

Felipe Mendes Franson

**Controle de Equipamentos Externos Utilizando
o *SVC***

Ilha Solteira, SP

Fevereiro de 2023

Felipe Mendes Franson

Controle de Equipamentos Externos Utilizando o *SVC*

Trabalho de Graduação apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica,
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira -
Unesp.

Orientador: Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Junior

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Ilha Solteira, SP

Fevereiro de 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

F835c Franson, Felipe Mendes.
Controle de equipamentos externos utilizando o SVC / Felipe Mendes
Franson. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
40 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

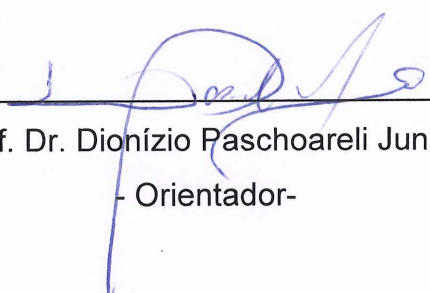
Orientador: Dionízio Paschoareli Junior

Inclui bibliografia

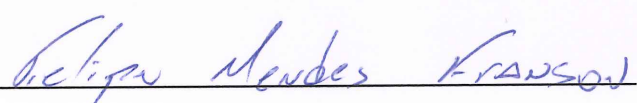
1. Facts. 2. SVC. 3. Redes de transmissão. 4. Controlador de tensão. Raiane da Silva Santos

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos dez dias do mês de março do ano de dois mil e vinte e três, o discente **Felipe Mendes Franson** matriculado sob o nº 152055088, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Junior, o Prof. Dr. Jonatas Boas Leite e o Prof. Dr. John Fredy Franco Baquero, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Controle de Equipamentos Externos Utilizando o SVC**", obtendo a nota 9,0 (nove) e conceito APROVADO.



Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Junior
- Orientador -

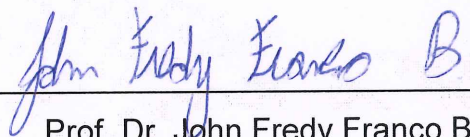


Felipe Mendes Franson
- Discente -



Prof. Dr. Jonatas Boas Leite

- Membro da Banca -



Prof. Dr. John Fredy Franco Baquero

- Membro da Banca -

Eu dedico esse trabalho ao meu pai, que não pode vivenciar este momento comigo,
mas tenho certeza que sempre acreditou em mim.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a minha mãe Daniela e irmão Leonardo por terem me acompanhado nessa jornada que foi a graduação e por sempre estarem ao meu lado, me apoiando desde o começo.

Gostaria de agradecer aos meus amigos e irmãos que a faculdade me deu e que espero levar para a vida, em especial o Victor Suzuki Souto que esteve ao meu lado mesmo durante as situações mais desafiadoras e nos meu piores momentos, sempre muito presente e prestativo.

Aos professores da UNESP - FEIS, que me ajudaram direta ou indiretamente nessa fase. Gostaria de deixar um agradecimento em especial para o professor Dionízio por ter aceitado me orientar nesse trabalho e aceito o tema proposto, pois foi de muito valor para o meu desenvolvimento profissional.

Tudo o que temos de decidir é o que
fazer com o tempo que nos é dado

J.R.R Tolkien, *O Senhor dos Anéis*

Resumo

SVC's (Static Var Compensator) são equipamentos amplamente usados na transmissão e distribuição, destinados a aumentar a capacidade de transmissão de determinada localidade, controlando a injeção de potência reativa, dentro das especificações do equipamento permitindo o controle da tensão ou corrente do local instalado fique dentro da faixa planejada independente de variações que podem ocorrer no sistema. Porém numa grande perturbação pode ocorrer de o equipamento operar muito próximo dos limiares de sua faixa de operação e com isso não garantir que o parâmetro controlado fique muito próximo ao limite projetado, podendo ocasionar danos materiais ao equipamento e/ou perdas financeiras. Devido a esse fato se faz necessário a implementação de um controle de equipamentos externos pelo SVC, alternativa que permite que o equipamento opere no ajuste fino da tensão e numa situação na qual o *SVC* opere muito próximo de seus limites projetados ele tenha a capacidade de acionar equipamentos externos a ele com a finalidade de fazer o ajuste grosso do reativo da barra.

Palavras-chave: redes de transmissão, *FACTS*, fluxo de potência, *SVC*, controlador de tensão.

Lista de Figuras

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Linha de Transmissão com uma UG e Carga | 16 |
| 2 | Diagrama Fasorial | 17 |
| 3 | Potência x Angulo da Linha | 17 |
| 4 | Linha de Transmissão com compensação | 18 |
| 5 | Diagrama Fasorial com compensação | 18 |
| 6 | Potência x Angulo da linha | 19 |
| 7 | Elementos Shunt que podem compor o <i>SVC</i> | 20 |
| 8 | Nó <i>SVC</i> | 20 |
| 9 | Característica V-I do <i>SVC</i> | 21 |
| 10 | Diagrama Unifilar contendo o <i>SVC</i> | 22 |
| 11 | Diagrama Fasorial com e sem Compensação | 22 |
| 12 | Ramo <i>TCR</i> | 23 |
| 13 | Relação B_{TCR} x α | 23 |
| 14 | Ramo <i>TSC</i> | 24 |
| 15 | Modelo Básico de Regulador de Tensão para o <i>SVC</i> | 25 |
| 16 | Diagrama Unifilar <i>SVC</i> -Bauru | 26 |
| 17 | Diagrama Unifilar Sistema Elétrico Bauru | 27 |
| 18 | Simulação 1: Modelo do SVC utilizado para simulação | 28 |
| 19 | Simulação 1: Operação de Tensão e Corrente dentro dos limites especificados | 29 |
| 20 | Simulação 1: Operação da potência e tensão medida dentro dos limites especificados | 29 |
| 21 | Simulação 1: Influência do angulo de disparo | 30 |
| 22 | Perfil Potência Reativa <i>SVC</i> - Bauru | 31 |
| 23 | Tensão Injetada Simulação 2 | 32 |
| 24 | Fluxograma solução 1 | 34 |
| 25 | Simulação Solução 1 - Chaveamento 1 Reator | 34 |
| 26 | Fluxograma solução 2 | 35 |
| 27 | Simulação solução 2 | 35 |
| 28 | Simulação solução 2 para 2 Reatores - Potência | 36 |
| 29 | Simulação solução 2 para 2 Reatores - Tensão | 37 |

| | | |
|----|------------------------------------|----|
| 30 | Fluxograma Solução Geral | 38 |
|----|------------------------------------|----|

Lista de Tabelas

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Tensão Injetada Simulação 1 | 28 |
| 2 | Tensão Injetada Simulação 1.1 | 30 |
| 3 | Tensão Injetada Simulação 2 | 32 |
| 4 | Padronização Tensão Injetada | 33 |
| 5 | Padronização Tensão Injetada para 2 Reatores | 36 |

Lista de Símbolos

Letras Latinas

| | | |
|-----------|---|-----------------------------|
| V_1 | - | Tensão gerador |
| V_2 | - | Tensão carga |
| X | - | Reatância da linha |
| P | - | Potência transmitida |
| V_S | - | Tensão fonte |
| V_M | - | Tensão compensador |
| V_L | - | Tensão carga |
| I_S | - | Corrente gerador |
| I_M | - | Corrente compensador |
| I_L | - | Corrente carga |
| P_{SVC} | - | Potencia ativa do SVC |
| Q_{SVC} | - | Potencia reativa do SVC |
| B_{SVC} | - | Susceptância total do SVC |
| B_{TCR} | - | Susceptância do ramo de TCR |

Letras Gregas

α - ângulo de disparo

Lista de Siglas

| | | |
|----------------|---|--|
| <i>SVC</i> | - | Static Var Compensator |
| <i>FACTS</i> | - | Flexible Alternate Current Transmission Systems |
| <i>TCSC</i> | - | Thyristor Controlled Series Capacitor |
| <i>STATCOM</i> | - | Static Synchronous Compensator |
| <i>UFPC</i> | - | Unified Power Flow Controller |
| <i>ONS</i> | - | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| <i>SIN</i> | - | Sistema Interligado Nacional |
| <i>TCR</i> | - | Thyristor Controlled Reactor |
| <i>TSC</i> | - | Thyristor Switched Capacitor |
| <i>IEEE</i> | - | Instituto dos Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos |

Sumário

.....

.....

.....

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 12 |
| 1.1 | Organização Sistema Elétrico de Potência | 12 |
| 1.2 | Importância dos Controladores <i>FACTS</i> | 13 |
| 1.3 | Objetivo do Trabalho | 15 |
| 1.4 | Organização do Trabalho | 15 |
| 2 | <i>FACTS</i> e suas Características | 16 |
| 2.1 | Princípio de Funcionamento dos <i>FACTS</i> | 16 |
| 2.2 | Entendendo o <i>SVC</i> | 19 |
| 2.2.1 | Reator Controlado a Tiristor | 22 |
| 2.2.2 | Capacitor Chaveado a Tiristor | 23 |
| 2.2.3 | Controlador de Tensão | 24 |
| 3 | Operação do <i>SVC</i> | 26 |
| 3.1 | Funcionamento dentro dos padrões especificados | 28 |
| 3.2 | Funcionamento fora dos padrões especificados | 31 |
| 4 | Controle Equipamentos Externos pelo <i>SVC</i> | 33 |
| 5 | Conclusões | 39 |
| | Referências | 40 |

1 Introdução

A energia elétrica é uma forma de energia muito importante e amplamente utilizada na sociedade moderna. Ela tem sido um fator fundamental no desenvolvimento econômico e social das nações e é considerada um recurso essencial para a maior parte da população mundial. A presença da energia elétrica tem permitido o funcionamento de muitas indústrias e serviços, além de ser fundamental para o conforto e bem-estar das pessoas em suas casas e em seus lugares de trabalho. Com o passar dos anos a necessidade pela energia elétrica cresceu e com isso sua demanda também, devido a esse crescimento surgiram incertezas com relação ao seu abastecimento. Mutuo a essas incertezas surgiram questões políticas, ambientais e sociais com relação ao uso dessa energia que dificulta a tomada de uma decisão para aliviar essas restrições, ocasionando o desvio do funcionamento dos sistemas de seu ponto ótimo.

