

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RODOLFO PILAR LONDERO

**ANÁLISE DO TRANSFORMADOR DE ESTADO SÓLIDO EM
SUBSTITUIÇÃO AO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL DE
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA PARA A CONEXÃO DE
SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Alegrete

2019

RODOLFO PILAR LONDERO

**ANÁLISE DO TRANSFORMADOR DE ESTADO SÓLIDO EM
SUBSTITUIÇÃO AO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL DE
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA PARA A CONEXÃO DE
SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Sebastião da Silva

Alegrete

2019

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

L847a Londero, Rodolfo Pilar

Análise do transformador de estado sólido em substituição
ao transformador convencional de redes de distribuição de
energia para a conexão de sistemas de geração distribuída /
Rodolfo Pilar Londero.

73 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2019.

"Orientação: Guilherme Sebastião da Silva".

1. Qualidade de Energia. 2. Smart Grids. 3. SST. 4.
Transformador Convencional de Distribuição. 5. Transformador
de Estado Sólido. I. Título.

RODOLFO PILAR LONDERO

ANÁLISE DO TRANSFORMADOR DE ESTADO SÓLIDO EM SUBSTITUIÇÃO AO TRANSFORMADOR CONVENCIONAL DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA PARA A CONEXÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

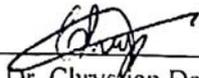
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

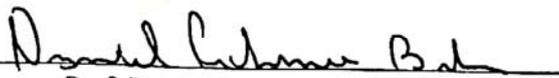
Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 24 de junho de 2019.

Banca examinadora:


Prof. Dr. Guilherme Sebastião da Silva
Orientador


Prof. Dr. Chrystian Dalla Lana da Silva
UNIPAMPA


Prof. Dr. Daniel Pinheiro Bernardon
UFSM

Dedico este trabalho aos meus pais, Simone e Vilnei, que são minha fonte de inspiração.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Simone e Vilnei, e meu irmão Guilherme, que sempre estiveram ao meu lado, me incentivando e apoiando em todos os momentos com todo amor e carinho, e por me ensinarem tudo o que sou hoje.

Agradeço, imensamente, aos meus amigos, Daniela Maia Bueno, Diego Brum Chaves, Eduarda Lazzeri Kottwitz e Luiza Saydelles de Moraes, pela amizade, apoio e incentivo, além das longas horas de estudos e pelos vários momentos de descontração. Sou profundamente grato por tê-los ao meu lado nessa jornada.

À professora Ana Paula Carboni de Mello e ao professor Guilherme Sebastião da Silva, por serem meus orientadores, contribuindo e apoiando para a realização deste trabalho.

Ao professor Fernando Guilherme Kaehler Guarda, pela dedicação e disposição em sempre ajudar quando precisei, além de ter contribuído ativamente para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores que fizeram parte dessa caminhada, pelos ensinamentos e conselhos contribuindo para a minha formação pessoal e acadêmica.

Por fim, agradeço à Deus, pela vida e por sempre estar comigo nessa caminhada dando forças para superar todos os desafios.

*“Na plenitude da felicidade, cada dia é uma vida inteira.
(Johann Goethe)*

Resumo

Tendo em vista a crescente inserção de geração distribuída no sistema elétrico de potência, novas tecnologias são necessárias para garantir a qualidade da energia elétrica. O conceito de Redes Elétricas Inteligentes (do inglês, *Smart Grids*) se destaca por visar a melhora da qualidade da energia através da integração de fontes de geração distribuídas e sistemas de controle capazes de se comunicarem entre si. Como ferramenta para viabilizar as *Smart Grids*, vem sendo estudado o Transformador de Estado Sólido (do inglês, *Solid-State Transformer – SST*), equipamento capaz de desempenhar as mesmas funções do transformador de distribuição convencional, e diversos serviços ancilares capazes de melhorar a qualidade da energia. Primeiramente, esse trabalho traz uma revisão bibliográfica a fim de apresentar as características de cada transformador, bem como apresentar alguns trabalhos realizados com SSTs nas redes de distribuição de energia elétrica. Ademais, é proposta uma metodologia para viabilizar os testes necessários para realizar a substituição dos transformadores convencionais por SSTs. Para tal, é apresentada uma modelagem para implementar o SST no OpenDSS[®], bem como a elaboração do Controle Volt/VAR para controlar a potência reativa dos SSTs. Além disso, será realizada a análise do efeito da substituição dos transformadores convencionais pelos SSTs e, também, a verificação da viabilidade do aumento de conexões de carga levando-se em conta a capacidade de controle de reativos.

Palavras-chave: Qualidade de Energia, Smart Grids, SST, Transformador Convencional de Distribuição, Transformador de Estado Sólido

Abstract

Due to increasing insertion of distributed generation in the electric power system, new technologies are necessary to guarantee the quality of electric energy. The concept of Smart Grids stands out because it provides an improvement by integrating distributed generation and control systems capable of communicating with each other. As a tool to make Smart Grids viable, the Solid State Transformer (SST) has been studied, capable to perform the same functions as the conventional distribution transformer (LFT – Low Frequency Transformer), as well as several auxiliary services that allow the required levels of quality to be achieved. Therefore, this work presents a review in order to present the characteristics of each transformer, as well as to present some works realized with SSTs in the distribution networks of electric energy. In addition, a methodology is proposed to enable the necessary tests to perform the replacement of conventional transformers by SSTs. For this, a modeling is presented to implement the SST in the OpenDSS[®], as well as the elaboration of the Control Volt/VAr to control the reactive power of the SSTs. In addition, the analysis of the effect of the substitution of conventional transformers by the SSTs will be carried out, as well as the feasibility verification of the increase of load connections taking into account the reactive control capacity.

Keywords: Power Quality, Smart Grids, SST, Conventional Distribution Transformer, Solid State Transformer

Lista de ilustrações

Figura 1 – LFT tradicional em Y- Δ	25
Figura 2 – Estrutura básica de um SST.	27
Figura 3 – SST integrado à rede de distribuição de energia elétrica.	29
Figura 4 – Plano PQ	34
Figura 5 – Modelagem do SST no OpenDSS [®] . (a) Forma de conexão do SST com FV. (b) Modelo do SST operando como carga. (c) Modelo do SST operando como gerador	36
Figura 6 – Fluxograma da metodologia	37
Figura 7 – Sistema exemplo. (a) Sistema utilizando um transformador convencional na carga. (b) Sistema utilizando um SST na carga. (c) Sistema utilizando SST e FV.	42
Figura 8 – Curva de carga residencial	42
Figura 9 – Sistema de 13 barras da IEEE modificado.	44
Figura 10 – Tensão na carga. (a) Baixa tensão. (b) Média tensão.	47
Figura 11 – Subestação. (a) Potência ativa. (b) Potência reativa.	48
Figura 12 – Fator de Potência	49
Figura 13 – Tensão na carga. (a) Baixa tensão. (b) Média tensão.	50
Figura 14 – Subestação. (a) Potência ativa. (b) Potência reativa.	51
Figura 15 – Fator de Potência	52
Figura 16 – Tensão na carga. (a) Baixa tensão. (b) Média tensão.	53
Figura 17 – Subestação. (a) Potência ativa. (b) Potência reativa.	54
Figura 18 – Fator de Potência	55
Figura 19 – Tensão em BT na carga 634	55
Figura 20 – Tensão em BT na carga 645	56
Figura 21 – Tensão em BT na carga 671	56
Figura 22 – Tensão em MT na carga 634 (Fase A)	57
Figura 23 – Tensão em MT na carga 634 (Fase B)	57
Figura 24 – Tensão em MT na carga 634 (Fase C)	58
Figura 25 – Tensão em MT na carga 645	58
Figura 26 – Tensão em MT na carga 671 (Fase A)	59
Figura 27 – Tensão em MT na carga 671 (Fase B)	59
Figura 28 – Tensão em MT na carga 671 (Fase C)	60
Figura 29 – Potência reativa do SST 634	60
Figura 30 – Potência reativa do SST 671	61
Figura 31 – Potência reativa do SST 671	61
Figura 32 – Potência ativa do SST 634	62

Figura 33 – Potência ativa do SST 645	62
Figura 34 – Potência ativa do SST 671	63
Figura 35 – Potência reativa da subestação (Fase A)	63
Figura 36 – Potência reativa da subestação (Fase B)	64
Figura 37 – Potência reativa da subestação (Fase C)	64
Figura 38 – Fator de potência da subestação (Fase A)	65
Figura 39 – Fator de potência da subestação (Fase B)	65
Figura 40 – Fator de potência da subestação (Fase C)	66

Lista de tabelas

Tabela 1 – Funcionalidades do SST na rede de distribuição de energia elétrica. . .	30
Tabela 2 – Dados das configurações das linhas	44
Tabela 5 – Dados dos capacitores	44
Tabela 3 – Dados das linhas	45
Tabela 4 – Dados das cargas	45
Tabela 6 – Dados do regulador de tensão	46
Tabela 7 – Dados dos transformadores	46
Tabela 8 – Resumo dos testes	66
Tabela 9 – Resumo do teste 4	66

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Motivação e Justificativa	22
1.2	Objetivos	23
1.2.1	Objetivo Geral	23
1.2.2	Objetivos Específicos	23
1.3	Organização do Trabalho	23
2	TRANSFORMADOR DE ESTADO SÓLIDO	25
2.1	O Transformador de Distribuição Convencional	25
2.1.1	Desvantagens dos LFTs	26
2.2	O Transformador de Estado Sólido	26
2.2.1	Vantagens e desvantagens do SST	28
2.2.2	SST aplicado à rede de distribuição	28
3	METODOLOGIA	33
3.1	Formulação do problema	33
3.2	Modelagem do Plano PQ	33
3.3	Modelagem do SST no OpenDSS®	35
3.4	Arquitetura	36
4	RESULTADOS	41
4.1	Cenários de testes	41
4.1.1	Sistema Genérico	41
4.1.2	Sistema de 13 Barras da IEEE	43
4.2	Teste 1	46
4.2.1	Tensão na carga	46
4.2.2	Potência na subestação	48
4.2.3	Fator de potência da subestação	48
4.3	Teste 2	49
4.3.1	Tensão na carga	49
4.3.2	Potência na subestação	50
4.3.3	Fator de potência da subestação	51
4.4	Teste 3	52
4.4.1	Tensão na carga	52
4.4.2	Potência na subestação	53
4.4.3	Fator de potência da subestação	54

4.5	Teste 4	55
4.5.1	Tensões nas cargas em BT	55
4.5.2	Tensões nas cargas em MT	56
4.5.3	Potência Reativa dos SSTs	60
4.5.4	Potência Ativa dos SSTs	61
4.5.5	Potências da subestação	62
4.5.6	Fator de potência da subestação	64
4.6	Resumo dos testes	66
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
5.1	Conclusões	67
5.2	Trabalhos publicados	68
5.3	Propostas de trabalhos futuros	68
	REFERÊNCIAS	69

1 Introdução

A complexidade do sistema elétrico de potência (SEP) vem crescendo continuamente devido ao aumento do uso das energias renováveis e geração distribuída (GD), ocasionando a necessidade de um sistema de distribuição com fluxo de potência bidirecional, controle distribuído e com capacidade de gerenciamento, monitoramento e auto-recuperação (RODRIGUES et al., 2016). A partir desse cenário, foi cunhado o termo “Redes Elétricas Inteligentes” (REIs, em inglês *Smart Grids*), a qual visa mitigar ou evitar as consequências oriundas de eventos relacionados a qualidade da energia (como afundamentos de tensão), melhorar a confiabilidade (reduzindo o número e duração de interrupções) e aumentar a eficiência, utilizando novas tecnologias e equipamentos (GUERRA; MARTINEZ-VELASCO, 2017).

As *Smart Grids*, além de sanarem diversos problemas relacionados a qualidade de energia, buscam integrar diferentes tipos de fontes de energia de forma descentralizada, incorporar sensores e controles automatizados a fim de detectar interrupções mais facilmente, isolar áreas afetadas através de dispositivos telecomandados, redirecionar o fluxo de energia e manter a maior quantidade de consumidores atendidos (GODOI, 2018).

Para que isso possa ser implementado, há a necessidade da utilização de equipamentos inteligentes que possam se comunicar e serem controlados remotamente. Uma das soluções que vem sendo estudada é o transformador de estado sólido (em inglês *Solid State Transformer – SST*), o qual é capaz de desempenhar as mesmas funções do transformador de distribuição convencional, além de realizar uma série de serviços ancilares capaz de melhorar a qualidade da energia e permitir a conexão entre equipamentos de corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA).

O conceito dos SSTs surgiu na década de 1980 como uma alternativa aos transformadores convencionais (BROOKS, 1980). Desde então, diversos esforços têm sido realizados a fim de produzir protótipos de SSTs de potência e para baixa tensão (KOLAR; ORTIZ, 2015; PITEL, 1999). Entretanto, o desenvolvimento desse equipamento ainda está limitado a capacidade de sintetização de potência e tensão dos dispositivos semicondutores, bem como a disponibilidade de topologias de circuitos (HUANG; BURGOS, 2013).

Entre as principais funcionalidades dos SSTs tem-se a regulação dos níveis de tensão e correção do fator de potência. Segundo Shah e Crow (2016), a habilidade de regular a tensão no lado da carga é a característica chave do SST. A existência de um retificador ativo permite que o SST realize uma compensação ativa no ponto de conexão com o alimentador, contribuindo, assim, com o suporte de potência reativa para a regulação de tensão. Como o terminal primário do SST (lado do alimentador) é um retificador ativo,

a energia fornecida pela rede é constante, independente da carga conectada no terminal secundário (Bottrell; Prodanovic; Green, 2013). Em relação à regulação de tensão, o SST possui a capacidade de regular a tensão na carga para 1.0 p.u, mesmo que a tensão da rede seja muito maior ou menor. Além disso, o SST é capaz de sintetizar qualquer fator de potência desejado, respeitando seus limites operacionais. Dessa forma, ele é capaz de operar com fator de potência unitário, ou com o fator de potência necessário para reduzir as perdas nas linhas conforme necessário (SHAH; CROW, 2016).

