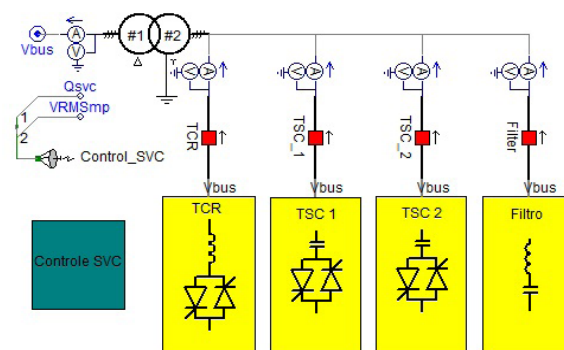


Figura 9: Bloco SVC.

Com base nestas simulações os valores dimensionados para o SVC foram desenvolvidos conforme Tabelas 2 e 3.

Dispositivo	Indutância ou capacitância	Tensão (kV)
L_{TCR}	9,75m H	17,5
C_{TSC}	173,23 μ F	17,5
L_{TSC}	0,50m H	17,5
$L_{Filtro5^a}$	2,26m H	17,5
$C_{Filtro5^a}$	120 μ F	17,5
$L_{Filtro7^a}$	1,13m H	17,5
$C_{Filtro7^a}$	130 μ F	17,5

Tabela 2: Parâmetros do SVC dimensionado.

Característica	Q_{SVC} [MVA]	Q_{TCR} [MVA]	Q_{TSC} [MVA]	Q_{Filtro} [MVA]
Capacitiva	150	0	120	30
Indutiva	220	250	0	0

Tabela 3: Faixa de operação SVC dimensionado.

Controle do SVC

Para o controle do SVC desenvolvido, foi implementada uma malha do tipo PI na qual é medida a tensão do barramento e comparado com uma tensão de referência (Padiyar, 2007), conforme Figura 10.

A saída desta malha de controle apresenta o valor da admitância do SVC necessária para manter a tensão do barramento no valor de referência.

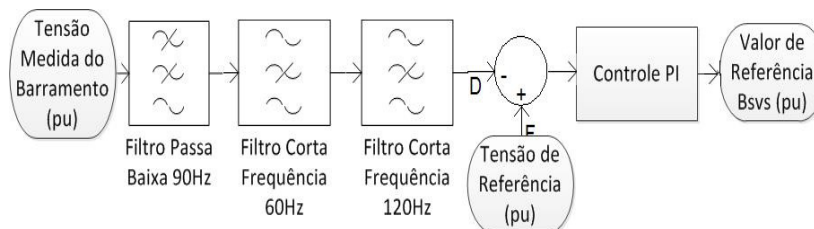


Figura 10: Malha de controle do SVC.

A partir do valor de Bsvs será avaliada a necessidade de inserção do TSC e calculado o ângulo de disparo α do TCR. Tal decisão é avaliada como:

- Bsvs indutivo – o TSC é retirado variando-se apenas o TCR, o valor do Bsvs será o somatório da admitância do TCR e o filtro de harmônicas;
- Bsvs capacitivo - mantem o TSC ativo variando o ângulo α , o valor do Bsvs será

o somatório da admitância do TCR, TSC e filtro de harmônicas.

A malha de cálculo do ângulo α desenvolvida no PSCAD/EMTDC é apresentada na Figura 11.

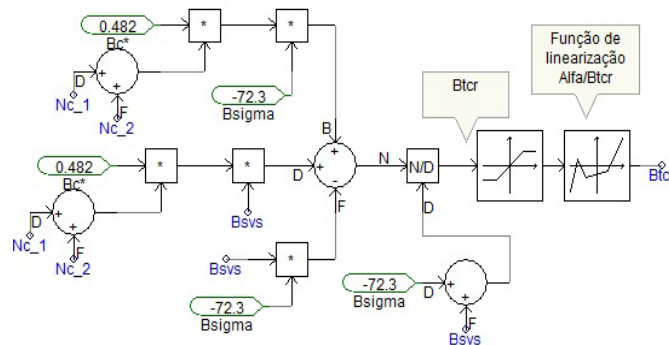


Figura 11: Malha de cálculo do ângulo α .