Junto com o aumento da demanda por energia elétrica e a necessidade de novas soluções, tem havido um esforço constante para desenvolver novas tecnologias e fontes de energia que possam atender às necessidades crescentes de energia de maneira sustentável e eficiente. Isso tem incluído o desenvolvimento de fontes de energia renováveis, como energia solar e eólica, bem como o uso de tecnologias mais eficientes para produzir e distribuir energia elétrica. Além disso, existe um esforço para promover a conservação de energia e o uso eficiente de recursos, a fim de minimizar o impacto ambiental da produção de energia ([GLANZMANN, 2006](#)).

1.1 Organização Sistema Elétrico de Potência

Os Sistemas Elétricos de Potência são conjuntos de instalações e dispositivos que têm como objetivo transportar energia elétrica de fontes geradoras, como usinas hidrelétricas, termoelétricas, eólicas e solares, até os consumidores finais. Isso é feito através de linhas de transmissão de longa distância que são interligadas por subestações. O objetivo dos Sistemas Elétricos de Potência é fornecer energia elétrica de maneira rápida e consistente aos consumidores, de acordo com a demanda e com uma qualidade adequada.

Os sistemas de energia modernos são projetados para operar de maneira eficiente e

confiável, fornecendo energia sob demanda para diferentes centros de carga. As usinas geradoras de energia, como termelétricas, hidrelétricas e nucleares, podem ser localizadas em áreas remotas por motivos econômicos, ambientais e de segurança. Isso exige a utilização de linhas de transmissão de alta ou extra alta tensão para transmitir a energia gerada até os centros de carga. Essas linhas de transmissão podem percorrer grandes distâncias e são essenciais para garantir o fornecimento de energia elétrica aos consumidores finais. Além disso, os sistemas de energia modernos precisam ser capazes de atender às demandas de energia em constante mudança e devem ser projetados de maneira a garantir a segurança e a estabilidade do sistema.

Para garantir essa distribuição de energia são realizadas inter-conexões entre as variadas unidades de geração para garantir a redução dos custos da energia elétrica, razões políticas e econômicas além de garantir a confiabilidade no suprimento dessa energia. Isso permite aproveitar a diversidade de cargas, a disponibilidade de fontes de energia e o preço do combustível para fornecer energia elétrica aos consumidores de maneira eficiente e confiável. Se um sistema de geração de energia fosse composto apenas por geradores individuais, sem a possibilidade de interconexão com outros sistemas, seriam necessários muito mais recursos de geração para atender à mesma carga com a mesma confiabilidade, o que resultaria em um custo muito maior da energia elétrica. No Brasil esse sistema de produção e distribuição de energia elétrica conhecido como SIN, Sistema Interligado Nacional, que é composto principalmente por usinas hidrelétricas e é dividido em quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte. A interconexão entre esses subsistemas através da rede de transmissão de energia permite a transferência de energia entre eles, aproveita sinergicamente os ganhos e explora a diversidade dos regimes hidrológicos das bacias

1.2 Importância dos Controladores *FACTS*

Porém mesmo com todo esse desenvolvimento na interligação das unidades de produção, coordenação nos sistemas de proteção e controle dessas linhas de transmissão somado à crescente demanda de energia elétrica ocorrem situações onde o sistema passa a trabalhar fora de seu ponto ótimo. A fim de garantir essa segurança e confiabilidade ao SIN são utilizados sistemas conhecidos como *FACTS* (*Flexible Alternate Current Transmission System*), Sistema de Transmissão Flexível de Corrente Alternada, afim de garantir uma maior capacidade de transmissão de energia sem a necessidade de construção de novas usinas ou subestações, fornecendo um ponto ótimo entre a geração e distribuição (MILLER, 2002).

Esses dispositivos *FACTS* permitem expandir a capacidade útil e potência de linhas

de transmissão já existentes e no futuro de novas linhas de transmissão que venham a ser instaladas. Esses dispositivos podem ser capazes de controlar a corrente, tensão, ângulo da linha ou impedância do elemento controlado com a finalidade de aumentar a capacidade da linha de transmissão. Dentre os dispositivos *FACTS* eles podem ser definidos em:

- **Compensação Série:** Elemento inserido em série com a linha, podendo ser um capacitor, indutor ou algum equipamento que utilize eletrônica de potência. Esses dispositivos permitem o controle de tensão da linha podendo consumir ou injetar potência reativa na linha. O dispositivo *FACTS* mais conhecido dessa categoria é o *TCSC* (*Thyristor Controlled Series Capacitor*).
- **Compensação *Shunt*:** Elemento inserido em derivação com a linha, podendo ser um capacitor, indutor ou algum equipamento que utilize eletrônica de potência. Esses dispositivos injetam corrente na linha podendo consumir ou injetar potência reativa na linha. Os dispositivos *FACTS* mais conhecidos dessa categoria são o *SVC* (*Static Var Compensator*) e o *STATCOM* (*Static Synchronous Compensator*).
- **Controlador Combinado Série - *Shunt*:** É um controlador que utiliza elementos em série e paralelo com a linha de maneira coordenada. É capaz de injetar tensão com o elemento em série e corrente com o elemento em paralelo. O dispositivo mais conhecido dessa categoria é o *UPFC* (*Unified Power Flow Controller*).

Esses controladores são projetados para aumentar a capacidade de transmissão uma determinada região, essa determinação parte da ONS (Operador Nacional do Sistema) definindo a potência instalada e seu método de operação. Porém no dia a dia esses dispositivos encontram situação que fogem das condições projetadas podendo ocasionar defeitos nesses equipamentos e perdas financeiras.

1.3 Objetivo do Trabalho

Este trabalho de graduação propõe estudar e analisar o funcionamento característico de um *SVC*, estudar situações em que seu funcionamento esteja próximo ao seu limite operacional, estudar um meio que o *SVC* possa operar equipamentos externos a sua malha e avaliar a efetividade dessas operações em meio a situações cotidianas desse equipamento.

1.4 Organização do Trabalho

A seguir apresenta-se uma sucinta descrição do conteúdo de cada capítulo deste documento.

Capítulo 1: apresenta o contexto no qual o trabalho está situado e os objetivos e contribuições alcançadas;

Capítulo 2: descreve a base matemática utilizada para se obter o modelo matemático para entender o funcionamento característico do equipamento;

Capítulo 3: apresenta simulações demonstrando o funcionamento do equipamento em situações normais e situações que colocam o equipamento fora de seu ponto de funcionamento;

Capítulo 4: apresenta uma solução capaz de permitir o controle de equipamentos externos e os benefícios de sua prática;

Capítulo 5: apresenta as conclusões obtidas;

2 *FACTS* e suas Características

Neste capítulo é descrita a teoria e fundamentos utilizados neste trabalho. Apresenta-se os conceitos utilizados na análise dos *FACTS*, uma breve explicação sobre seu funcionamento e análise do funcionamento.

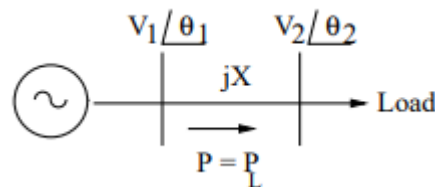
2.1 Princípio de Funcionamento dos *FACTS*

Para explicar o funcionamento dos dispositivos *FACTS* vamos começar utilizando uma linha de transmissão ligando uma unidade geradora a uma carga como na Figura 1. Partindo do pressuposto que essa linha não tem perdas, desconsiderando o carregamento da linha e que a tensão em V_L é controlada, podemos obter o fluxo de potência através da LT pela equação (1) (PADIYAR, 2007):

$$P = \frac{V_S \cdot V_L}{X} * \text{sen}(\theta_1 - \theta_2) \quad (1)$$

Onde P é o fluxo de potência, X é a reatância da linha e V_S e V_L são as tensões nos terminais da unidade geradora e carga.

Figura 1 – Linha de Transmissão com uma UG e Carga



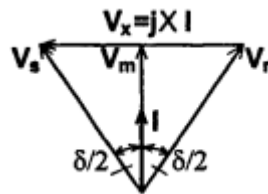
Fonte: (PADIYAR, 2007)

Manipulando a equação (1) é possível obtermos a equação em função do ângulo da linha, facilitando assim a análise. Como $V_S = V_L$ nós temos que:

$$P = \frac{V^2}{X} * \sin(\delta) \quad (2)$$

Feita essa simplificação da equação (2) pode-se desenhar o diagrama fasorial da linha de transmissão da Figura 1

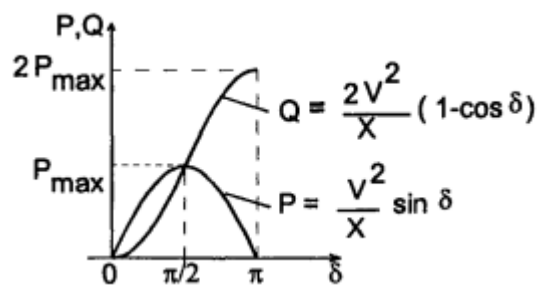
Figura 2 – Diagrama Fasorial



Fonte: (SONG, 1999)

Dessa maneira podemos obter graficamente o seguinte resultado:

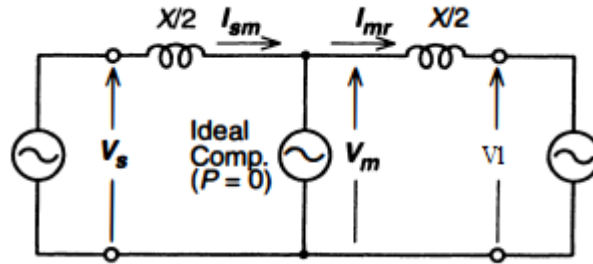
Figura 3 – Potência x Angulo da Linha



Fonte: (SONG, 1999)

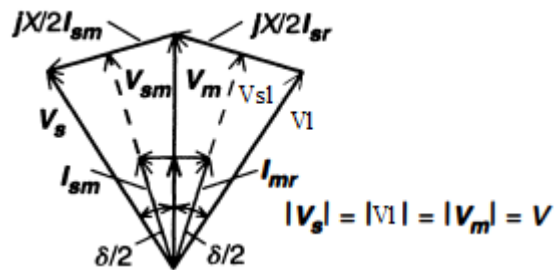
Agora fazendo a análise desse mesmo sistema, porém inserindo um dispositivo *FACTS* no meio dessa linha de transmissão nós temos o seguinte esquema exposto na Figura 4. Analisando a linha de transmissão com o compensador ideal, onde a potencia ativa é $P = 0$ nós pode-se obter o seguinte diagrama fasorial.