1.1 Motivação e Justificativa

Os transformadores de distribuição convencionais são equipamentos bem consolidados em diferentes níveis de tensão do sistema elétrico de potência, onde são capazes de alterar os níveis de tensão e fornecer isolamento galvânica. Por operarem em frequências de 50/60 Hz, estes equipamentos apresentam elevadas dimensões. Entretanto, apesar de ser um equipamento robusto e confiável, sua natureza passiva faz com que apresente problemas em relação à perturbações no sistema elétrico e dificuldades de ser controlado.

Um dos principais pontos para a implementação das *Smart Grids* é que os equipamentos tenham a capacidade de se comunicarem entre si e que possam ser controlados de forma automática. Logo, o transformador convencional não atende estes requisitos por si só, sendo necessário o desenvolvimento de novas tecnologias para garantir a implementação das *Smart Grids*. Uma dessas tecnologias é o transformador de estado sólido, que vem sendo desenvolvido e aprimorado com o intuito de substituir os transformadores convencionais e, assim, melhorar a qualidade da energia.

Com isso, este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica a fim de destacar as vantagens e desvantagens dos SSTs em relação aos transformadores convencionais de distribuição, bem como apresentar as principais funcionalidades deste novo equipamento aplicado à rede elétrica de distribuição, respeitando limites operacionais de potência conforme o plano PQ.

Além disso, propõe-se analisar os efeitos da substituição parcial dos transformadores de distribuição convencionais por SSTs, bem como a possibilidade de aumento das conexões de carga nas redes de distribuição em função de suas vantagens com a compensação de energia reativa, atuando no controle de tensão e potência reativa (controle volt/var).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o impacto da substituição parcial dos transformadores de distribuição convencionais por transformadores de estado sólido, a fim de verificar a possibilidade de aumento das conexões de carga nas redes de distribuição em função de suas vantagens com a compensação de energia reativa

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar as vantagens e desvantagens dos SSTs na rede de distribuição;
- Avaliar os níveis de tensão e fator de potência no alimentador;
- Avaliar os benefícios da substituição dos transformadores convencionais;
- Avaliar cenários distintos através da integração Python e OpenDSS®.

1.3 Organização do Trabalho

Este documento está organizado em 5 capítulos.

No Capítulo 1 é apresentada uma visão geral sobre a evolução das redes elétrica, justificando a busca de novas tecnologias para implantação das *Smart Grids* e destacando a importância da utilização dos SSTs em substituição aos transformadores de distribuição convencionais.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica dos transformadores de distribuição convencionais, dos SSTs e sobre como estes podem ser aplicados à rede elétrica de distribuição, além de trabalhos que avaliam as funcionalidades do SST.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia proposta, incluindo a modelagem do SST, as restrições a serem consideradas, e o fluxo de execução do algoritmo de controle proposto.

No Capítulo 4 são apresentados cenários de testes genéricos utilizados para validar a modelagem do SST, bem como o cenário de teste envolvendo o sistema de 13 barras da IEEE de forma a verificar o comportamento do SST em um sistema real. Além disso, serão apresentados os resultados obtidos em cada cenário.

O Capítulo 5, por fim, apresenta algumas considerações finais sobre a proposta, bem como as propostas para trabalhos futuros.

2 Transformador de Estado Sólido

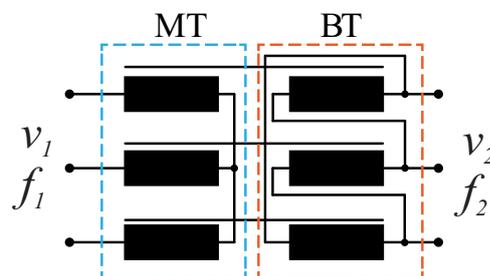
Neste capítulo é realizada uma breve abordagem sobre os transformadores de distribuição convencionais e sobre os transformadores de estado sólido. Serão apresentadas suas características e suas vantagens/desvantagens no cenário atual, e em relação às *Smart Grids*. Além disso, é apresentado como o SST pode ser aplicado à rede de distribuição de energia elétrica agregando cargas e fontes de geração distribuída. Por fim, são destacados alguns trabalhos que abordam as principais funcionalidades dos SSTs.

2.1 O Transformador de Distribuição Convencional

Os transformadores de distribuição convencionais, também conhecidos como Transformadores de Baixa Frequência (em inglês, *Low Frequency Transformer – LFT*), são dispositivos estáticos que possuem dois ou mais enrolamentos magneticamente acoplados, cuja transferência de potência ocorre de um enrolamento para o outro, geralmente em diferentes níveis de tensões e correntes (WOLF, 2009). Sua função é reduzir a tensão primária (média tensão), para uma tensão secundária (baixa tensão), sendo geralmente fabricados com três ou mais derivações (*taps*) (MADRUGA, 2011; PEREIRA, 2009).

A Figura 1 ilustra o esquemático de um LFT tradicional em Y- Δ . Esses transformadores operam na tensão da rede com frequência de 50/60 Hz, onde o valores de v_1 e v_2 são fixos, e as frequências de entrada (f_1) e saída (f_2) são iguais.

Figura 1 – LFT tradicional em Y- Δ



Fonte: Kolar e Ortiz (2015)

Esse dispositivo é considerado como o mais confiável e mais eficiente, sendo um dos elementos mais importantes do sistema elétrico de potência. Eles são construídos de forma a operar em sobrecarga por longos períodos de tempo, apresentando uma vida útil de aproximadamente 40 anos. Quando bem projetados, estes equipamentos podem atingir rendimentos de 98,5% a 99,5%. Além disso, possui capacidade de limitação das correntes

de curto-circuito e apresentam um custo relativamente baixo, quando comparado ao SST. (WOLF, 2009; DIAS, 2013; KOLAR; ORTIZ, 2015; REGO, 2015).

2.1.1 Desvantagens dos LFTs

Apesar dos LFTs desempenharem um papel fundamental no sistema de distribuição de energia elétrica atual, realizando funções como transformação de tensão, isolamento galvânica, desacoplamento de ruídos, entre outras, esse tipo de transformador não atende às necessidades das *Smart Grids*. Por se tratar de um elemento passivo, não permite o controle e a regulação de tensão, o controle local do fluxo de potência ativa e reativa, interação com cargas CC e rejeição de distúrbios ou anomalias oriundas do circuito primário (distorções harmônicas, variações de tensão, etc), para que não se propaguem ao circuito secundário (RODRIGUES et al., 2016).

Kolar e Ortiz (2015) e Wolf (2009) destacam as seguintes desvantagens desse equipamento:

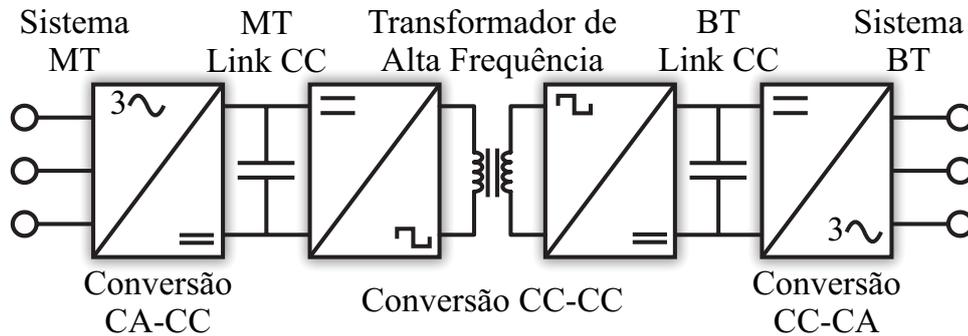
- Não tem capacidade de regulação de tensão;
- Apresentam altas correntes de *inrush*;
- Tem grande queda de tensão sob carga;
- É sensível à harmônicos;
- Pode apresentar saturação do núcleo;
- Óleo utilizado é visto como prejudicial a meio ambiente;
- Apresenta elevadas dimensões e volume;
- Apresentam perdas sem carga.

Além disso, conforme Mello (2018), apesar deste equipamento dispor de comutação entre seus enrolamentos, ele não possui comutação sob carga, sendo necessário desligar o transformador e mover equipes de manutenção para modificá-los.

2.2 O Transformador de Estado Sólido

O transformador de estado sólido (em inglês, *Solid-State Transformer* – SST) é um equipamento eletrônico composto por conversores dividido em 3 partes: um estágio de Média Tensão (MT), um estágio de isolamento através de um transformador de alta frequência e um estágio de Baixa Tensão (BT). A Figura 2 ilustra a estrutura básica de um SST.

Figura 2 – Estrutura básica de um SST.



Fonte: Rodrigues et al. (2016).

O conversor conectado à rede de MT converte as tensões CA da frequência de alimentação trifásica (50/60 Hz) para uma tensão CC, para então ser convertida novamente para CA, entretanto com uma elevada frequência. Devido à elevada frequência em CA, as propriedades magnéticas do núcleo do transformador de alta frequência são melhor utilizadas e o transformador pode ser consideravelmente menor, mantendo a mesma capacidade de potência. Após passar pelo transformador de alta frequência, a tensão CA é convertida para CC, para então ser convertida para CA com uma frequência de 50/60 Hz (GUERRA; MARTINEZ-VELASCO, 2017).

Na rede de BT, o SST controla a forma de onda da tensão, ou seja, independente da corrente de carga solicitada, o SST consegue entregar uma forma de onda senoidal de tensão com frequência e amplitude nominais. Com isso, este equipamento é capaz de fornecer os seguintes serviços auxiliares: identificação e controle de carga, redução de carga suave (*soft load*), limitação do fluxo de potência reverso e controle de sobrecarga (COSTA et al., 2017).

Como visto na Figura 2, o SST apresenta dois estágios CC, que permitem a criação de redes CC locais. No link CC em MT, é possível conectar novas cargas, como estações de carregamento rápido de veículos elétricos e geração distribuída, como usinas fotovoltaicas e eólicas, além de sistemas de armazenamento de energia. Já com o link CC em BT, pode-se conectar diretamente as cargas CC da rede de BT, dispensando a utilização de algum estágio de conversão intermediário (COSTA et al., 2017).

Na rede de MT, o SST controla a corrente, mantendo a tensão no barramento CC de MT com tensão nominal constante. A potência reativa é controlada separadamente da potência ativa, garantindo assim um grau de liberdade para a realização dos controles. Com isso, o SST é capaz de injetar potência reativa para controlar a tensão, tanto em regime permanente (controlando o perfil de tensão na rede), quanto durante transitórios. Além disso, fazendo uso de um sistema de comunicação, o SST pode corrigir o fator de potência da subestação, reduzindo o consumo de potência reativa (COSTA et al., 2017).

2.2.1 Vantagens e desvantagens do SST

Além de dispor de todas as funcionalidades do transformador convencional, os principais benefícios do SST são (DIAS, 2013; REGO, 2015; LIU et al., 2016; HUBER; KOLAR, 2016; GUERRA; MARTINEZ-VELASCO, 2017):

- Menor tamanho e volume;
- Permite fluxo bidirecional;
- Compensação de potência reativa;
- Protege a carga contra:
 - Sobretensões;
 - Afundamentos de tensão;
 - Variações de frequência;
 - Harmônicos;
- Regulação de tensão;
- Conectividade CC;
- Redução das correntes de curto-circuito.

Apesar dos grandes benefícios de se utilizar os SSTs, estes apresentam desvantagens ainda não superadas no cenário atual. Os SSTs apresentam os seguintes contras (HUBER; KOLAR, 2017):

- São menos eficientes que os LFTs ($\approx 90\%$);
- Possuem custos elevados (5x mais caro que os LFTs);
- Não são compatíveis com os esquemas de proteção atuais;
- São menos robustos.

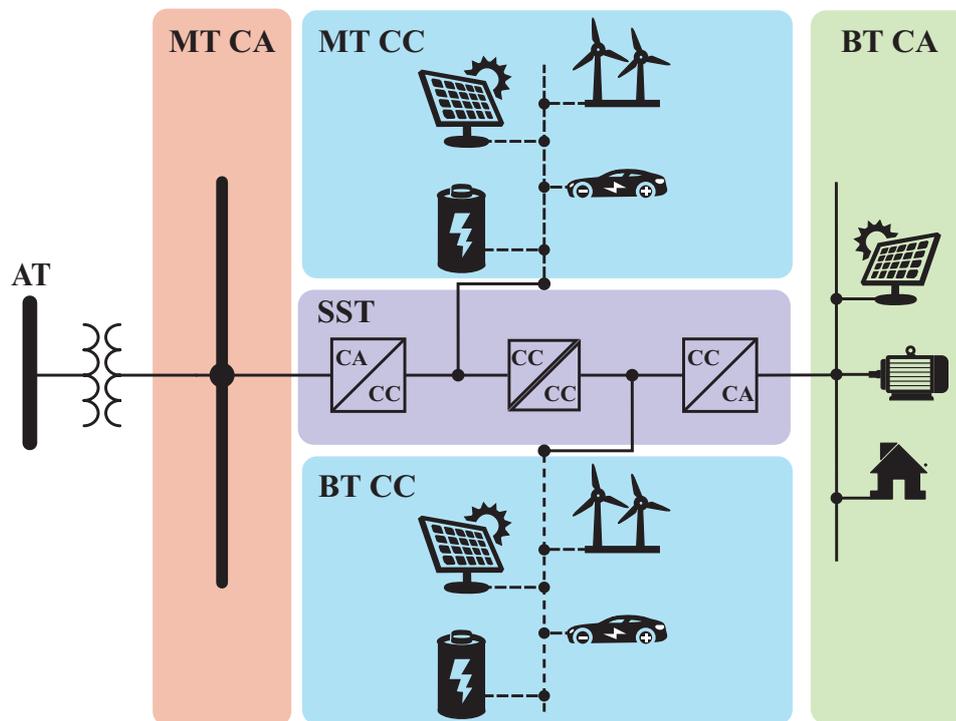
2.2.2 SST aplicado à rede de distribuição

O SST tem a proposta de atender a demanda das *Smart Grids*. A Figura 3 ilustra a aplicação do SST na rede de distribuição, onde o mesmo é capaz de substituir o transformador de distribuição convencional na conexão de cargas CA de baixa tensão, e ainda permite a integração de GD diretamente conectadas ao seu barramento CC.