Na Figura 11 o bloco do PSCAD/EMTDC Função de Transferência Não Linear terá a função de indicar o ângulo α a partir do valor do Bctr desejado. Para tanto é feita a linearização da função de transferência apresentada nas equações 1 à 3, conforme ilustrado na Figura 12.

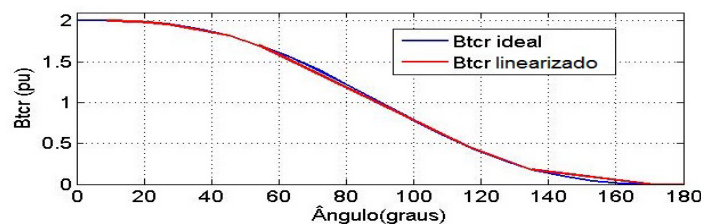


Figura 12: Curva de disparo Bctr versus α .

4 | RESULTADOS

Na simulação do sistema foi considerado o tempo variando de 0 à 24 segundos para que haja um equivalente a variação da carga no tempo real de 0 a 24 horas ao longo do dia. Desta maneira é possível visualizar a variação de carga em regime nos modos leve (00:00 às 07:00h), médio (07:00 às 18:00h e 21:00 às 24:00h) e pesado (18:00 às 21:00h). Além disso, foram feitas 03 simulações do sistema, sendo a primeira sem o SVC (gráfico azul), a segunda com o SVC ajustado para tensão do barramento Viana II em 1,05 pu (gráfico vermelho) e para 1,065 pu (gráfico verde).

As Figuras 13 e 14 ilustram respectivamente a resposta da carga ativa e reativa da linha de transmissão Mesquita/Viana II, com e sem a injeção de potência reativa do SVC. Ao longo do dia o Sistema absorve potência ativa fornecida pela linha de transmissão e dependendo do período fornece ou recebe reativos, por isso, na figura 14 é apresentado o fluxo de reativos ora com valor positivo (sistema A absorvendo) ora negativo (sistema A fornecendo).

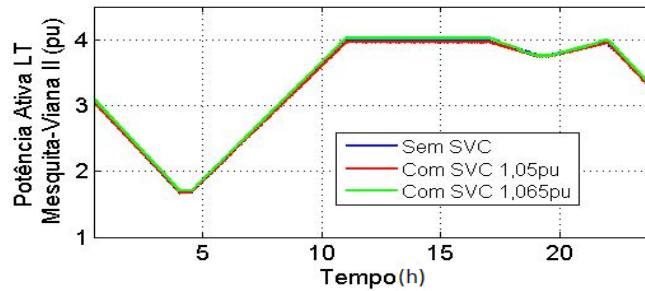


Figura 13: Potência Ativa LT Mesquita-Viana II.

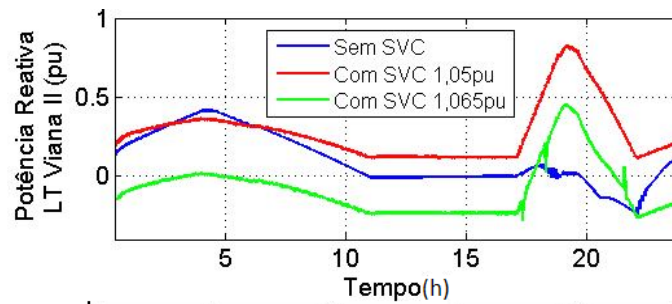


Figura 14: Potência Reativa LT Mesquita-Viana II.

As figuras 15 e 16 apresentam respectivamente as alterações dos valores do módulo e ângulo da tensão do barramento de Viana II ao longo do dia. Observa-se que a tensão no barramento de Viana II muda naturalmente numa faixa de 1,048 à 1,07 pu.

Porém, a potência ativa na linha não sofre variação com a mudança de perfil de tensão na barra de Viana II, fato este associado a não alteração da abertura angular na barra para os três perfis de tensão. Todavia, é importante ressaltar que a mudança de perfil de tensão altera o fluxo de potência reativa na linha, tendo este fato influencia direta pela injeção de reativos do SVC no sistema.