Figura 4 – Linha de Transmissão com compensação



Fonte: (HINGORANI, 2000)

Figura 5 – Diagrama Fasorial com compensação



Fonte: (HINGORANI, 2000)

Onde:

- V_S é Tensão do emissor
- V_M é Tensão do compensador
- V_L é Tensão do receptor

Analisando o diagrama pode-se chegar a conclusão que $V_S = V_M = V_L$, dessa maneira o compensador divide a linha em dois elementos iguais, assim a potência transmitida do emissor para o compensador através da primeira metade da linha é igual à tensão transmitida do compensador para o receptor através da segunda metade da linha, dessa maneira podemos calcular que:

$$V_{SM} = V_{MR} = V * \cos\left(\frac{\delta}{4}\right) \quad (3)$$

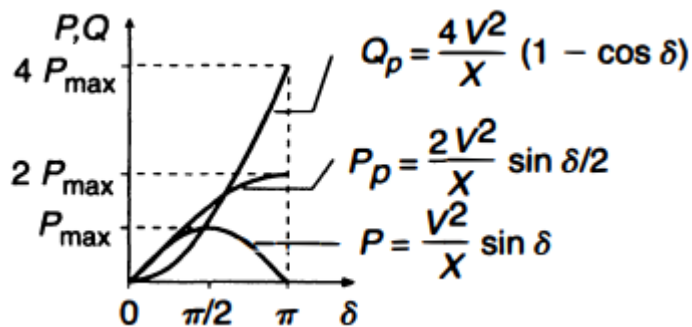
$$I_{SM} = I_{MR} = \frac{4.V}{X} * \sin\left(\frac{\delta}{4}\right) \quad (4)$$

$$P = V_{SM} * I_{SM} = V_{MR} * I_{MR} = VI * \cos\left(\frac{\delta}{4}\right) \text{ ou } P = \frac{2V^2}{X} * \cos\left(\frac{\delta}{4}\right) \quad (5)$$

$$Q = VI * \sin\left(\frac{\delta}{4}\right) \text{ ou } Q = \frac{4V^2}{X} * (1 - \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)) \quad (6)$$

Logo pode-se obter que a curva que relaciona a potência com o angulo de linha é;

Figura 6 – Potência x Angulo da linha



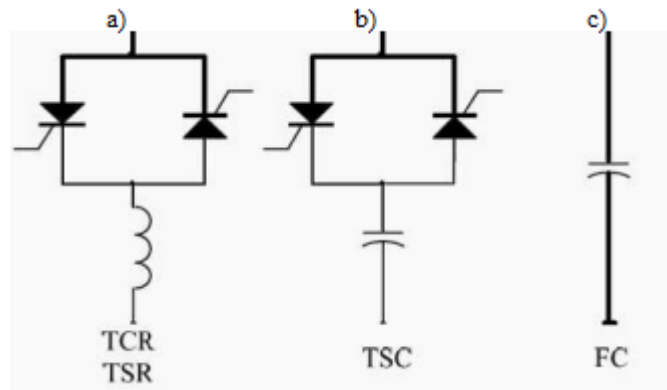
Fonte: (HINGORANI, 2000)

Comparando as Figuras 3 e 5 pode-se observar que a presença do compensador foi capaz de aumentar a capacidade de transmissão de potencia ativa da linha, isso evidencia o potencial dos dispositivos *FACTS* de melhorar a capacidade de uma determinada região.

2.2 Entendendo o *SVC*

Sob o ponto de vista operacional o *SVC* se comporta como uma reatância controlada conectada em shunt, com a capacidade de injetar ou absorver reativo com a finalidade de regular a tensão do ponto em que está conectado na rede AC (MILLER, 2002). Para conseguir essa controlabilidade o *SVC* pode ser construído com diferentes elementos conectados em shunt. Esses elementos podem ser observados na Figura 7.

Figura 7 – Elementos Shunt que podem compor o SVC



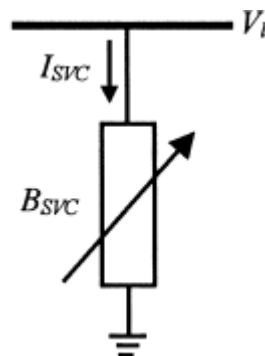
Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 7 podemos observar que temos elementos que são fixos, como o capacitor fixo 7.c, e os elementos que podem ser controlados ou chaveados, como o reator e capacitor chaveados a tiristor 7.a e 7.b e o reator controlado a tiristor 7.a. Essa diferenciação entre elemento chaveado e controlado ocorre pois devido ao avanço das tecnologias de eletrônica de potência e das técnicas de controle linear hoje é possível controlar o ângulo de disparo conforme a necessidade. Descrevendo a situação temos que:

- **Chaveado a Tiristor:** são capazes de disparar o tiristor somente em $\alpha = 90$ e $\alpha = 180$.
- **Controlado a Tiristor:** são capazes de disparar o tiristor dentro de uma faixa que compreende em $90 \leq \alpha \leq 180$.

Passado por esses detalhes podemos começar a análise matemática do SVC. Para isso é necessário se definir algumas condições e para isso utiliza-se a Figura 8

Figura 8 – Nó SVC



Fonte: (MILLER, 2002)

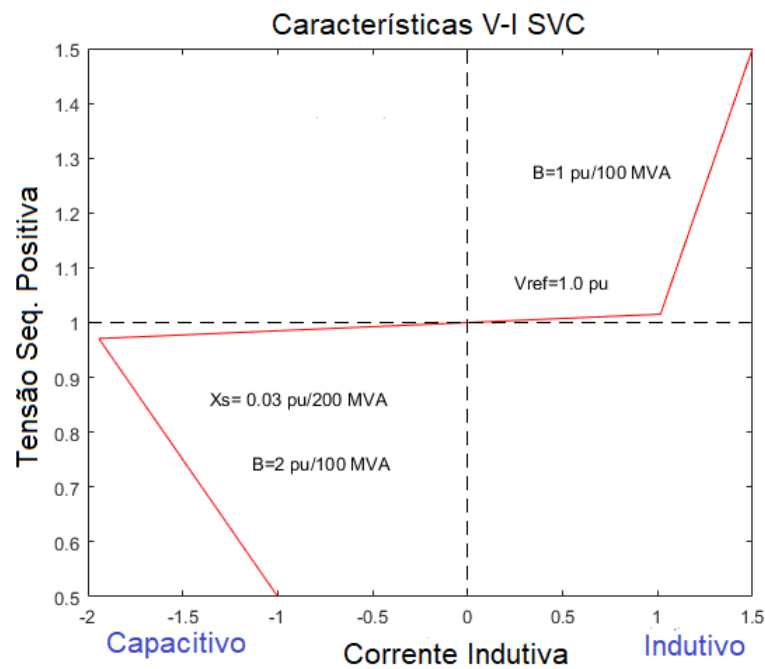
A partir desse modelo é definido que o SVC possui potência ativa nula, portanto o SVC não drena potência ativa do sistema em que está conectado. Já a potência reativa

do *SVC* pode ser descrita em função da tensão e sua susceptância equivalente, logo as definições são:

$$\begin{aligned} P_{svc} &= 0 \\ Q_{svc} &= -|V^2| * B_{svc} \end{aligned} \quad (7)$$

Após essas definições é possível obter o comportamento característico do V-I do *SVC* que pode ser observado na Figura 9. Analisando a curva nós pode-se concluir que quando a corrente do *SVC* se desloca para o segundo quadrante, o *SVC* passa a injetar reativo capacitivo na rede e oposto ocorre quando a corrente se desloca para o primeiro quadrante, pois o *SVC* passa a injetar reativo indutivo na rede.

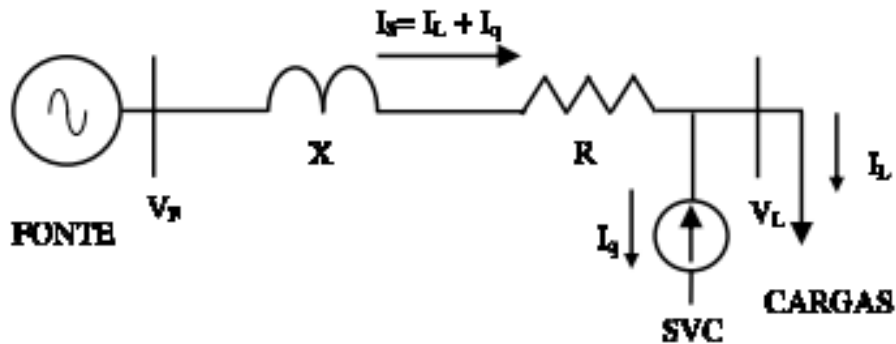
Figura 9 – Característica V-I do *SVC*



Fonte: Elaborado pelo Autor

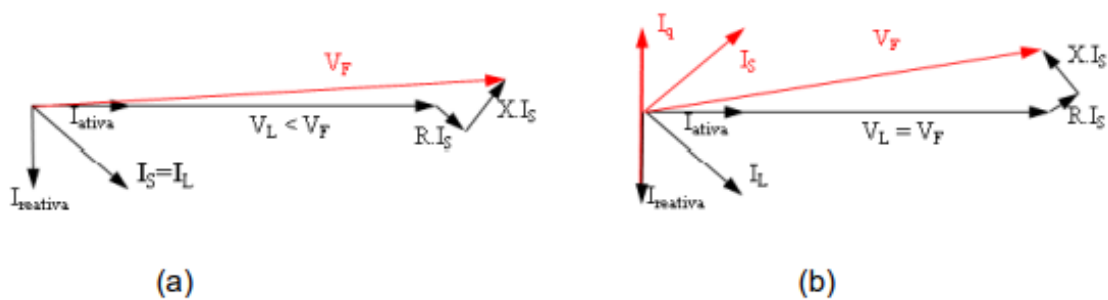
A fim de explicitar a capacidade de controle de tensão por parte do *SVC* é possível montar um diagrama unifilar contendo uma fonte de tensão, uma carga e o próprio *SVC* e analisar o diagrama fasorial obtido.