Diversos estudos têm sido realizados a fim de comprovar as vantagens do SST em substituição aos transformadores convencionais. A Tabela 1 apresenta alguns trabalhos já realizados que buscam analisar as principais funcionalidades dos SSTs.

Uma série de investigações é analisada por Huang e Burgos (2013), a fim de comprovar algumas funcionalidades do SST como controle de tensão, compensação de potência reativa e mitigação de harmônicos na média tensão, bem como a correção do

Figura 3 – SST integrado à rede de distribuição de energia elétrica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

fator de potência na baixa tensão. Além disso, as funcionalidades citadas também são abordadas por Rodrigues et al. (2016), entretanto são realizados diversos cenários com diferentes resultados quanto a mitigação de harmônicos, rejeição de distúrbios de curta duração, correção de fator de potência, compensação de reativos e fluxo bidirecional.

Outro ponto que o SST se destaca é na integração de GD, sistemas de armazenamento e veículos elétricos. Uma forma de carregamento de veículos elétricos integrado aos SST e estações de carregamento fotovoltaicas é apresentada por Chen et al. (2017), onde o SST permite um maior controle do processo de carga. Kumar et al. (2018) apresentam o SST como uma forma de otimizar a integração de sistemas de armazenamento de energia com a rede de distribuição, avaliando sua performance em relação ao sistema convencional. Já Huang e Burgos (2013) e Liu et al. (2016), analisam o SST integrado a sistemas fotovoltaicos.

Carne et al. (2015), Carne et al. (2018a) e Carne et al. (2018b) analisam as funcionalidades do SST na baixa tensão, como a redução de carga suave, que permite a redução do consumo de potência ativa, quando necessário, sem desconectar a carga da rede. Esses autores abordam, também, o controle do fluxo reverso e de sobrecarga devido à grande quantidade de GD conectadas em baixa tensão. Além disso, Carne, Liserre e Vournas (2017) analisam a aplicação do SST quanto a identificação de carga através do controle da tensão e da frequência.

Tabela 1 – Funcionalidades do SST na rede de distribuição de energia elétrica.

Nível de Tensão	Referências	Funcionalidade investigada
Média Tensão (CA)	(HUANG; BURGOS, 2013) (RODRIGUES et al., 2016)	Controle de Tensão
		Compensação de Potência Reativa
		Mitigação de Harmônicos
		Rejeição de distúrbios de curta duração
Média Tensão (CC)	(CHEN et al., 2017)	Integração de Estações de Carregamento de Veículos Elétricos
Baixa Tensão (CC) ^e	(KUMAR et al., 2018)	Integração de Sistemas de armazenamento
	(HUANG; BURGOS, 2013; LIU et al., 2016)	Integração de GD
Baixa Tensão (CA)	(CARNE; LISERRE; VOURNAS, 2017)	Identificação de Carga
	(HUANG; BURGOS, 2013)	Correção do fator de potência
	(CARNE et al., 2015)	Controle de Sobrecarga
	(CARNE et al., 2018a)	Redução de carga suave
	(CARNE et al., 2018b)	Controle de fluxo reverso

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os estudos realizados (Tabela 1) mostram o importante papel que os SSTs podem ter no conceito de *Smart Grids*. Eles comprovam as principais vantagens deste equipamento, demonstrando seu impacto positivo em relação a qualidade da energia e a integração de GD, veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia. Entretanto, apesar das várias vantagens que este equipamento possui, sua implementação ainda é difícil, uma vez que ele não é compatível com os sistemas de proteção atuais, possui um custo maior que os transformadores convencionais, além de serem, ainda, um pouco menos eficientes (HUBER; KOLAR, 2017).

Apesar de os SSTs possuírem diversos recursos, os que se destacam são: controle de tensão e potência reativa, integração de GD e correção de fator de potência.

• Controle de tensão e potência reativa

O Controle Volt/VAr (do inglês Volt/VAr Control – VVC) é uma técnica de controle de tensão e potência reativa, que tem sido desenvolvida desde a década de 80 com o intuito de manter a tensão em níveis adequados em todos os pontos da rede de distribuição (MELLO, 2018; EICHKOFF, 2018).

O VVC utilizando SSTs foi proposto inicialmente por Shen e Baran (2013), com o objetivo de minimizar as perdas no sistema, bem como reforçando os níveis de tensão ao longo do alimentador. Além disso, a proposta de Shen e Baran (2013) é uma abordagem centralizada, assumindo que todos os SSTs participam do VVC, sendo necessário que

todos os equipamentos estejam em comunicação para fornecer os valores de tensão ao controlador central.

Em contrapartida, Shah e Crow (2016) propõem um VVC local, sem a necessidade de utilizar um controlador central para a computação dos dados e sem aplicar a cada um dos SSTs. Dessa forma, o controle é aplicado a um subconjunto de SSTs específicos, liberando os demais SSTs para desempenhar outras funções.

Rashidi, Bani-Ahmed e Nasiri (2017) também implementam o VVC utilizando SST para manter a tensão dentro de limites padrões (0,95 p.u e 1,05 p.u). Para controlar a potência reativa é utilizado um SST em uma das barras do sistema. O sistema é monitorado em tempo real para verificar os níveis de tensão em todo o alimentador. Dessa forma, se qualquer barra sofrer variação de tensão, seja por uma falta ou por variações de carga, a potência reativa é calculada de acordo com a menor tensão detectada.

• Integração de geração distribuída

Conforme Mello (2018), com o advento das *Smart Grids* e os avanços tecnológicos relacionados à comunicação e automação dos equipamentos, o VVC pode permitir a implementação de novos desafios tais como: aumento de conexão de GD de pequeno e médio porte, armazenamento de energia, conexão de veículos elétricos e controle dos equipamentos com maior inteligência.

Atualmente, a disseminação de GD na rede de distribuição também é capaz de proporcionar ajustes de tensão com base na inserção de potência reativa através da utilização de inversores de frequência, equipamento que faz a conexão da fonte geradora com a rede elétrica (MELLO, 2018).

Quanto a integração de GD, She et al. (2012) faz um estudo da integração de uma microrrede CC, destacando que a redução de estágio de conversão que o SST proporciona, uma vez que os elementos CC podem ser conectados diretamente ao SST, bem como a análise do SST quando a microrrede opera (i) somente com painéis fotovoltaicos, (ii) painéis fotovoltaicos e baterias, (iii) iluminação.

Um estudo realizado por Kumar et al. (2018), mostra as vantagens de utilizar o SST atrelado a sistemas de armazenamento de energia. Nesse ponto, o SST contribui de forma significativa na eficiência dos processos de carga e descarga das baterias, eliminação do transformador convencional, eliminação da necessidade de utilizar um conversor CA-CC para conectar o sistema de baterias, aumento da capacidade de compensação de potência reativa e operação contínua durante afundamentos de tensão.

- **Correção de fator de potência**

Conforme Fuchs e Masoum (2011), um baixo fator de potência provoca: redução da eficiência do sistema elétrico; redução da capacidade da transmissão, das subestações e dos sistemas de distribuição; regulação de tensão ruim e aumento nas perdas do sistema. Em contrapartida, muitas concessionárias incentivam os consumidores a melhorar os níveis de fator de potência, bem como penalizam aqueles que não atendem os requisitos. Há diversas formas de melhorar o fator de potência como através do uso de:

- Compensadores síncronos, que são utilizados em sistemas de transmissão a fim de realizar uma compensação de potência reativa contínua;
- Bancos de capacitores conectados em paralelo;
- Compensadores estáticos e conversores de potência baseados em compensação de potência reativa, que controlam o fator de potência através da defasagem angular entre corrente e tensão, variando entre capacitivo e indutivo.

O SST permite realizar a correção ativa do fator de potência da rede devido a presença do retificador ativo, sendo possível controlar o ângulo de fase entre a corrente e a tensão drenada da rede (DIAS, 2013).

Rodrigues et al. (2016) demonstram, também, a correção do fator de potência, ilustrando a defasagem entre tensão e corrente, justificando a dispensa do uso de bancos de capacitores para realizar essa correção.

3 Metodologia

Este capítulo apresenta a estratégia proposta para implementar a substituição dos LFTs por SSTs em redes de distribuição de energia elétrica. A formulação do problema destaca a necessidade de se implementar os SSTs em substituição aos LFTs, no contexto das *Smart Grids*, a fim de comprovar seus benefícios. Para tal, será descrito como é feita a modelagem do SST, definindo os limites de potência aparente que o SST é capaz de operar, bem como sua modelagem no OpenDSS[®]. Além disso, será apresentado como será implementado o VVC para controlar a potência reativa injetada/absorvida pelo SST na rede e, ainda, os cenários de testes que serão considerados para a obtenção dos resultados.

3.1 Formulação do problema

Muitos estudos tem sido realizados com os SSTs, avaliando e propondo topologias internas de forma à otimizar e melhorar as capacidades desse elemento. Entretanto, para fins de aplicação em sistemas elétricos de potência, ainda há uma carência de modelos que representem o seu comportamento quando submetido a diversas situações em redes reais, tais como: variações de carga, inclusão de GD, ajuste de fator de potência e regulação de tensão. Havendo um modelo que permita avaliar todos os recursos dos SSTs, como regulação de tensão, controle de potência reativa e fator de potência, pode-se avaliar o seu processo de inclusão nas redes elétricas atuais através da substituição dos transformadores convencionais. Além disso, por se tratar de uma tecnologia recente, ainda não há normas regulamentadoras específicas para este equipamento, ou seja, não há alguma restrição quanto a sua operação quando aplicado à rede de energia elétrica.

3.2 Modelagem do Plano PQ

A modelagem proposta tem como base trabalhos de Lamb e Mirafzal (2016) e Lamb e Mirafzal (2017) que investigam os limites de operação de conversores CC-CA conectados à rede. Com isso, o SST é representado como um circuito equivalente de um conversor CA-CA, onde a potência aparente injetada ou absorvida na rede elétrica, após os terminais do filtro do inversor, é dada pela Equação 3.1.

$$S_r = |S|e^{-j\theta r} \quad (3.1)$$

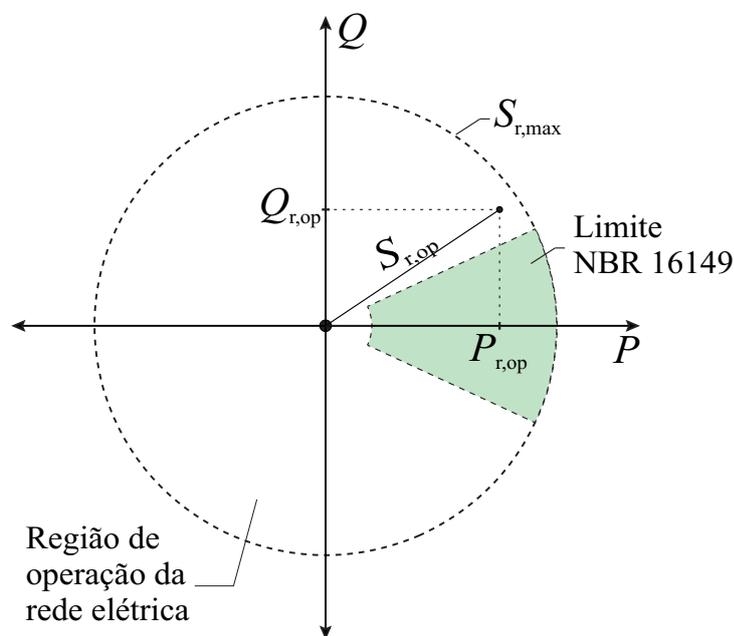
onde S é a potência aparente injetada na rede elétrica (VA) e θr : é o ângulo do fator de potência da rede.

Com isso, é possível definir os limites de injeção de potência ativa e reativa na rede elétrica, sem considerar limitações impostas por normas, e estabelecer um plano PQ a fim de representar todos os pontos de operação do SST. Além disso, pode-se definir quadrantes de operação, os quais definem o comportamento do SST na rede, ou seja, dependendo do ponto de operação, este pode atuar consumindo (carga) ou injetando (gerador) potência ativa, bem como ser capaz de operar com característica indutiva (diminuindo a tensão) ou com característica capacitiva (aumentando a tensão). Dessa forma, é possível controlar a potência fornecida/consumida pelo SST, com o propósito de regular os níveis de tensão e corrigir o fator de potência no ponto de instalação.

Para sistemas fotovoltaicos, a NBR 16149-2014 impõe limites de potência aparente injetada na rede elétrica de forma a garantir um fator de potência de 0,9. Devido ao SST ser um equipamento relativamente novo, ainda não há normas regulamentadoras para a conexão deste equipamento à rede. Dessa forma, os limites da NBR 16149 serão considerados, de modo que o SST só poderá injetar potência reativa quando a potência ativa injetada for pelo menos 20% da potência ativa nominal.