Para o aumento da tensão na barra Viana II, com perfil de tensão fixa em 1,065 pu, ocorre a diminuição de injeção de potência reativa através da linha para o sistema A. Nesta situação a injeção de energia reativa através do SVC apresenta características capacitivas, conforme Figura 17. De forma contrária para o ajuste de tensão em 1,05 pu, a tensão na barra deverá ser mantida abaixo de sua condição natural sem SVC, sendo desta forma demandada maior potência reativa através da linha e o SVC tende a manter características indutivas.

Com o controle do SVC pode ser observado na Figura 15 que a tensão do barramento é estabilizada nos valores pré-determinados na malha de controle. No ajuste de tensão para 1,065 pu, nos instantes de tempo de 17, 18 e 21 segundos são observados no perfil de tensão alguns picos na ordem de 0,015 pu devido a retirada e inserção dos capacitores do TSC 1 e TSC 2 conforme ilustrado nas Figuras 20 e 21.

A resposta de controle do sistema SVC pode ser observada na Figura 18. Esta curva possui o formato idêntico ao apresentado pela injeção de reativos do SVC, Figura 17. Desta maneira, comprova-se que o dispositivo SVC desenvolvido está trabalhando

da forma esperada, ou seja, tendo a injeção de reativos de acordo com a demanda solicitada pela malha de controle.

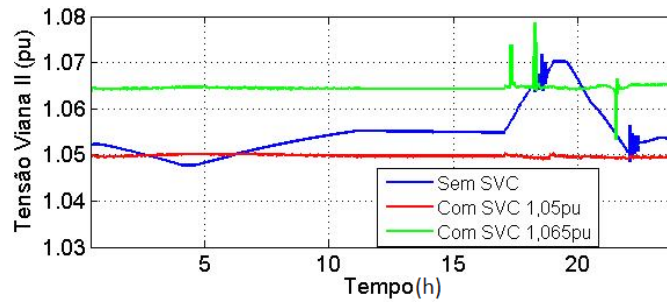


Figura 15: Tensão Barramento Viana II.

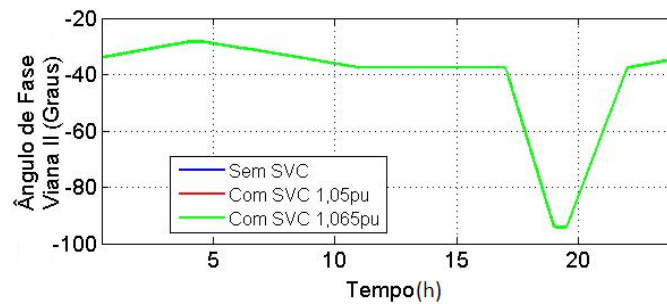


Figura 16: Ângulo de Fase Barramento Viana II.

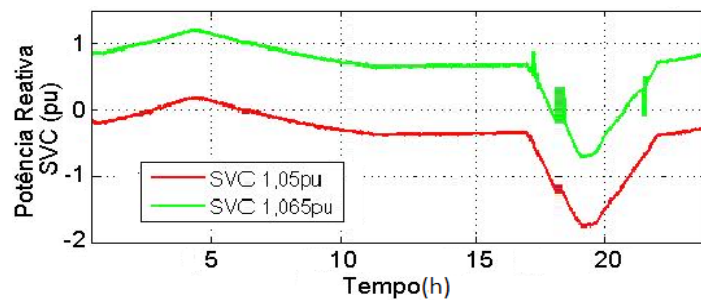


Figura 17: Potência Reativa SVC.

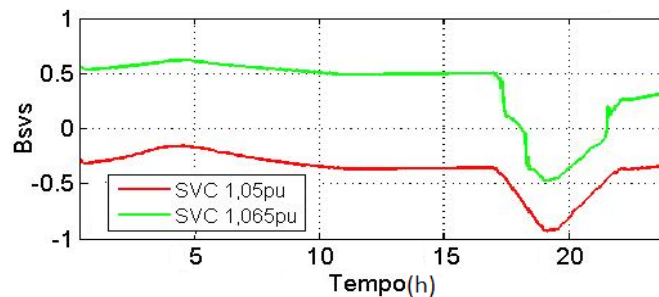


Figura 18: Sinal de Controle Bsvs.