Figura 10 – Diagrama Unifilar contendo o SVC



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 11 – Diagrama Fasorial com e sem Compensação



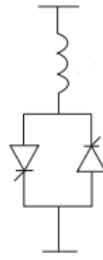
Fonte: Elaborado pelo Autor

Conforme pode ser observado na Figura 11.a a rede sem compensação possui a relação de $V_L < V_f$, agora na Figura 11.b que há a presença do SVC para regulação de tensão a relação é $V_L = V_f$, pois o SVC é capaz de controlar a corrente que é injetada na rede permitindo ajustar a tensão na carga, compensando as perdas na linha, para que ela tenha a mesma magnitude que a tensão da fonte.

2.2.1 Reator Controlado a Tiristor

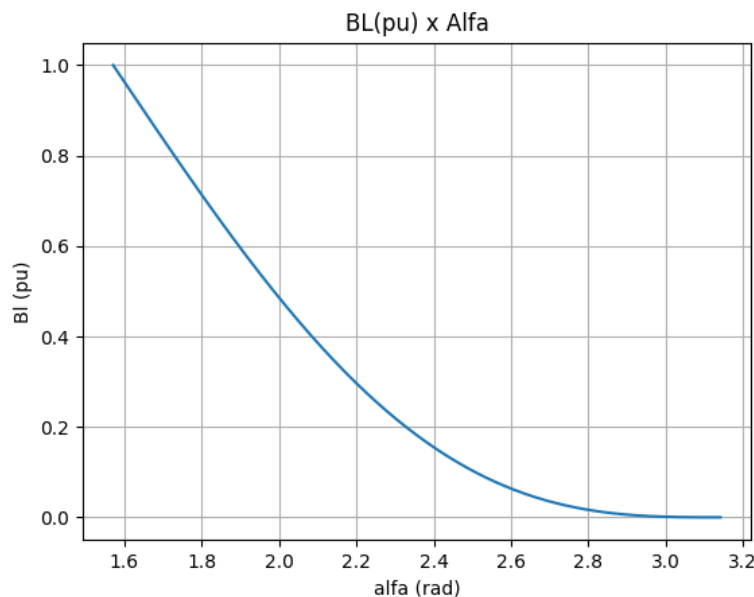
O Reator controlado a tiristor é um circuito formado por um reator em serie com dois tiristores em anti-paralelo, como pode ser observado na Figura 12. Como esse ramo é controlado nós temos a possibilidade de controlar o angulo de disparo dentro da faixa $90 \leq \alpha \leq 180$ permitindo controlar a susceptância do banco de reator, conseqüentemente a corrente que atravessa esse dispositivo. A equação que descreve esse comportamento é:

$$B_{TCR}(\alpha) = \frac{2 * \pi - 2 * \alpha + \sin(2 * \alpha)}{\pi * X_L} \quad (8)$$

Figura 12 – Ramo *TCR*

Fonte: Elaborado pelo Autor

A partir da equação 8 ((ALMEIDA, 2016)) é possível encontrar a relação da susceptância em pu do ramo TCR com o ângulo de disparo, a relação está na Figura 13.

Figura 13 – Relação $B_{TCR} \times \alpha$ 

Fonte: Elaborado pelo Autor

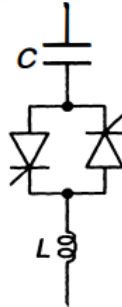
Na Figura 13 é possível observar que a faixa de susceptância do ramo *TCR* opera conforme o ângulo de disparo varia entre $90 \leq \alpha \leq 180$, sendo no $\alpha = 90$ o ângulo de máxima susceptância, pois nesse momento a tensão nesse ramo é igual a 0, e no $\alpha = 180$ o ângulo de mínima susceptância, pois o valor da tensão no ramo é o valor de pico. Tendo isso exposto fica claro a forma de funcionamento do ramo *TCR*.

2.2.2 Capacitor Chaveado a Tiristor

O capacitor chaveado a tiristor é um circuito composto por um capacitor, dois tiristores em anti-paralelo e uma reator para limitar a corrente de surto nas válvulas. Por esse

ramo ser apenas chaveado os disparos são feitos em $\alpha = 90$ e $\alpha = 180$, com isso inserindo ou retirando o banco totalmente nos momentos em que o banco é chaveado.

Figura 14 – Ramo *TSC*



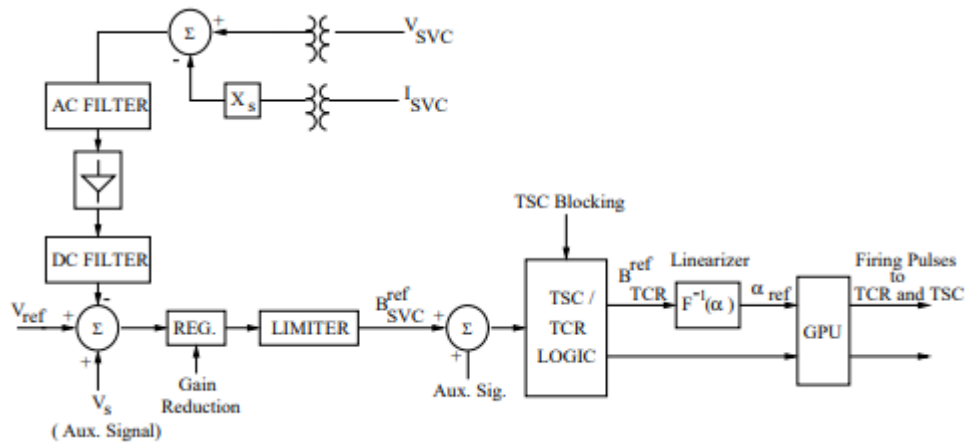
Fonte: Elaborado pelo Autor

Quando um capacitor comutado por tiristor (*TSC*) é desconectado, é ideal que o capacitor permaneça carregado em seu valor de pico enquanto a tensão no tiristor não condutor varia em fase com a tensão CA aplicada. Isso pode ajudar a minimizar os distúrbios transitórios dependendo dos momentos em que o *TSC* é reconectado, pois a tensão no tiristor será zero dependendo desse momento da reconexão, sendo assim necessário um sistema de monitoramento capaz de definir esse momento ótimo de chaveamento. Fatores que podem afetar esse comportamento incluem o valor do capacitor, a frequência de comutação e a carga do sistema. Projeto e controle cuidadosos desses fatores pode ajudar a garantir que o *TSC* opere sem problemas e com o mínimo de perturbações transitórias.

2.2.3 Controlador de Tensão

O método mais comum de utilização dos *SVC* é como regulador de tensão, onde ele fica responsável por manter a tensão do ponto instalado próximo da tensão de referência. Para a construção desse tipo de controlador o IEEE propõe um controlador no formato de constante ganho-tempo, como pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 – Modelo Básico de Regulador de Tensão para o SVC



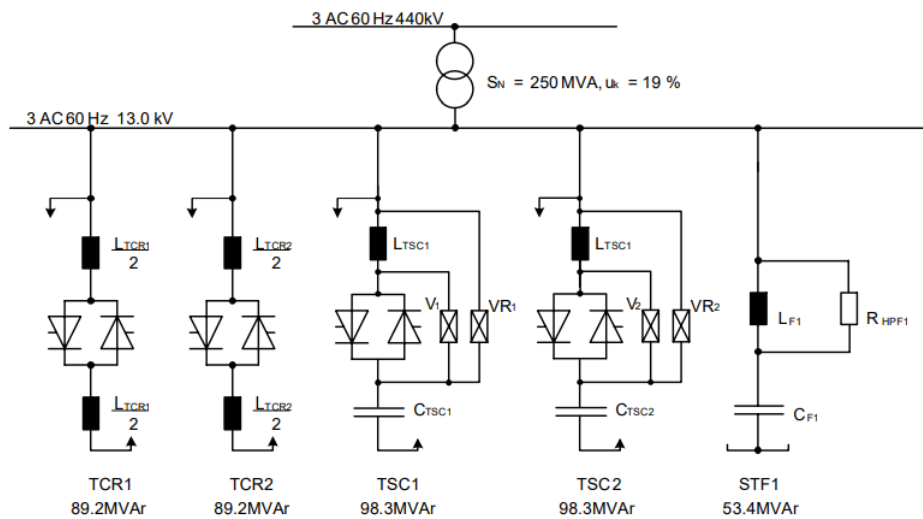
Fonte: (PADIYAR, 2007)

A grandezas de tensão e corrente são obtidas a partir dos transformadores de potencial e corrente localizados na alta do transformador do SVC, após essas aquisição essas grandezas são filtradas para remover qualquer distúrbio ou ressonância presente. Após feita as filtragens e a regulação de tensão é efetuada o calculo da susceptância e com isso o calculo no angulo de disparo dos tiristores, caso o SVC possua ramo de reator controlado o disparo é calculado utilizando o gráfico da Figura 13. Para o chaveamento do banco de capacitor pelo regulador de tensão se faz necessário a existência de um histerese respeitando os cuidados já apresentados.

3 Operação do SVC

Após evidenciado a forma como o *SVC* opera, pode-se partir para suas aplicações praticas e seu funcionamento diário. Para melhor exemplificar essas situações foi utilizado como referencia o *SVC* instalado numa subestação localizada em Bauru, esse *SVC* ele tem capacidade de -150MVar a $+250\text{MVar}$ e é construído com 2 Ramos TCR, 2 Ramos TSC e um Filtro Harmônico como pode ser observado na Figura16.