A Figura 4 ilustra o plano PQ de operação, bem como os limites impostos pela NBR 16149.

Figura 4 – Plano PQ



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, as seguintes restrições devem ser consideradas para a Equação 3.1:

$$|Q_r| > \theta_{\text{NBR}} = \text{acos}(0,9) = 0,451 \text{ rad} \quad (3.2)$$

$$|Q_r| > 0 \text{ quando } P_r > 0, 2P_{\text{nom}} \quad (3.3)$$

onde P_r é potência ativa injetada na rede elétrica (VA), Q_r é a potência reativa injetada na rede elétrica (VA) e P_{nom} é a potência ativa nominal do SST.

3.3 Modelagem do SST no OpenDSS®

A modelagem do SST, é baseada no modelo proposto por Guerra e Martinez-Velasco (2017), onde o SST é modelado como um elemento de dois terminais. Dessa forma, o lado de BT fornece potência ativa e reativa para as cargas em BT enquanto mantém a tensão em um valor constante no seu terminal secundário (1 p.u). Já no lado de MT, o SST absorve apenas potência ativa. Como esta pode circular nas duas direções do SST, este pode ser configurado em dois modos de operação, (i) Modo Carga e (ii) Modo Geração, ilustrados na Figura 5b e Figura 5c, respectivamente.

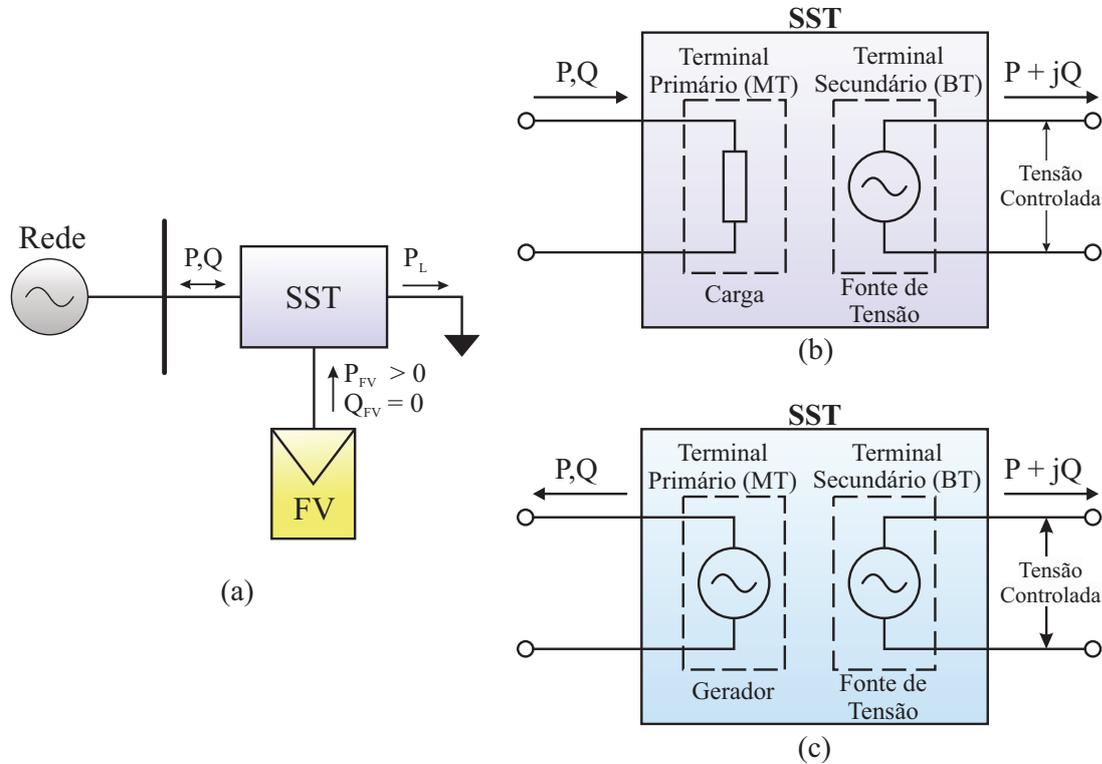
A Figura 5 mostra como o SST é modelado no OpenDSS®. Uma vez que o SST permite a conexão de GD, o modelo deve contemplar esta funcionalidade, logo a Figura 5a apresenta o fluxo de potência através do SST considerando a conexão de um painel fotovoltaico (FV). O FV irá fornecer apenas potência ativa de acordo com as curvas de irradiância e temperatura. O fluxo de potência entre a rede e o SST é determinado com base na potência gerada pelo FV (P_{FV}) e pela demanda da carga (P_L).

Quando o SST estiver operando no Modo Carga, ele será modelado como uma fonte de tensão em BT e uma carga de modelo PQ em MT. A fonte de tensão fornece toda potência ativa e reativa solicitada pelas cargas em BT e mantém a tensão constante. A carga replica o comportamento do SST visto no lado MT, ou seja, a potência ativa demandada pela carga em MT será igual a potência ativa fornecida pela fonte em BT mais as perdas do SST.

Se $P_{FV} > P_L$, ou seja, se a potência ativa produzida pelo FV for maior do que demanda da carga, o excedente será injetado na rede (Modo Geração), já se $P_{FV} < P_L$ o SST precisa drenar a potência ativa que falta para suprir a carga (Modo Carga).

Já quando estiver operando no Modo Geração, o SST será modelado como uma fonte de tensão em BT e um gerador em MT, com potência ativa fixa. Dessa forma, o fluxo de potência inverte-se, passando a injetar potência na rede MT, sendo a potência ativa fornecida pelo lado BT menos as perdas do SST.

Figura 5 – Modelagem do SST no OpenDSS®. (a) Forma de conexão do SST com FV. (b) Modelo do SST operando como carga. (c) Modelo do SST operando como gerador



Fonte: Elaborado pelo autor.

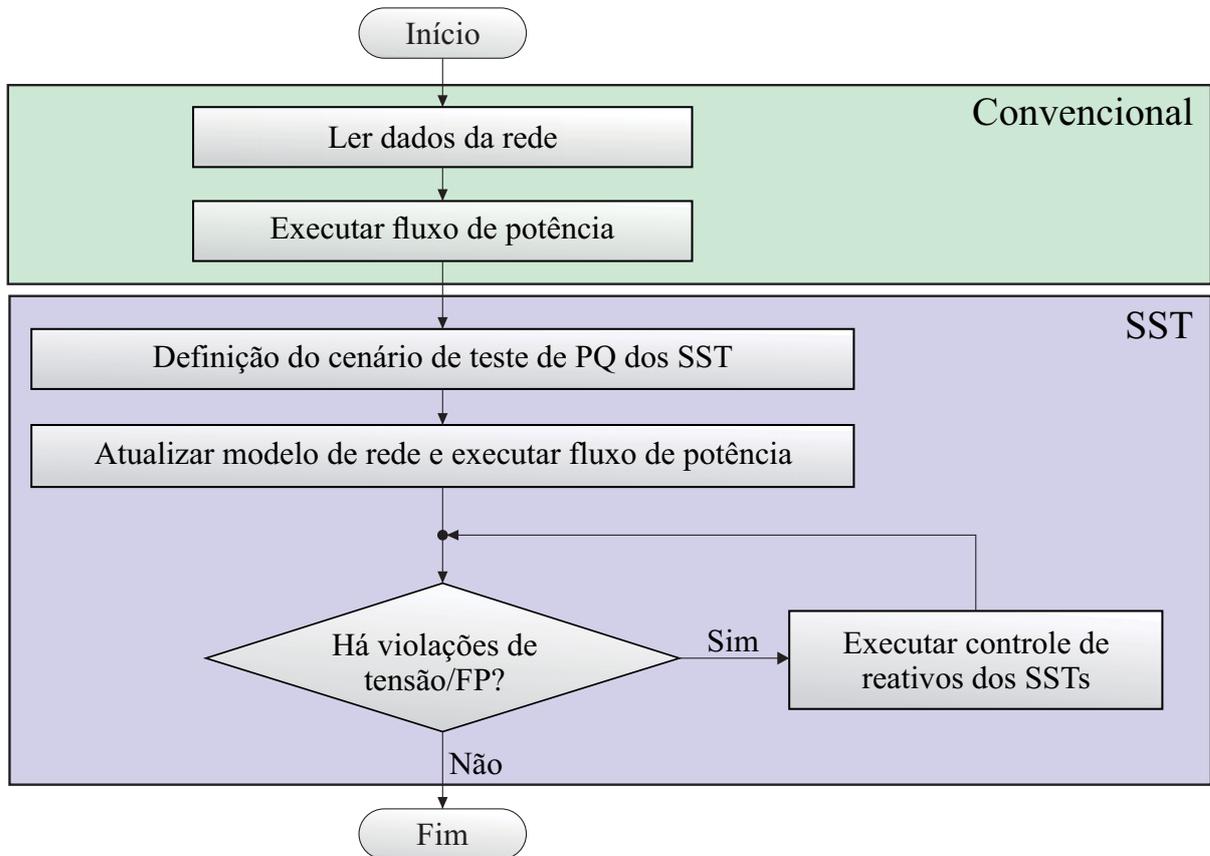
3.4 Arquitetura

A Figura 6 apresenta o fluxograma da arquitetura proposta utilizado para definir o comportamento da simulação e determinar como o controle irá atuar para corrigir violações de tensão e fator de potência.

- **Leitura dos dados da rede e fluxo de potência**

A primeira etapa do processo consiste em selecionar e obter os dados iniciais do sistema desejado. Os dados iniciais referem-se às informações originais de potência, tensão e fator de potência sem a utilização de SSTs. Essas informações são utilizadas para realizar a comparação do impacto causado com a inserção dos SSTs.

Figura 6 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Definição dos cenários de testes e atualização do modelo de rede**

Logo após, define-se os pontos em que os SSTs serão utilizados, bem como a definição de potência aparente máxima que estes devem respeitar. Atualiza-se o modelo da rede e inicia-se o processo de execução do fluxo de potência em minutos ou horas.

- **Verificação de violações e controle de reativos**

A cada minuto ou hora, verifica-se se ocorre violação de tensão nas barras em MT, onde os SSTs estão conectadas, bem como o fator de potência na subestação.

Uma vez identificada uma violação, aciona-se o controle volt/var com o intuito de definir a potência reativa necessária que os SSTs deverão injetar/absorver para corrigir os níveis de tensão e fator de potência. O controle de potência reativa é ajustado através da Equação 3.4.

$$Q_{SST} = Q_{SST} \pm \Delta Q \quad (3.4)$$

onde, Q_{SST} é a potência reativa atual do SST e ΔQ é um passo de incremento fixo.

O Algoritmo 1 apresenta o pseudocódigo que representa a forma que o fluxo de potência e o controle são executados. A cada iteração obtém-se os dados de tensão em MT, potência ativa e reativa dos SSTs, e da subestação. Havendo violação de tensão na barra ($0,93 \text{ p.u.} > V > 1,05 \text{ p.u.}$) ou de fator de potência ($FP < 0.92$) da subestação, acionam-se os respectivos controles, onde o controle do fator de potência é priorizado para reduzir as perdas da subestação.

Algoritmo 1 Laço de execução em minuto

```

1: para minuto  $\leftarrow$  1 até 1440 faça
2:    $V \leftarrow$  Tensão do primário do SST
3:    $P \leftarrow$  Potência ativa do SST
4:    $Q \leftarrow$  Potência reativa do SST
5:    $FP \leftarrow$  CalculaFP(P,Q)
6:   se Há violação de tensão na barra do SST então
7:     Executa o controle de tensão (Algoritmo 2)
8:   fim se
9:   se Há violação de fator de potência na subestação então
10:    Executa o controle do fator de potência (Algoritmo 3)
11:  fim se
12: fim para

```

O ajuste da tensão é realizado conforme descrito no Algoritmo 2. Caso a tensão esteja abaixo de 0,93 p.u, decrementa-se ΔQ da potência reativa do SST local e calcula-se a potência aparente em p.u. Se a potência aparente for maior que 1 p.u, o SST excedeu o seu limite, não sendo possível injetar mais potência reativa, caso contrário atualiza-se a potência reativa do SST e executa-se o fluxo de potência daquele instante.

Da mesma forma, realiza-se o ajuste quando a tensão excede o valor de 1,05 p.u. Nesse caso, realiza-se o incremento de potência reativa com o mesmo ΔQ . Após a ação dos dois controles (tensão mínima e tensão máxima), verifica-se se ambas foram solucionadas. Persistindo as violações, repete-se o algoritmo até que a violação seja eliminada ou até que os SSTs atinjam sua capacidade máxima.

O ajuste de fator de potência é descrito pelo Algoritmo 3. Para realizar o ajuste, verifica-se o comportamento da potência reativa da subestação. Se essa potência é negativa, significa que a subestação estará injetando reativos no sistema, logo deve-se fazer com que o SST injete reativos para reduzir o quanto a subestação está fornecendo, dessa forma decrementa-se ΔQ da potência reativa do SST. Caso contrário, a subestação estaria absorvendo reativos, logo deve-se aumentar a potência demandada pelos SST, incrementando ΔQ .