A potência reativa disponibilizada pelo SVC será a soma do reativo de todos seus componentes, TCR, TSC 1, TSC 2 e Filtros. Sendo assim, na situação de controle em 1,05 pu, pode ser observado nas Figuras 20 e 21 que os TSC's 1 e 2 não são

ativados, havendo apenas a injeção de reativos do filtro de harmônicas que se mantém praticamente constantes ao longo do tempo, Figura 22, com a variação do TCR conforme ilustrado na Figura 19. Esta situação ocorre, pois, a malha de controle Bsvs tenta manter o SVC com características indutivas ao longo do dia, não necessitando dos TSC's.

A situação de controle de tensão em 1,065 pu exigirá a atuação dos TSC's 1 e 2 na maior parte do dia, pois, apenas no intervalo entre 17 e 20 segundos a tensão natural do sistema tende a ser superior a este valor de referência. Neste momento ocorre o desligamento dos dois TSC's conforme pode ser observado nas Figuras 20 e 21. A saída Bsvs da malha de controle neste perfil de controle mantém-se acima da situação de controle 1,05 pu ao longo de toda a simulação. Entretanto, mesmo o SVC injetando potência reativa capacitiva no sistema para manter o valor de referência da tensão em 1,065 pu, o TCR passa a injetar mais reativos do que a situação do SVC com características indutivas. Isto ocorre devido ao ajuste do fluxo de reativos ser composto pela soma de todos os componentes do SVC. Com a entrada de reativos capacitivos neste dispositivo em degraus, o ajuste final do sistema fica para o TCR, uma vez que este pode variar linearmente em função do ângulo de disparo de seus tiristores.

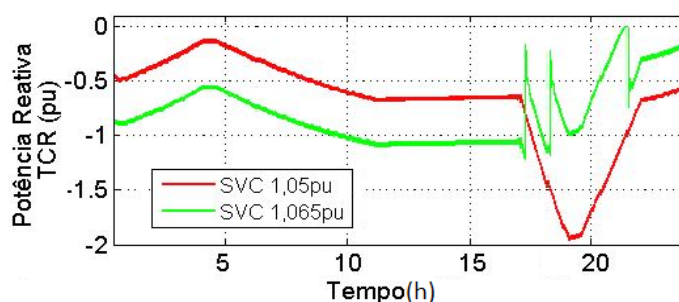


Figura 19: Potência Reativa TCR.

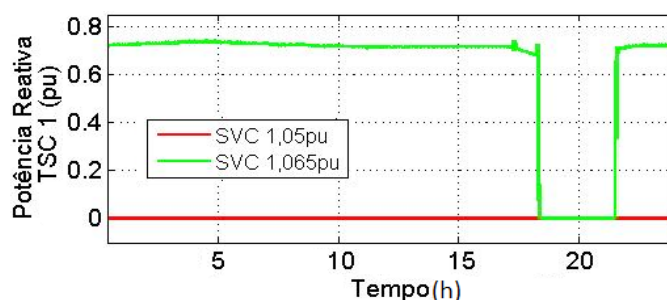


Figura 20: Potência Reativa TSC 1.

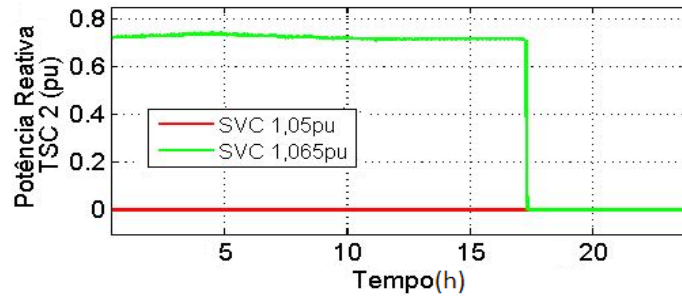


Figura 21: Potência Reativa TSC 2.