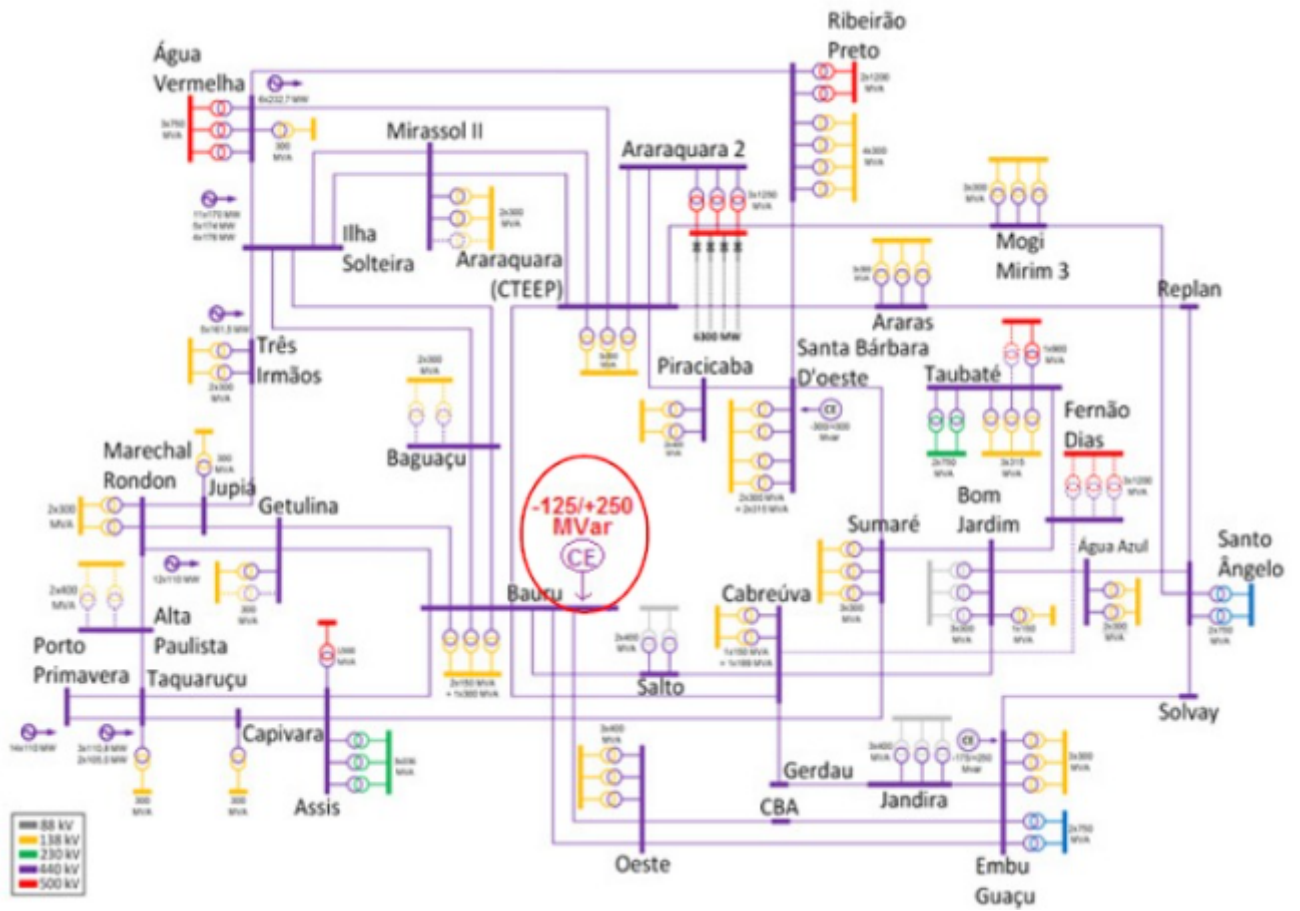
Figura 16 – Diagrama Unifilar *SVC*-Bauru



Fonte: Manual Siemens SVC-Bauru

Esse *SVC* foi instalado em Bauru devido a localização geoeletrica da subestação Bauru, pois a região é responsável por interligar regiões de geração com regiões de carga, como pode ser observado na Figura 17, evidenciado as ideias já expostas.

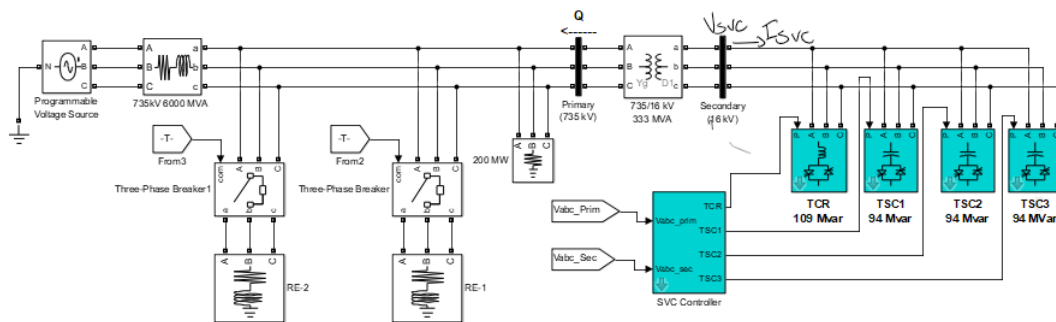
Figura 17 – Diagrama Unifilar Sistema Elétrico Bauru



Fonte: Manual Operativo SVC-Bauru

Devido a complexidade do SIN, manobras de regulação de tensão por parte da ONS e situações de perda de zonas de carga devido a desligamentos podem ocorrer situações em que o *SVC* opera próximo ao seu limite de reativo indutivo, podendo ocorrer o desligamento do equipamento devido a proteções associadas a sobre tensão (CLOSED...). Com a finalidade de mostrar o funcionamento do *SVC* no cotidiano foram realizadas simulações mostrando sua capacidade de regular a tensão do local de instalação a partir da injeção de reativo. As simulações foram realizadas a partir de um modelo pronto disponível no *MatLab*, que possui o mesmo método de controle que o já apresentado neste trabalho. O *SVC* possui capacidade de -100MVar a $+300\text{MVar}$ e é construído com 1 Ramo TCR e 3 Ramos TSC, como pode ser observado na Figura 18

Figura 18 – Simulação 1: Modelo do SVC utilizado para simulação



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1 Funcionamento dentro dos padrões especificados

Para mostrar o comportamento numa situação normal, primeiro devemos definir os valores a serem injetados de tensão para que o equipamento funcione dentro de suas especificações, tais valores estão expostos na Tabela 1.

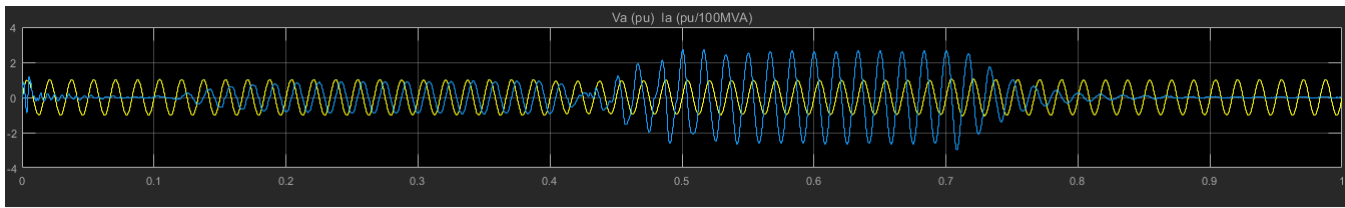
Tabela 1 – Tensão Injetada Simulação 1

| Tempo | Tensão (p.u.) |
|-------|---------------|
| 0 | 1 |
| 0.1 | 1.025 |
| 0.4 | 0.93 |
| 0.7 | 1 |

Fonte: Próprio Autor

Com os dados presentes na tabela é possível estudar o comportamento do *SVC* próximo ao seu limite operacional, os resultado dessa simulação se encontram abaixo.

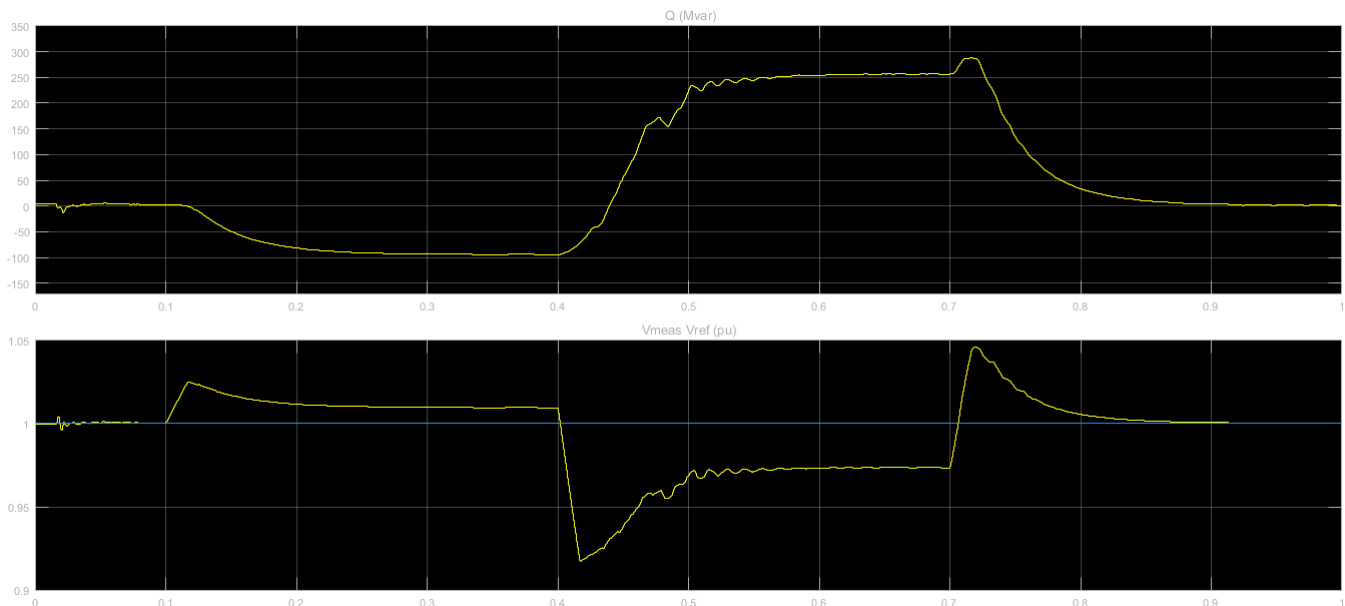
Figura 19 – Simulação 1: Operação de Tensão e Corrente dentro dos limites especificados



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 19 é possível entender o comportamento da tensão V_{SVC} , em amarelo e corrente I_{SVC} , em azul, para o funcionamento dentro dos valores especificados.

Figura 20 – Simulação 1: Operação da potência e tensão medida dentro dos limites especificados



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando o resultado obtido na Figura 20 podemos chegar a seguinte conclusões para essa situação:

- **No instante 0:** Como a tensão medida era a mesma da tensão de referencia não existe a necessidade de injeção de reativo por parte do *SVC*
- **No instante 0.1:** Com o aumento da tensão medida o *SVC* entende a necessidade de injeção de reativo indutivo, inserindo todo o banco de reator, para que assim a tensão medida caia e se aproxime da tensão de referência.
- **No instante 0.4** Com a redução da tensão medida o *SVC* passa a injetar reativo capacitivo no sistema, retirando o banco de reator e inserindo os dois bancos de

capacitores, resultando no aumento da tensão medida e se aproximando da tensão de referência.