Algoritmo 2 Controle da tensão

```

1: enquanto Há violação de tensão faça
2:   se  $0,93 > V > 0$  então
3:     enquanto ( $V < 0.93$ ) e (SST não saturar) faça
4:       Decrementa o Q do SST
5:       Calcula o S do SST
6:       se  $S < 1$  p.u então
7:         Atribui o Q ao SST
8:         Executa o fluxo de potência
9:          $V \leftarrow$  Tensão do primário do SST
10:      fim se
11:    fim enquanto
12:  fim se
13:  se ( $V > 1.05$ ) e ( $V > 0$ ) então
14:    enquanto ( $V > 1.05$ ) e (SST não saturar) faça
15:      Incrementa o Q do SST
16:      Calcula o S do SST
17:      se  $S < 1$  p.u então
18:        Atribui o Q ao SST
19:        Executa o fluxo de potência
20:         $V \leftarrow$  Tensão do primário do SST
21:      fim se
22:    fim enquanto
23:  fim se
24: fim enquanto

```

Algoritmo 3 Controle do fator de potência

```

1: enquanto ( $FP < 0.92$ ) e (SST não saturar) faça
2:   se  $Q_{sub} < 0$  então
3:     Incrementa Q do SST
4:   senão
5:     Decrementa Q do SST
6:   fim se
7:   Calcula o S do SST
8:   se  $S < 1$  p.u então
9:     Atribui o Q ao SST
10:    Executa o fluxo de potência
11:     $P \leftarrow$  Potência ativa do SST
12:     $Q \leftarrow$  Potência reativa do SST
13:     $FP \leftarrow$  CalculaFP(P,Q)
14:  fim se
15: fim enquanto

```

4 Resultados

4.1 Cenários de testes

A fim de demonstrar a funcionalidade do SST, foram utilizados dois sistemas radiais, sendo um deles genérico, composto por apenas uma carga, e o outro sendo o sistema de 13 barras fornecido pela IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Todas as simulações foram desenvolvidas utilizando o software OpenDSS® integrado com a linguagem de programação Python, sendo realizadas num período de 24 horas com o passo de 1 minuto, totalizando 1440 minutos.

4.1.1 Sistema Genérico

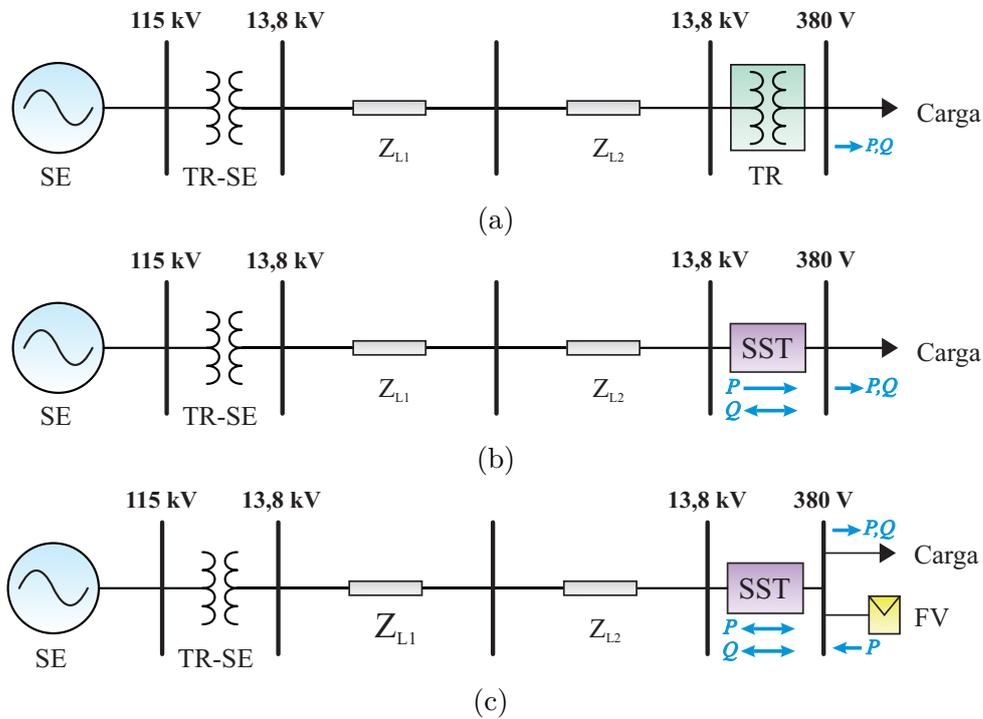
O sistema genérico utilizado é composto por uma subestação que opera em 115 kV, um transformador rebaixador (115/13,8 kV, Δ - Δ , 1000 kVA), duas linhas utilizando condutor "2_CA", com impedância de $0.963 + j0.987 \Omega/km$ e 40 km de comprimento cada, e uma carga PQ de 200 kVA, conectada em 380 V.

Inicialmente, o acoplamento da carga com o sistema é realizado por um transformador convencional (13,8 kV/220 V, 200 kVA), conforme a Figura 7(a), e, a fim de comparar os resultados, substituiu-se o transformador convencional por um SST, conforme a Figura 7(b). Por fim, é realizada a simulação considerando a inserção de um sistema fotovoltaico conectado à barra em BT, de forma a analisar o comportamento do SST quando atrelado a esse tipo de sistema.

Os elementos foram definidos de forma a obter uma queda de tensão na carga suficiente para a mesma violar o limite de tensão de 0.93 p.u., conforme definido pelo Módulo 8 do PRODIST.

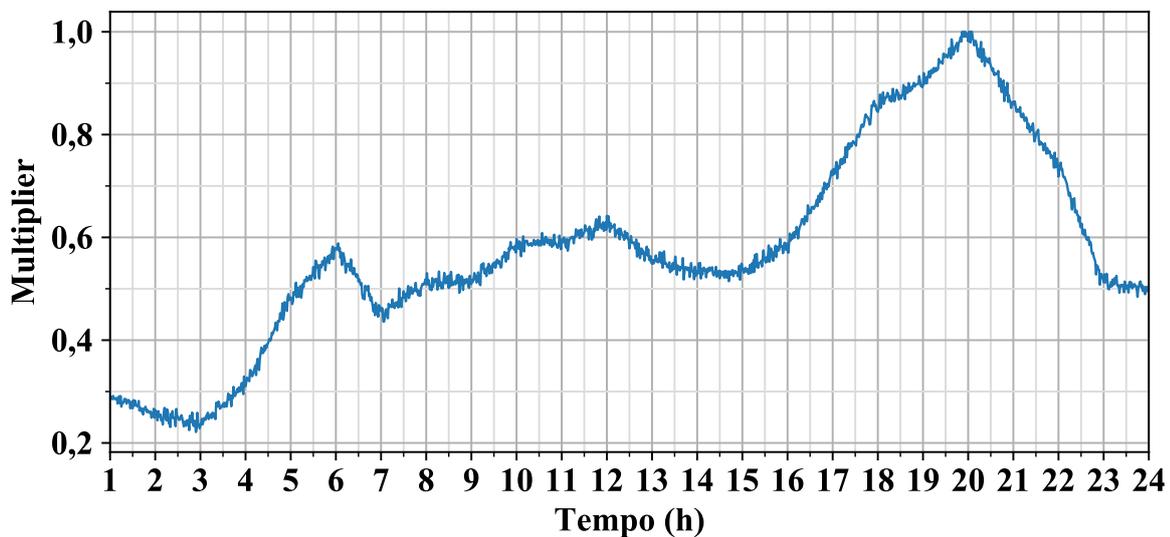
A carga considerada, é uma carga trifásica de 200 kVA, modelada como potência constante, conectada em Y e com uma tensão de linha de 380 V, a qual possui característica residencial, conforme a Figura 8.

Figura 7 – Sistema exemplo. (a) Sistema utilizando um transformador convencional na carga. (b) Sistema utilizando um SST na carga. (c) Sistema utilizando SST e FV.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 – Curva de carga residencial



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação ao SST, uma vez que este deve substituir o TR, é modelado através de dois elementos (*Load* e *VSource*). O elemento *VSource* é conectado na barra da carga desejada, com os mesmos parâmetros de tensão de linha e número de fases. Já o elemento

Load do SST é conectado a barra MT, com as mesmas características da carga em LV, com exceção da tensão de linha que passa a ser a tensão da rede em MV (neste caso 13.8 kV), da potência reativa (sendo que o SST não irá consumir potência reativa, uma vez que a potência reativa em BT é fornecida pelos capacitores internos do SST) e da curva de carga, que passará a ser ajustada conforme a necessidade da carga em BT.

Todas as simulações foram executadas num período de 24 horas, com passo de 1 minuto, totalizando 60 pontos por hora e 1440 pontos no dia.

As análises foram baseadas em três testes: (i) carga com fator de potência unitário; (ii) carga com fator de potência de 0.9 e (iii) carga com fator de potência de 0.9 juntamente com um sistema fotovoltaico.

4.1.2 Sistema de 13 Barras da IEEE

Para análise do comportamento do SST em um sistema real, foi utilizado o sistema de 13 barras fornecido pela IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Segundo Kersting (2001), o sistema teste IEEE 13 barras, apesar de ser um sistema pequeno, é capaz de fornecer diversas características importantes, proporcionando testes válidos para as principais análises a serem realizadas. Esta rede é composta por um regulador de tensão, um transformador de distribuição, um banco de capacitor, linhas aéreas e subterrâneas, bem como cargas desequilibradas e distribuídas.

A fim de alocar os SSTs, o sistema foi modificado para possuir apenas cargas em baixa tensão, logo, foram adicionados transformadores em todos os pontos com cargas. Além disso, foram dispostos 3 SSTs em pontos definidos arbitrariamente. Os pontos definidos foram:

- Barra 634: com carga trifásica desequilibrada;
- Barra 645: com carga monofásica;
- Barra 671: com carga trifásica equilibrada.

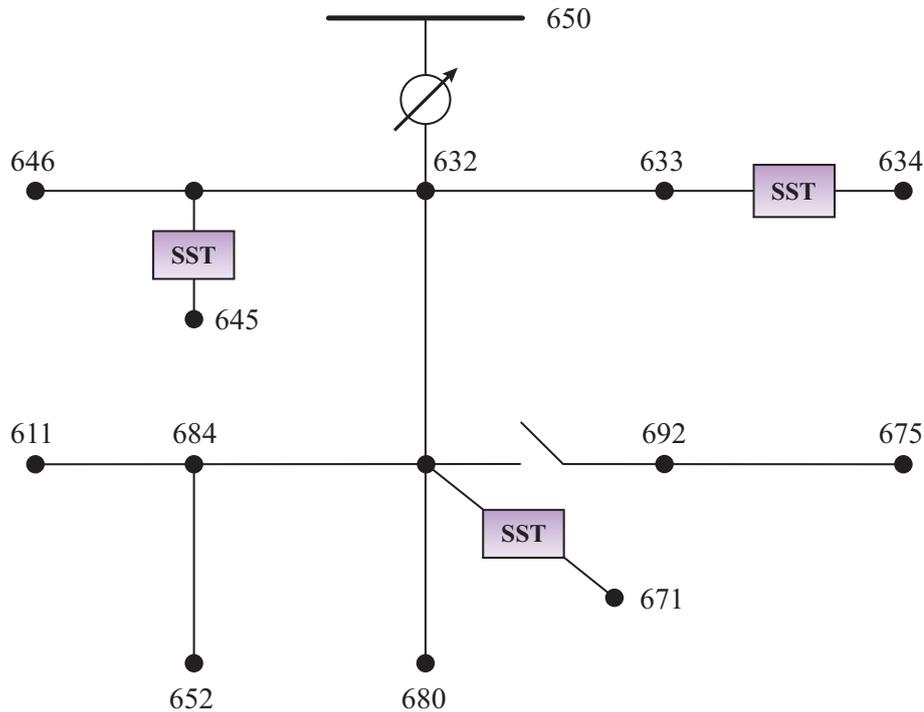
A Figura 9 apresenta o diagrama unifilar da rede teste IEEE 13 barras modificado.

A Tabela 2 apresenta as configurações de cabos e fases utilizadas nas linhas do sistema, apresentadas na Tabela 3.

As cargas do sistema original foram adaptadas para operar em baixa tensão. Além disso, algumas potências foram ajustadas de forma a obter violações na operação normal do sistema. A Tabela 4 apresenta os dados das cargas utilizadas no sistema.

A característica das cargas foram mantidas as mesmas do sistema original, apenas utilizou-se como padrão para todas as cargas a curva de cargas residencial adaptadas para minutos.

Figura 9 – Sistema de 13 barras da IEEE modificado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 – Dados das configurações das linhas

Arranjo	Sequência de Fase	Fase ACSR	Neutro ACSR	Tipo
601	B A C N	556,500 26/7	4/0 6/1	Aéreo
602	C A B N	4/0 6/1	4/0 6/1	Aéreo
603	C B N	1/0	1/0	Aéreo
604	A C N	1/0	1/0	Aéreo
605	C N	1/0	1/0	Aéreo
606	A B C N	250,000 AA, CN	None	Subterrâneo
607	A N	1/0 AA, TS	1/0 Cu	Subterrâneo

Fonte: Adaptado de Kersting (2001).

A Tabela 5 apresenta os dados dos capacitores do sistema.

Tabela 5 – Dados dos capacitores

Barra	Fase A kVAr	Fase B kVAr	Fase C kVAr
675	200	200	200
611	-	-	100

Fonte: Adaptado de Kersting (2001).

Tabela 3 – Dados das linhas

Barra A	Barra B	Comprimento (pés)	Config.
632	645	500	603
632	633	500	602
633	634	0	XFM-1
645	646	300	603
650	632	2000	601
684	652	800	607
632	671	2000	601
671	684	300	604
671	680	1000	601
671	692	0	Chave
684	611	300	605
692	675	500	606

Fonte: Adaptado de Kersting (2001).