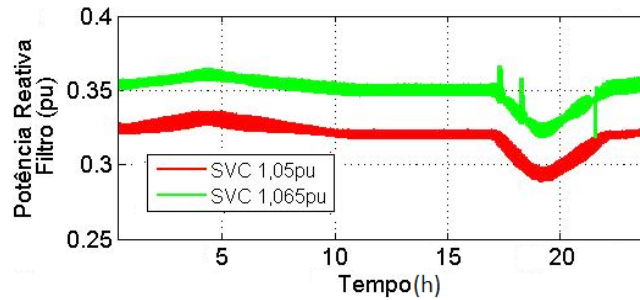


Figura 22: Potência Reativa Filtro.

O Fluxo de reativos do filtro apresentado na Figura 22, mantém-se praticamente fixo ao longo de toda a simulação, com afundamentos entre os instantes 17 e 21 segundos que são os momentos de pequeno afundamento de tensão do barramento. Tal situação é esperada, tendo em vista que o filtro é um elemento passivo conectado em paralelo ao barramento.

5 | CONCLUSÕES

Por meio deste trabalho foi simulado e validado o sistema que interliga o estado Espírito Santo ao de Minas Gerais através da linha Mesquita/Viana II 500kV no software PSCAD/EMTDC. Além disso, foi elaborado o dispositivo SVC para controle de tensão na barra de Viana II.

A proposta deste foi alcançada de forma satisfatória, com a modelagem do sistema atendendo as expectativas embasadas nos valores disponibilizados pelo ONS. O SVC desenvolvido também apresentou o controle e desempenho esperados, conforme expectativas teóricas, com o chaveamento do TCR e TSC's ocorrendo de acordo com a demanda feita pela malha de controle em seu sinal Bsvs.

O problema de controle de perfil de tensão na barra de Viana II, objeto de estudo deste projeto, foi corrigido de forma satisfatória com a inserção do SVC projetado, sendo apresentadas neste artigo duas situações dentro da faixa de controle projetada.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos as informações cedidas pela equipe do ONS necessárias para elaboração deste projeto.

REFERÊNCIAS

Empresa de Pesquisa Energética (2011). **Nota Técnica DEA 16/11: Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2012-2021)**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20120104_1.pdf>. Acesso em 04.jan.2014.

Grande Vitória/ES Desenvolvimento e Metropolização. Disponível em: <http://www.pucsp.br/artecidade/mg_es/textos/grande_vitoria_metropolizacao.pdf>. Acesso em 10.jan.2014.

Hingorani, N.G. and Gyugyi, L (2000). **Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems**. IEEE Press, USA.

Mohan, M. and Rajiv, V. (2002). **Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems**. IEEE Press, USA.

Operador Nacional do Sistema (2013). **Casos de Referências utilizadas para estudos elétricos de fluxo de potência dentro do horizonte do Plano de Ampliações e Reforços na Rede Básica PAR 2014-2016**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/plano_ampliacao/casos_refer_regime_permanente.aspx>. Acesso em: 23 nov. 2013.

Padiyar, K. (2007). **Facts Controllers in Power Transmission and Distribution**. New Age International, New Delhi.

Watanabe, Edson H.; Barbosa, Pedro G.; Almeida, Katia C.; Taranto, Glauco N. “**Tecnologia FACTS - Tutorial**”, SBA Controle & Automação, Vol. 9, No. 1, 1998, p. 39-55.

SOBRE A ORGANIZADORA

Jaqueline Oliveira Rezende Possui graduação em Engenharia Elétrica, com certificado de estudos em Engenharia de Sistemas de Energia Elétrica e mestrado em Engenharia Elétrica, ambos pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente é aluna de doutorado em Engenharia Elétrica, no Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos, pela Universidade Federal de Uberlândia. Atuou como professora nos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação. Tem realizado pesquisas em Sistemas de Energia Elétrica, dedicando-se principalmente às seguintes áreas: Energia Solar Fotovoltaica; Curvas Características de Painéis Fotovoltaicos; Dinâmica de Sistemas Elétricos; Geração Distribuída; Simulação Computacional; Algoritmo Genético.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-85107-46-8