- **No instante 0.7** Nesse instante a tensão injetada volta a ser unitária, porém devido a presença dos bancos de capacitores nesse pequeno intervalo de tempo a tensão medida sobe e logo apos os bancos de capacitores são deligados, resultando na normalização do sistema, onde a tensão medida volta a ficar próxima da tensão de referencia

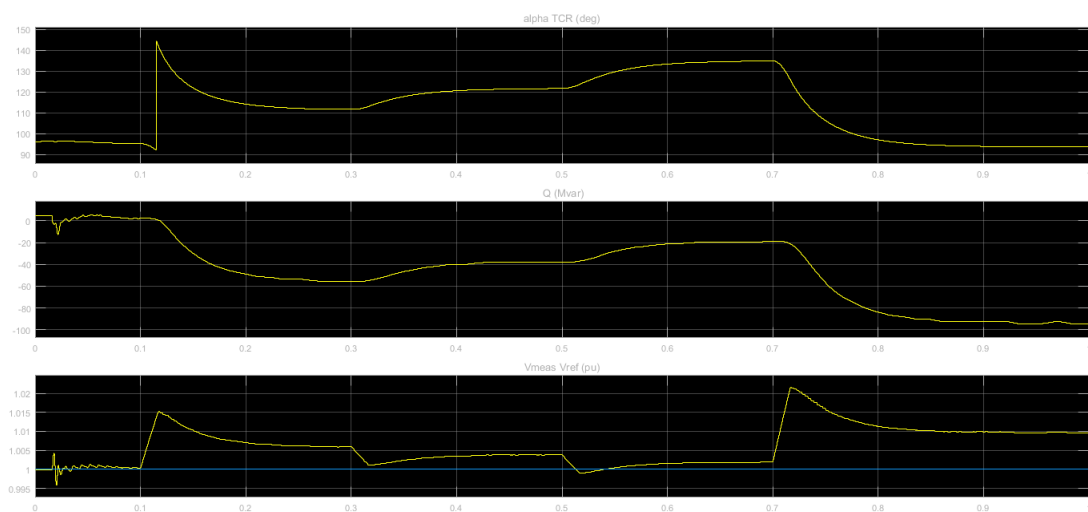
Agora realizando uma nova simulação para demonstrar o comportamento do ângulo de disparo do ramo TCR. Os dados utilizados para a simulação estão presentes na Tabela 2 e os resultados obtidos se encontram na Figura 21

Tabela 2 – Tensão Injetada Simulação 1.1

| Tempo | Tensão (PU) |
|-------|-------------|
| 0 | 1 |
| 0.1 | 1.015 |
| 0.3 | 1.01 |
| 0.5 | 1.005 |
| 0.7 | 1.025 |

Fonte: Próprio Autor

Figura 21 – Simulação 1: Influência do angulo de disparo



Fonte: Elaborado pelo autor

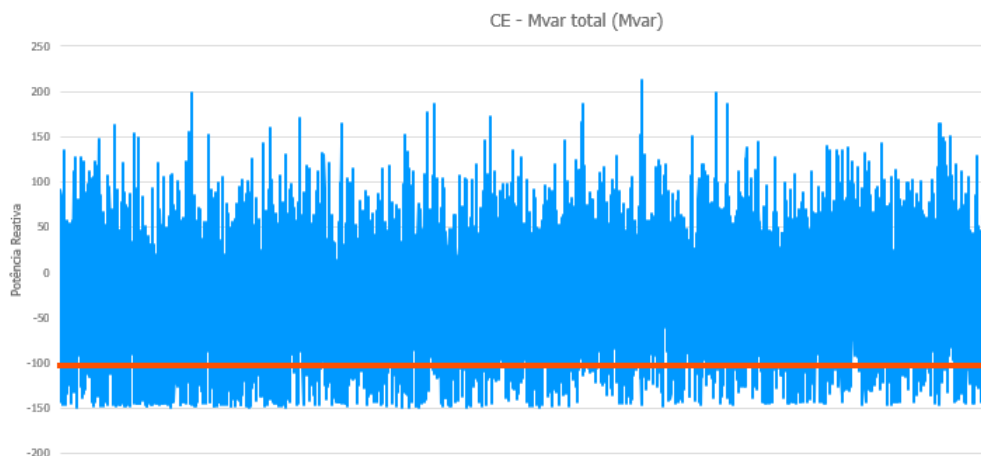
Como é possível observar na Figura 21 a potencia do *SVC* varia conforme o angulo de disparo, como demonstrado nas equações (7 e (8)) . Essa característica torna o *SVC*

capaz de lidar com velocidade a essas situações sistêmicas. Porém pode ocorrer ocorrer de *SVC* de operar próximo da sua faixa ideal devido a alguma necessidade do sistema, ocasionando um fragilidade na operação do equipamento.

3.2 Funcionamento fora dos padrões especificados

Conforme mostrado na Figura 17 o sistema elétrico da região é muito complexo e qualquer manobra de regulação de tensão realizada errada ou perda de uma zona pode ocasionar uma alteração na tensão, colocando o *SVC* para operar. Nesses momentos pode ocorrer do *SVC* não ter reativo, seja indutivo ou capacitivo, para lidar com essas situações. Na Figura 22 é possível observar o funcionamento do *SVC* - Bauru ao longo de 1 ano, os dados para a confecção desse gráfico foram obtidos numa plataforma de uma transmissora que possui um *SVC* instalado, os pontos foram obtidos com um intervalo de 30min.

Figura 22 – Perfil Potência Reativa *SVC* - Bauru



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando a Figura 22 é possível observar que o *SVC* - Bauru opera em vários momentos opera próximo de seu limite de reativo indutivo, nesses momentos o equipamento está suscetível a um desligamento devido a sobretensão, pois por mais que ele ainda tenha reativo indutivo caso ocorra alguma alteração que necessite de reativo indutivo ele não teria capacidade de suprir essa necessidade. Numa situação real ocorrida com o *SVC* - Bauru, ocorreu seu desligamento devido a uma função de sobretensão, devido a perda de uma zona de carga ocasionando o aumento da tensão do sistema, assim ultrapassando o limite da operação contínua.

Para exemplificar essa situação foi realizado uma simulação demonstrando uma situação onde o *SVC* passa a não conseguir regular a tensão devido a estar operando no seu

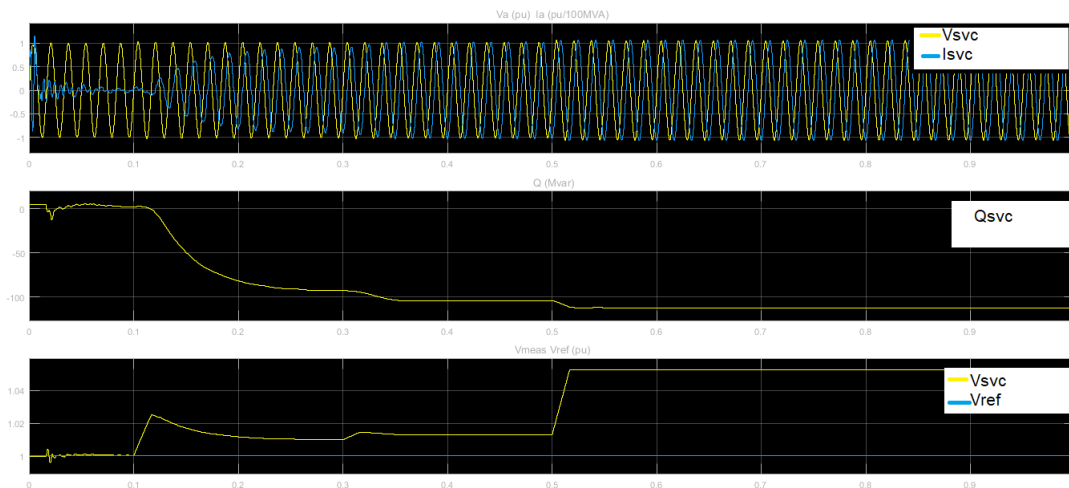
limite reativo. Para a simulação foram utilizado os seguintes valores de tensão que estão presente na Tabela(3) e o resultado obtido na simulação estão presentes na Figura 23

Tabela 3 – Tensão Injetada Simulação 2

| Tempo | Tensão (PU) |
|-------|-------------|
| 0 | 1 |
| 0.1 | 1.025 |
| 0.3 | 1.03 |
| 0.5 | 1.07 |

Fonte: Próprio Autor

Figura 23 – Tensão Injetada Simulação 2



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando a Figura 23 é possível observar que devido ao *SVC* estar operando no seu limite reativo, ele passa a não conseguir regular a tensão do sistema, isso numa situação real causaria danos ao equipamento caso ele não desligasse com a finalidade de auto-preservação (CLOSED...).

4 Controle Equipamentos Externos pelo *SVC*

Conforme demonstrado no capítulo anterior não são todas as situações em que o *SVC* consegue responder com eficiência, para solucionar esse problema é proposto que o *SVC* seja capaz de controlar equipamentos externos a ele de forma automatizada, reduzindo a necessidade de manobras por parte do agente para regulação de tensão e responsabilizando o *SVC* para o ajuste fino da tensão.

Para implementar essa solução são necessárias algumas definições:

- Esse tipo de controle deve ter como parâmetro de referência somente a potência do equipamento, pois é a grandeza controlada pelo *SVC*;
- Essa solução deve ficar fora da malha de controle do equipamento, pois esses equipamentos externos são chaveados mecanicamente, resultando num tempo de atuação muito maior e não sendo possível controlar o ângulo de disparo;

Feitas essas definições, podemos partir para encontrar essa solução. A primeira solução a ser testada é somente verificar se o valor da potência do *SVC*, $Q_{SVC} > Q_{Ref}$. Para testar essas propostas os valores de tensão a serem utilizados estão na Tabela(4), dessa maneira é possível comparar os resultados sob os mesmos padrões.