Tabela 4 – Dados das cargas

Barra	Carga		Fase A		Fase B		Fase C	
	Conexão	Modelo	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
611	Estrela	I	-	-	-	-	170	80
634	Estrela	PQ	460	210	520	490	520	490
645	Estrela	PQ	-	-	170	125	-	-
646	Delta	Z	-	-	630	132	-	-
652	Estrela	Z	128	86	-	-	-	-
671	Delta	PQ	385	220	385	220	385	220
675	Estrela	PQ	885	590	168	160	490	412
692	Delta	I	-	-	-	-	270	251
632-671	Estrela	PQ	37	40	66	38	117	68

Fonte: Adaptado de Kersting (2001).

A Tabela 6 apresenta os dados do regulador de tensão do sistema.

A Tabela 7 apresenta os dados dos transformadores incluídos em todo o sistema. Com exceção do transformador da subestação, todos os demais realizam o rebaixamento da tensão MT (4,16 kV) para BT (380 V). Além disso, definiu-se os parâmetros $r(\%)$ e $X(\%)$ como 0,0005 e 0,0001 respectivamente, para que as perdas naturais não tivessem grande influência nos resultados.

Tabela 6 – Dados do regulador de tensão

Regulador ID	1		
Ramo de instalação	650-632		
Localização	650		
Sequência de fases	A	B	C
Conexão	Estrela Aterrada		
Monitoramento	A	B	C
Largura da faixa (V)	2		
Relação do TP	20		
Relação do TC	700		
Ajustes do compensador	Fase A	Fase B	Fase C
R (pu)	3	3	3
X (pu)	9	9	9
Nível de tensão (V)	122	122	122

Fonte: Adaptado de Kersting (2001).

Tabela 7 – Dados dos transformadores

Transformador	Barra A	Barra B	Fases	Conexão	Potência (kVA)	Tensão (kV)	
						Primário	Secundário
Subestação	SourceBus	650	3	Δ - Y	1.000.000	115	4,16
TR611	611.3	C611.3	1	Y-Y	225	4,16	0,38
TR634	633	C634	3	Y-Y	2000	4,16	0,38
TR645	645.2	C645.2	1	Y-Y	225	4,16	0,38
TR646	646.2.3	C646.2.3	2	Y-Y	750	4,16	0,38
TR652	652.1	C652.1	1	Y-Y	300	4,16	0,38
TR670	670	C670	3	Y-Y	300	4,16	0,38
TR671	671	C671	3	Y-Y	1500	4,16	0,38
TR675	675	C675	3	Y-Y	2000	4,16	0,38
TR692	698.3.1	C692.3.1	2	Y-Y	500	4,16	0,38

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Teste 1

O primeiro teste consiste em utilizar uma carga puramente resistiva no sistema da Figura 7(b), que demanda apenas potência ativa do sistema, a fim de verificar como o SST se comporta, bem como o funcionamento do controle de tensão e fator de potência.

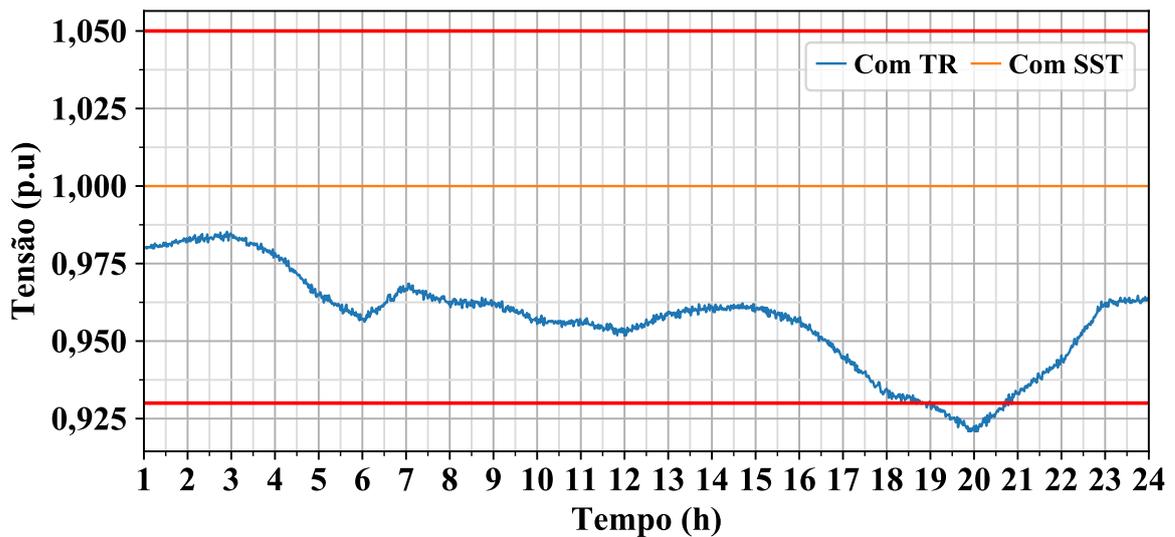
4.2.1 Tensão na carga

A Figura 10(a) apresenta a tensão da carga em BT quando utiliza-se um TR e quando utiliza-se um SST. As retas em vermelho indicam os limites de tensão, conforme o módulo 8 do PRODIST, sendo o limite inferior de 0.93 p.u e o limite superior de 1.05 p.u.

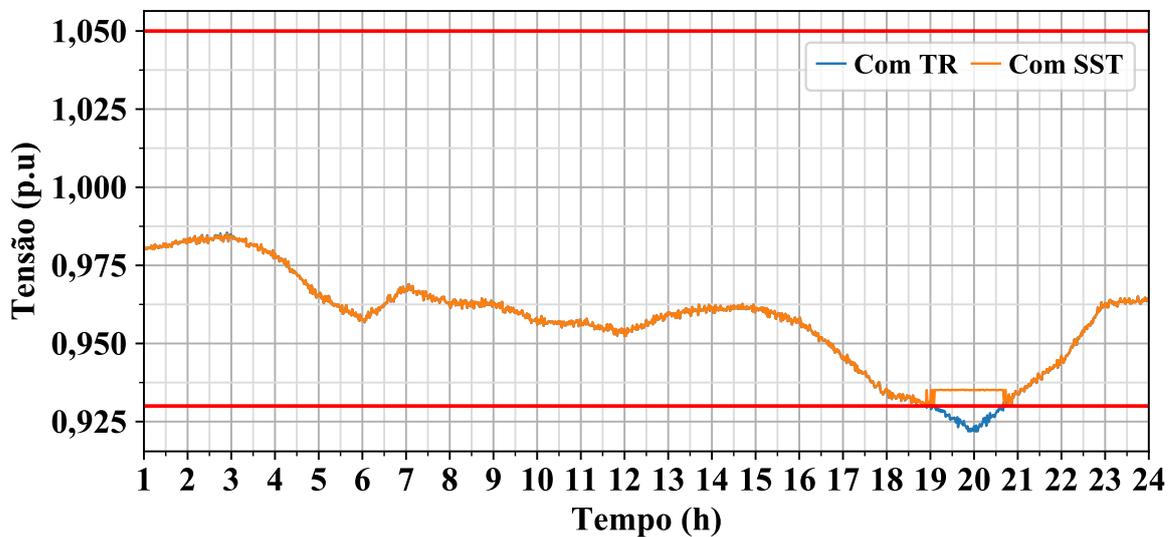
A curva em azul apresenta a tensão da carga em BT, a qual varia conforme conforme a curva de carga, apresentando uma violação do nível de tensão ($V < 0.93$ p.u) no período das 19h às 20h30min. Tal comportamento é sanado ao utilizar-se um SST, uma vez que este garante o controle da tensão em BT, fazendo com que esta permaneça em 1 p.u de forma constante, conforme pode ser observado pela curva em laranja.

Já em MT, a tensão da carga é a mesma tanto usando TR quanto SST, pois, já que nem a carga e nem SST não demandam reativos do sistema, não há ganhos ou perdas nos níveis de tensão. Entretanto, o controle do SST atua no período em que ocorre a violação de tensão, elevando-a para aproximadamente 0.94 pu, como pode ser observado na Figura 10(b).

Figura 10 – Tensão na carga. (a) Baixa tensão. (b) Média tensão.



(a)

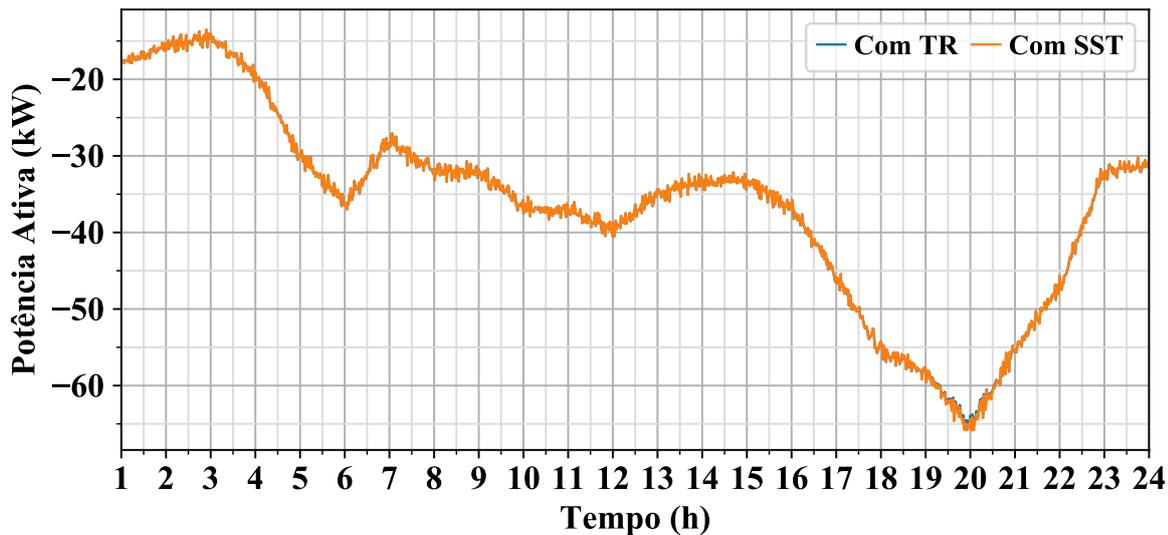


(b)

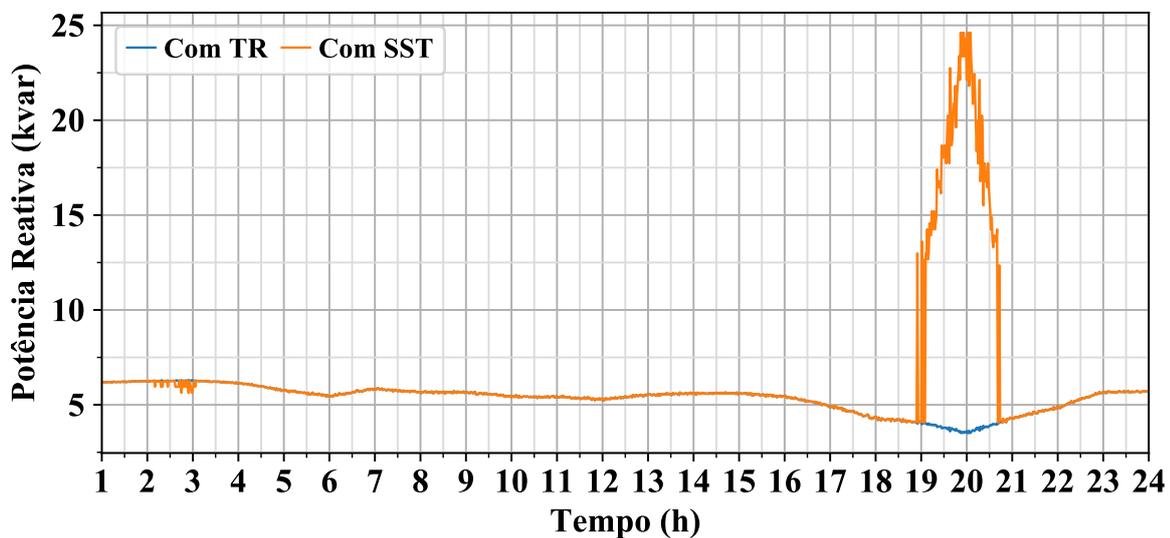
4.2.2 Potência na subestação

Analisando a potência fornecida pela subestação, verifica-se que a mesma é praticamente igual, tanto usando TR quanto SST, o que é esperado. Entretanto, quando o controle do SST é acionado para corrigir a tensão, há um acréscimo na liberação de potência ativa da subestação, devido ao aumento de tensão da carga (Figura 11(a)).

Figura 11 – Subestação. (a) Potência ativa. (b) Potência reativa.