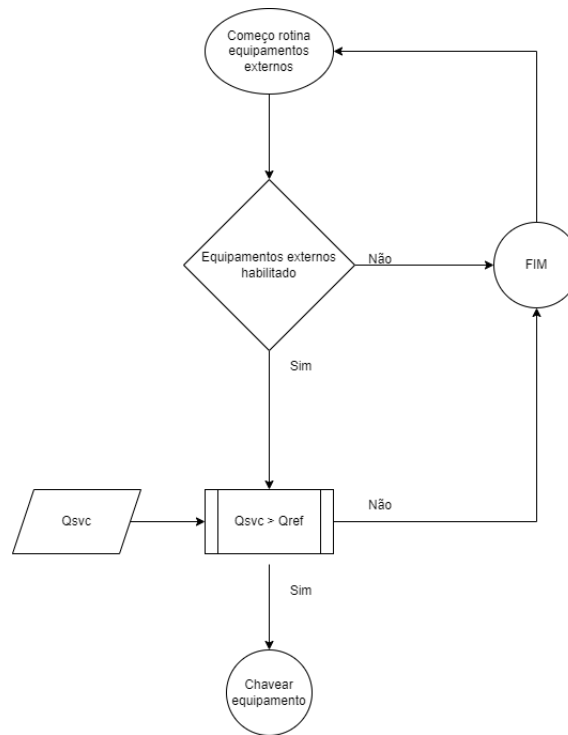
Tabela 4 – Padronização Tensão Injetada

| Tempo | Tensão (PU) |
|-------|-------------|
| 0 | 1 |
| 0.2 | 1.025 |
| 0.7 | 1 |

Fonte: Próprio Autor

Na Figura(24) está demonstrada essa solução em forma de fluxograma.

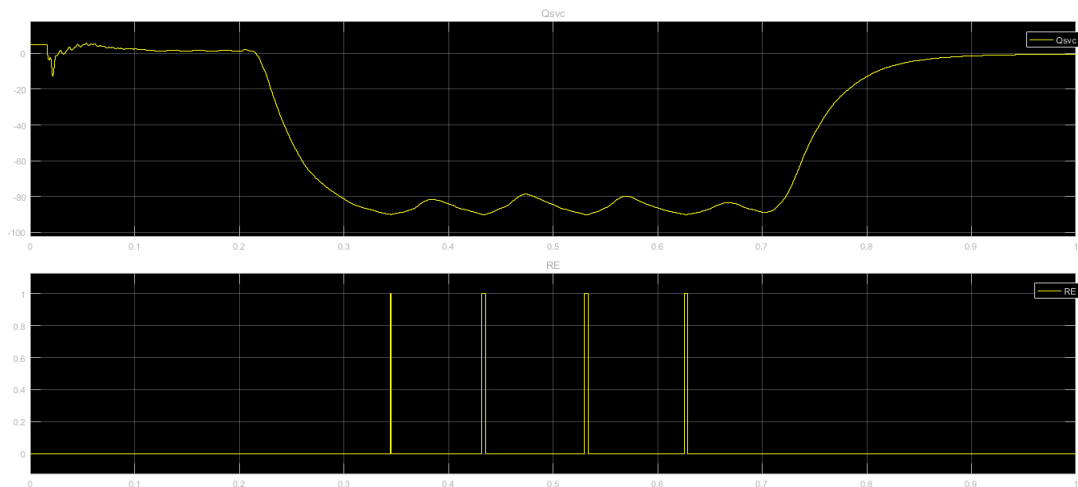
Figura 24 – Fluxograma solução 1



Fonte: Próprio Autor

A partir disso foi realizada uma simulação para testar essa solução utilizando apenas um banco de reator do tamanho de $Q_{RE} = 100MVar$ para fazer essa compensação, o resultado dessa simulação se encontra na Figura(25)

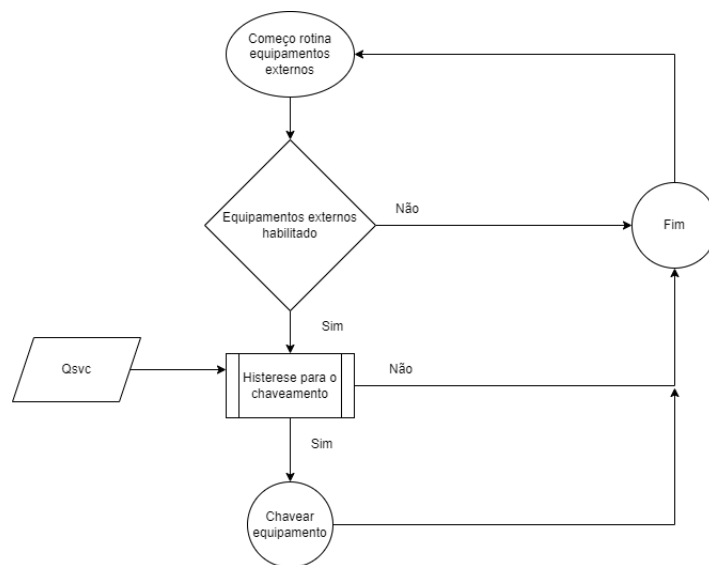
Figura 25 – Simulação Solução 1 - Chaveamento 1 Reator



Fonte: Próprio Autor

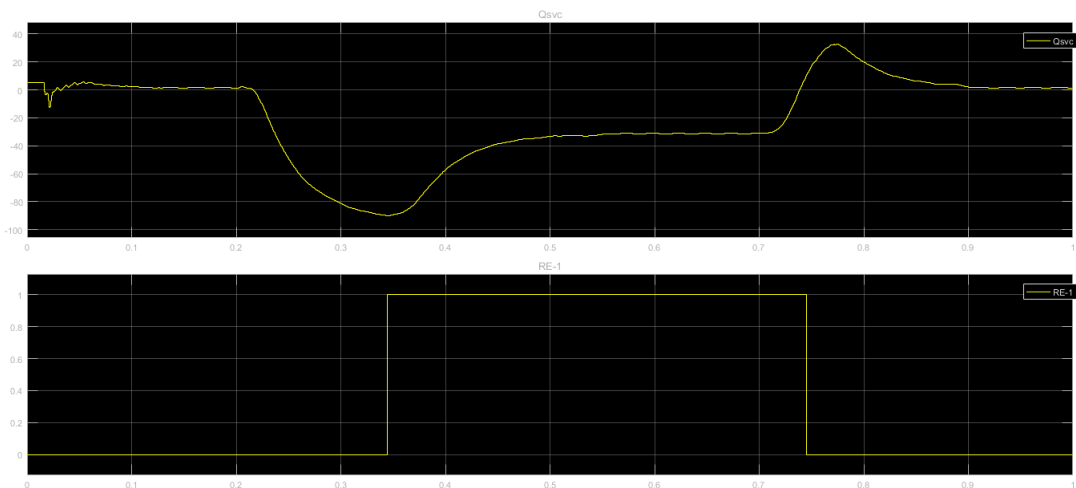
Como é possível observar a solução da forma que foi construída não atende, pois ao ultrapassar o valor o valor de referência a compensação é feita e a condição já não é mais válida, resultando na não compensação de reativo e no acionamento intermitente do banco de reator. Para solucionar esse problema se faz necessário uma histerese para o acionamento dos equipamentos externos a partir do controle externo. Dessa maneira a nova solução se encontra na Figura 26 e o resultado da simulação na Figura 27. Os valores para o chaveamento a partir da histerese são $On = -90MVar$ e $Off = 10MVar$.

Figura 26 – Fluxograma solução 2



Fonte: Próprio Autor

Figura 27 – Simulação solução 2



Fonte: Próprio Autor

Analisando o resultado obtido é possível observar que a solução atende ao problema, pois quando a potencia reativa indutiva supera o valor de referencia o reator é chaveado, com isso fazendo a compensação de reativo e reduzindo a potencia do *SVC* e no momento que a tensão volta a para os valores normais, ocorre um aumento da potência reativa capacitiva do *SVC* superando a referencia para desligar o reator, dessa maneira auxiliando no funcionamento ideal do equipamento.

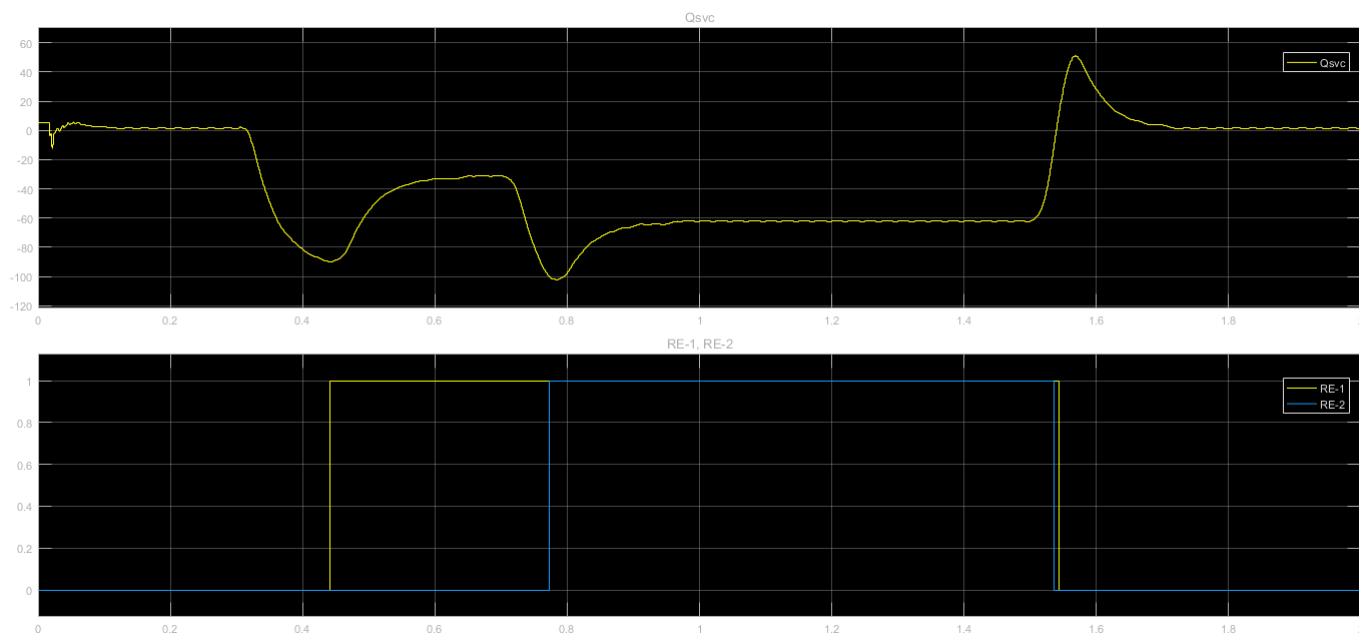
Com essa solução é possível escalonar a quantidade de equipamentos a serem controlado, se aproximando da situação existe nas subestações convencionais. Para testar a solução com dois equipamentos os valores de tensão a serem ajustados estão presentes na Tabela (5) e o resultado da simulação estão na Figura 29

Tabela 5 – Padronização Tensão Injetada para 2 Reatores

| Tempo | Tensão (PU) |
|-------|-------------|
| 0 | 1 |
| 0.2 | 1.025 |
| 0.7 | 1.05 |
| 1.5 | 1 |

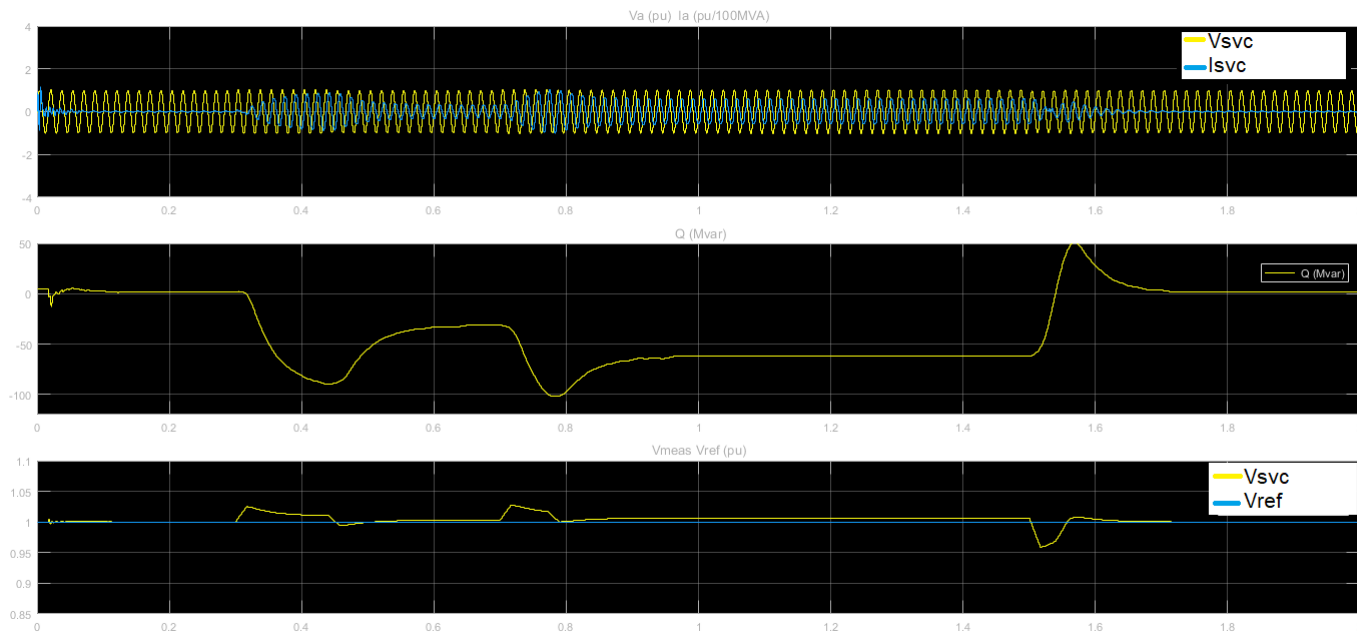
Fonte: Próprio Autor

Figura 28 – Simulação solução 2 para 2 Reatores - Potência



Fonte: Próprio Autor

Figura 29 – Simulação solução 2 para 2 Reatores - Tensão



Fonte: Próprio Autor

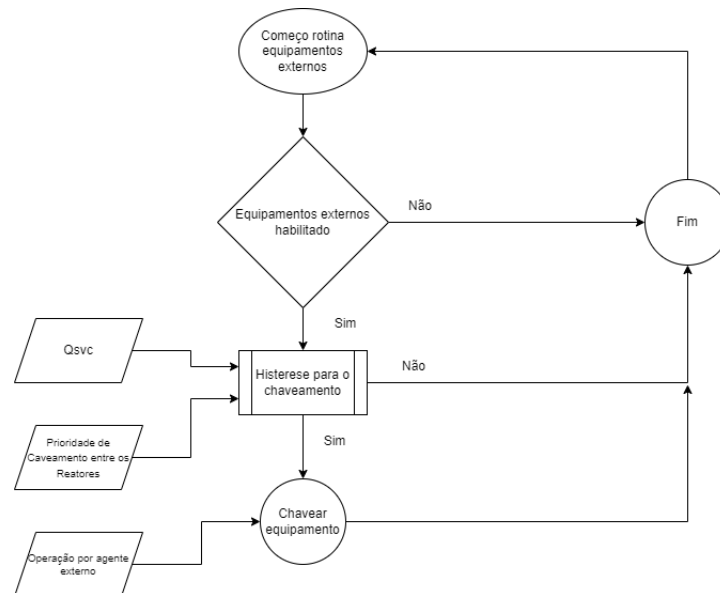
Analisando os resultados é possível observar que a presença de dois reatores auxiliou na compensação de reativo diante do aumento das tensão, possibilitando que o *SVC* ainda tivesse potência reativa para lidar com qualquer situação extraordinária que pudesse ocorrer e que mesmo com o aumento da tensão injetada o *SVC* conseguiu manter a tensão próximo da referência .

Tais resultados ajudam na construção de argumentos para a implementação desse tipo de tecnologia nos equipamentos que hoje estão sendo utilizados, porém é valido ressaltar que existem imposições operativas por parte da ONS para que esse tipo de solução passe a ser implementada, como:

- As manobras realizadas pelo *SVC* devem ser temporizadas, pois devido ao dinamismo do sistema ocorrem situações que atendem as condições imposta para o chaveamento, porém essas situações tem duração muito pequena e isso poderia causar o chaveamento indevido, reduzindo a vida util e aumentando o ciclo de manutenção do equipamento chaveado;
- A operação do equipamento externo pelo *SVC* não deve bloquear a operação manual dos mesmos equipamentos;
- As manobras dos equipamentos externos pelo *SVC* devem respeitar os tempos de religamento do sistema numa situação de perturbação;

Dessa maneira a solução geral que atende ao problema proposto e as condições por parte do operador é:

Figura 30 – Fluxograma Solução Geral



Fonte: Próprio Autor

Porém devido a complexidade do SIN no Brasil esses dispositivos ainda encontram situações que não são ideais, fugindo dos seus limites projetados e podendo causar perdas financeiras e danos materiais aos equipamentos. A Figura 22 mostra o perfil da potência reativa do *SVC* instalado na subestação Bauru ao longo de 1 ano, evidenciando que durante boa parte do ano ele opera muito próximo de seu limite de reativo indutivo, o deixando vulnerável a uma perturbação em que ocorram perdas de cargas e assim podendo causar seu desligamento.

O controle de equipamentos externos pelo *SVC* tem como objetivo dar a capacidade ao equipamento de operar outros equipamentos da instalação, permitindo assim que o *SVC* fique responsável pelo ajuste fino da tensão na localidade. Como é possível observar na Figura 27 a manobra do reator proporcionou uma compensação de reativo indutivo do *SVC* aumentando sua faixa operacional numa situação que ele normalmente seria capaz de lidar. Já nas Figuras 28 e 29 o *SVC* com a capacidade de operar dois reatores conseguiu lidar com o aumento da tensão para $V = 1.05 pu$, tensão que foge da sua capacidade de operação, mantendo a tensão próxima da referência e ainda tinha reativo disponível para lidar com qualquer outra perturbação.

5 Conclusões

Devido a crescente demanda energética do país e a busca por soluções financeiramente viáveis os dispositivos *FACTS* vem ganhando espaço nas redes de transmissão e distribuição no Brasil, pois eles possuem a capacidade de aumentar a capacidade de transmissão de energia de uma região como pode ser observado na Figura(5) sem que haja a necessidade de construção de novas linhas de transmissão ou centros de geração de energia.

Portanto é possível concluir que o *SVC* com a capacidade de operar equipamentos externos oferece uma ganho operacional muito grande, pois ele consegue fazer o ajuste fino da tensão utilizando os equipamentos a ele para a o ajuste grosso. Além de proporcionar um ganho financeiro pois não é necessário a implementação de um equipamento com uma capacidade de potência elevada, o que acarretaria em um maior custo de produção e implementação. O trabalho também proporciona o inicio de um processo de automação na regulação de tensão em subestações, agilizando essas manobras, diminuindo o tempo de execução além de abrir espaço para novos estudos fundamentados na prática do funcionamentos desses controladores.

Referências

- ALMEIDA, F. A. F. d. **Compensadores estáticos de reativos empregados em redes de baixa tensão com geradores distribuídos de energia**. Bauru: Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia, 2016.
- CLOSED Loop Control Description SVC-Bauru, Siemens. [S.l.].
- DIXON, J. Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 93, n. 12, p. 2144–2164, 2005.
- ELGHAFAR, A. N. A. Multi-shunt var compensation svc and statcom for enhance the power system quality. **Journal of Electrical Engineering**, v. 19, n. 1, p. 12–12, 2019.
- GLANZMANN, G. **FACTS: flexible alternating current transmission systems**. [S.l.], 2006.
- HINGORANI, N. G. **Understanding facts**. [S.l.]: John Wiley Sons, 2000.
- HOUARI, B. Modelling and simulation of static var compensator with matlab. v. 1, p. 7, 2007.
- LOKHANDE, S. Introduction to fc-tbcr based svc for voltage regulation and reactive power compensation. In: IEEE. **2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)**. [S.l.], 2016. p. 1–5.
- MALI, M. P. B. Improving the voltage stability and performance of facts controller in transmission line network. **International Journal of Advanced Engineering Reseach and science (IJAERS)**, v. 4, n. 1, 2016.
- MILLER, T. J. E. **Power electronic control in electrical systems**. [S.l.]: Newnes, 2002.
- NAGESH, H. Power flow model of static var compensator and enhancement of voltage stability. **International Journal of Advances in Engineering & Technology**, IAET Publishing Company, v. 3, n. 2, p. 499, 2012.
- NARAIN, A. An overview of facts devices used for reactive power compensation techniques. v. 2, p. 3, 2015.
- PADIYAR, K. **Facts controllers in power transmission and distribution**. New Delhi: New Age International, 2007. Disponível em: <<https://cds.cern.ch/record-/1607980>>.
- SONG, Y.-H. **Flexible ac transmission systems (FACTS)**. [S.l.]: IET, 1999.