(a)



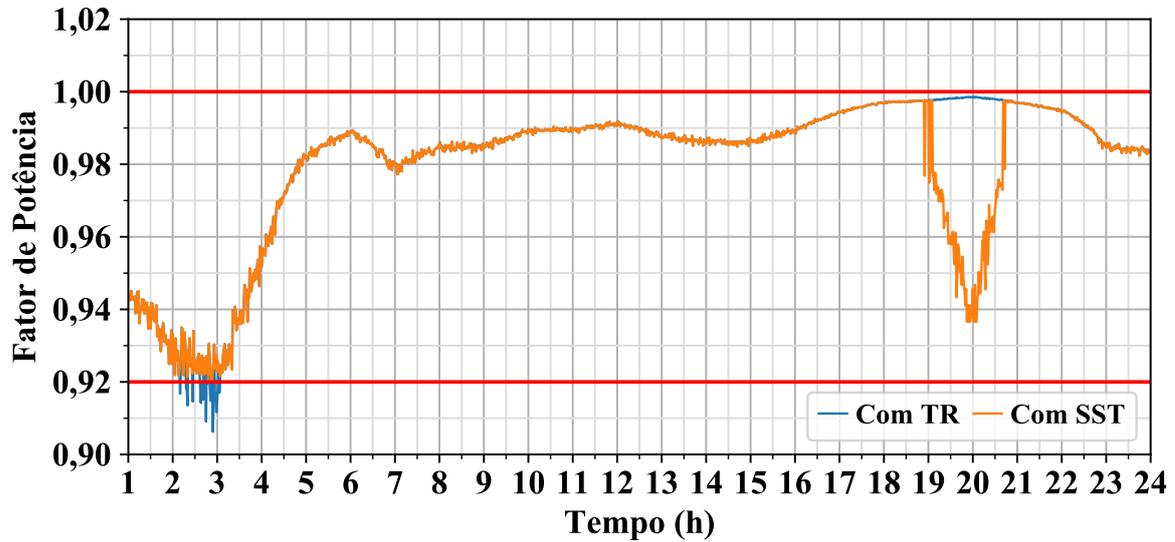
(b)

4.2.3 Fator de potência da subestação

Analisando a Figura 11(b) é possível notar os momentos em que o controle do SST atua, fornecendo ou absorvendo potência reativa. Para corrigir a violação de tensão ocorrida, o SST injeta em torno de 25 kvar/fase.

A Figura 12 apresenta o fator de potência na subestação. Nota-se que o controle do SST atua nas horas iniciais para corrigir o fator de potência da subestação. Essa ação também pode ser observada na Figura 11(b), onde o SST faz um pequeno ajuste na potência reativa para poder realizar o controle do FP.

Figura 12 – Fator de Potência



4.3 Teste 2

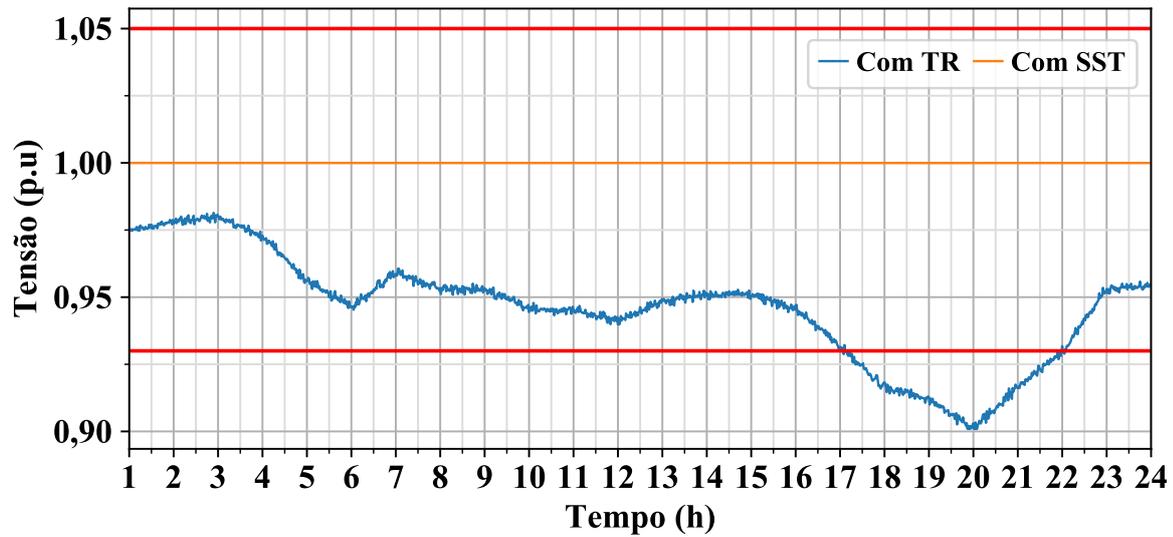
O teste 2, consiste em utilizar uma carga de 200 kva com fator de potência de 0.9 indutivo.

4.3.1 Tensão na carga

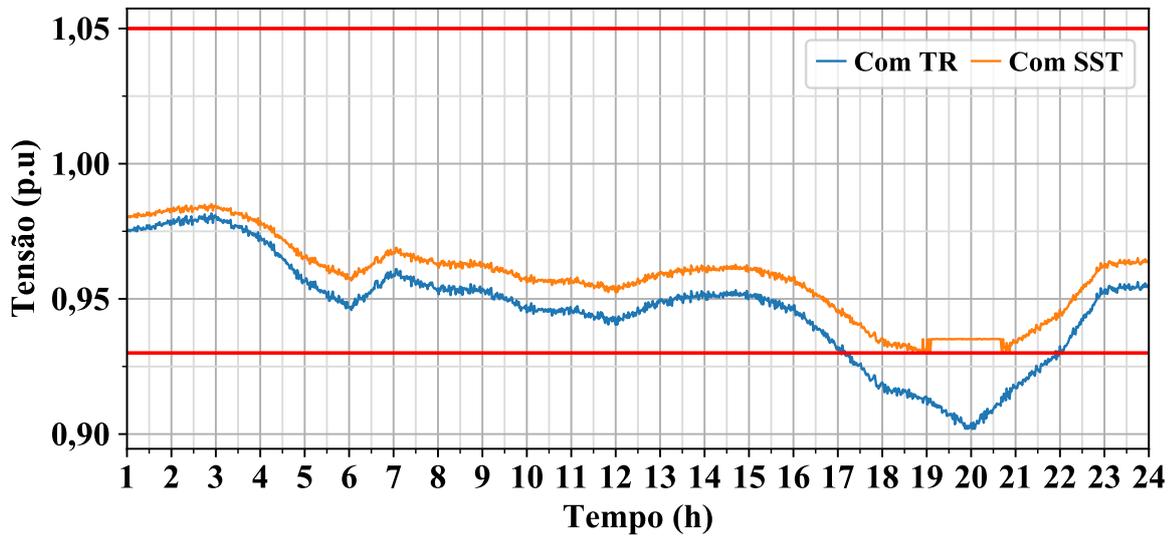
A Figura 13(a) apresenta a tensão em BT, tanto com TR quanto com SST. Neste caso a violação de tensão ocorre em um período maior, das 17h30min até às 22h.

Já, analisando as tensões em MT, é possível verificar um aumento no nível de tensão, no ponto de conexão do SST, pelo simples fato do SST não demandar reativos. No período das 19h às 22h30min o SST passa a injetar reativos na rede, fazendo com a tensão aumente acima do limite permitido, conforme observado na curva laranja da Figura 13(b).

Figura 13 – Tensão na carga. (a) Baixa tensão. (b) Média tensão.



(a)

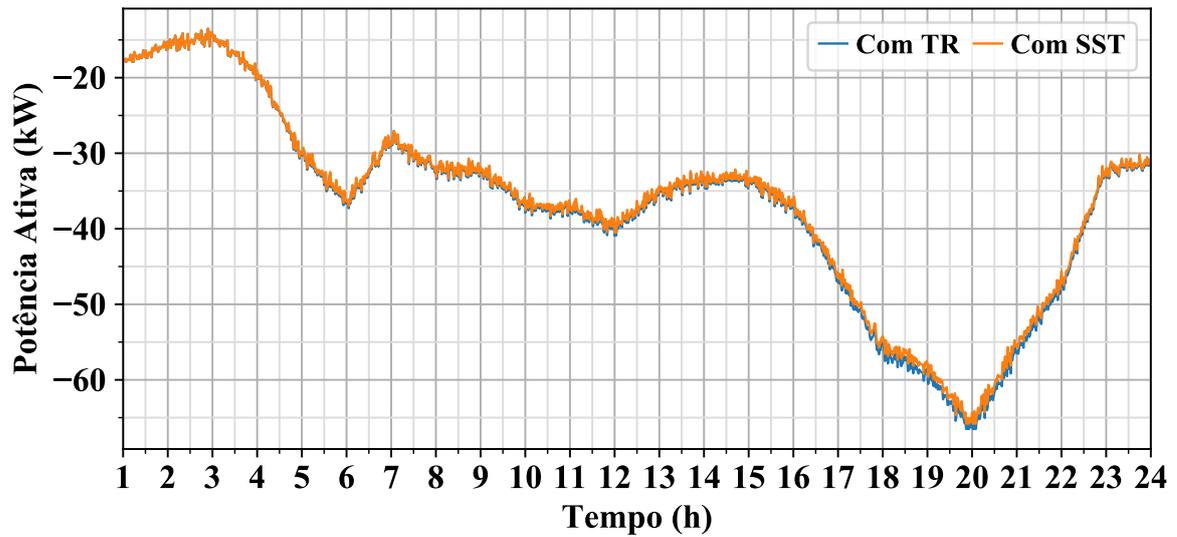


(b)

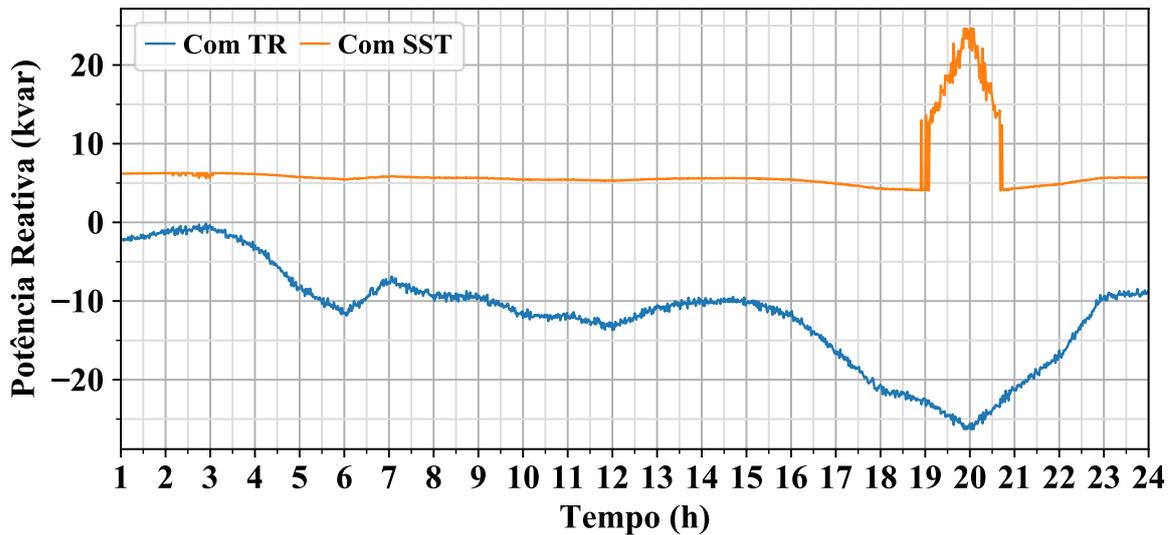
4.3.2 Potência na subestação

Em relação a potência ativa fornecida pela subestação, esta sofre uma pequena redução, uma vez que a potência aparente total demandada pelo SST é menor que quando usa-se um TR, pois em operação normal o SST não demanda potência reativa fazendo com que a corrente demandada seja menor.

Figura 14 – Subestação. (a) Potência ativa. (b) Potência reativa.



(a)



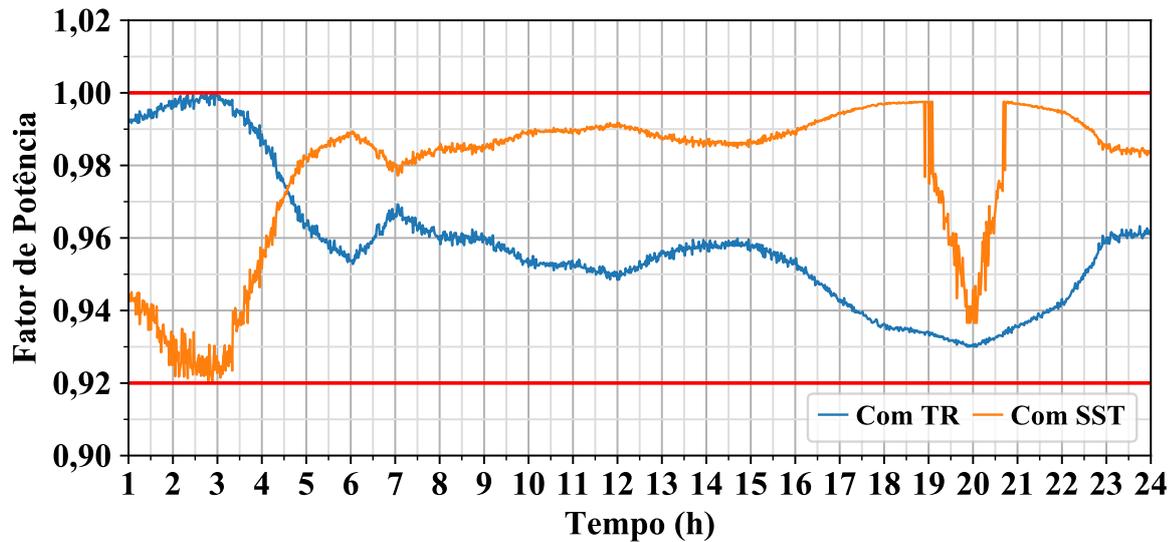
(b)

Na Figura 14(b) observa-se a diferença na utilização do SST e do TR. Usando um TR, a potência reativa demandada pela carga é fornecida diretamente pela subestação. Já utilizando o SST, a potência reativa da carga é suprida pelos capacitores internos do SST, logo o SST não demanda potência reativa da subestação. Na Figura 14(b) também é possível observar os instantes em que o controle do SST atua injetando potência reativa de modo a corrigir os níveis de tensão da carga em MT.

4.3.3 Fator de potência da subestação

A Figura 15 apresenta o comportamento do fator de potência da subestação ao longo das 24 horas. Neste caso não houve violação do fator de potência com TR ou com SST, porém é possível notar a variação deste quando o controle de tensão é acionado.

Figura 15 – Fator de Potência



4.4 Teste 3

O teste 3 consiste em utilizar a mesma carga do teste 2, porém com penetração de 20% de sistema fotovoltaico. A potência do sistema fotovoltaico é definida como 20% da potência nominal da carga.

$$P_{FV} = 200\text{kVA} \times 20\%$$

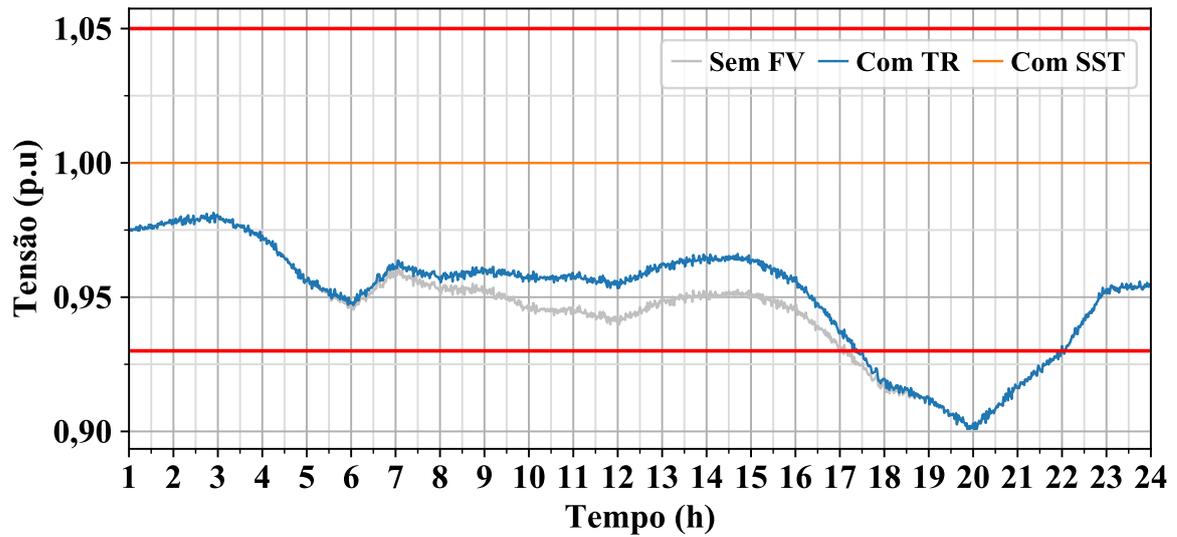
$$P_{FV} = 40\text{kVA}$$

4.4.1 Tensão na carga

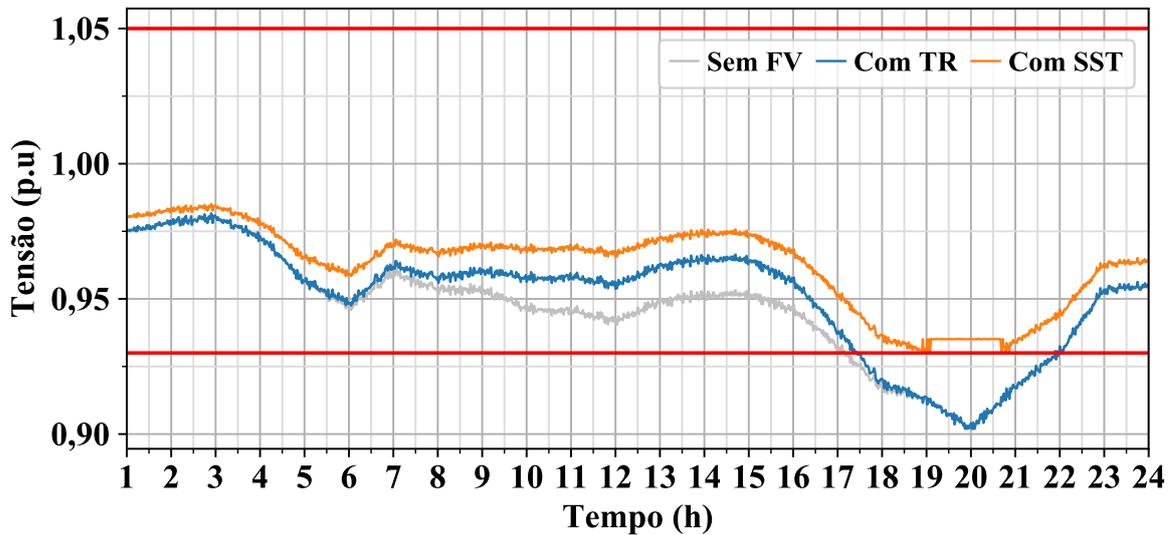
Apesar do sistema fotovoltaico aumentar o nível de tensão no período em que o mesmo está em operação, ainda ocorre a violação de tensão no período da noite. Na Figura 16(a) pode-se observar o ganho de tensão obtido ao utilizar o sistema fotovoltaico apenas com o TR. Ao utilizar o SST não há diferença no nível de tensão em BT, pois a mesma é constante em 1 p.u.

Já em MT, o sistema fotovoltaico contribui para que, em conjunto com o SST, ocorra um aumento de tensão ainda maior. Na Figura 16(b) pode-se notar o aumento da tensão em MT, bem como a ação do controle no período da noite para corrigir o nível de tensão.

Figura 16 – Tensão na carga. (a) Baixa tensão. (b) Média tensão.



(a)



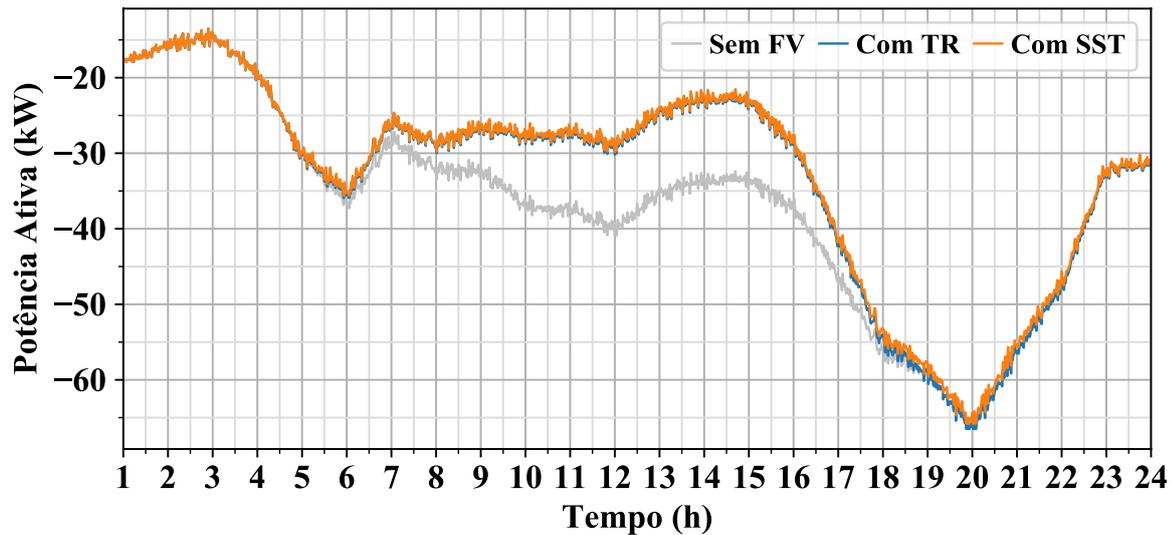
(b)

4.4.2 Potência na subestação

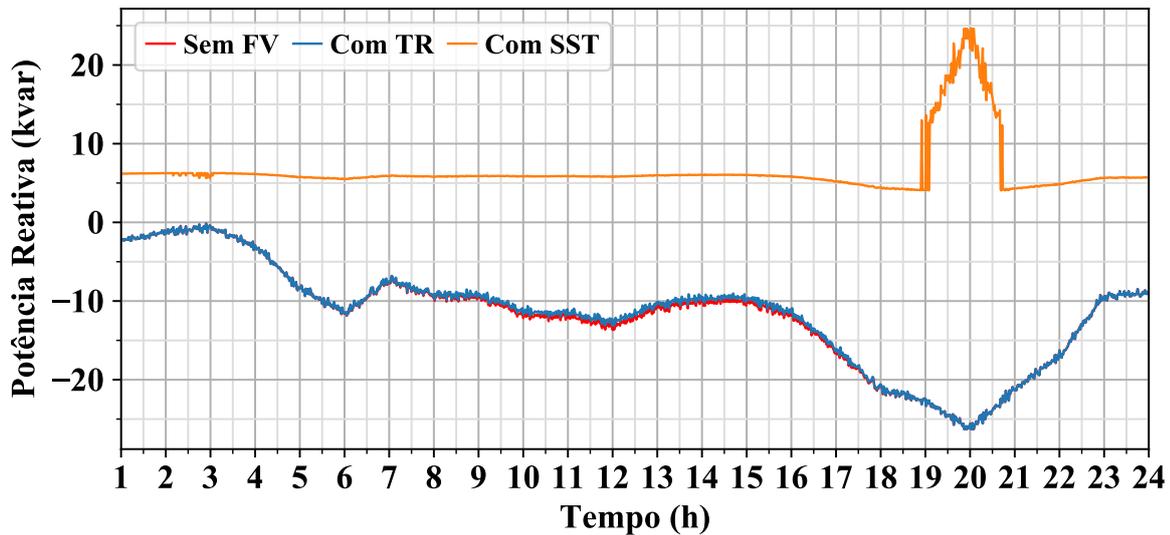
Quanto a utilização do FV em conjunto com TR ou SST, em relação à potência fornecida pela subestação, não há grandes diferenças entre ambos. Entretanto, quando utiliza-se um FV, a potência fornecida pela subestação, no período em que o FV está em operação, apresenta uma redução considerável, pois a demanda da carga passa a ser suprida pelo FV. A diferença da potência fornecida pela subestação, com e sem FV, pode ser observada na Figura 17(a).

Já o fornecimento de reativos pela subestação, com ou sem FV, não é afetado, pois o FV fornece apenas potência ativa à carga, logo a Figura 17(b) apresenta a mesma característica da Figura 17(b).

Figura 17 – Subestação. (a) Potência ativa. (b) Potência reativa.



(a)

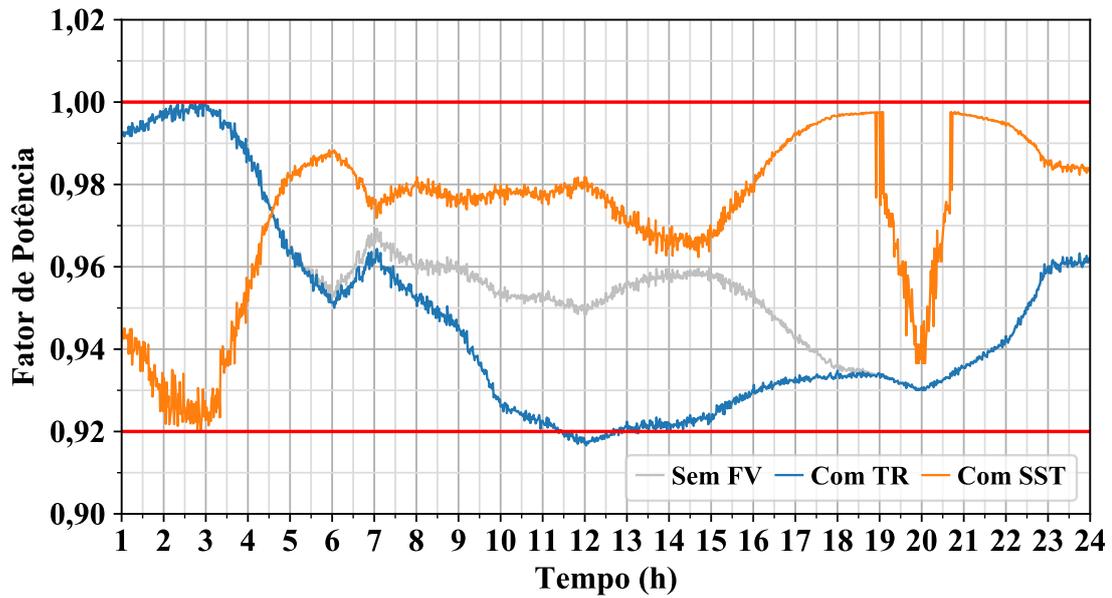


(b)

4.4.3 Fator de potência da subestação

Um ponto relevante a ser considerado, ao utilizar FV, é uma forte queda no fator de potência da subestação, pois o FV provoca uma redução na potência ativa fornecida pela subestação, enquanto que a potência reativa permanece a mesma. Na Figura 18 pode-se perceber o impacto que o FV causa no fator de potência quando utiliza-se o mesmo com um TR, no período em que está operando. Já, utilizando o FV com o SST, percebe-se que o fator de potência apresenta o mesmo comportamento do Teste 2, entretanto o controle do SST atua durante a operação do FV para corrigir a violação de fator de potência ocorrida às 12h.

Figura 18 – Fator de Potência



4.5 Teste 4

Esse teste foi realizado utilizando o sistema de 13 barras da IEEE citado anteriormente, conforme visto na Figura 9.

4.5.1 Tensões nas cargas em BT

A utilização dos SSTs para conectar as cargas 634, 645 e 671 na rede de média tensão, faz com que a tensão em BT seja regulada para 1 p.u, como pode ser observado na Figura 19, Figura 20 e Figura 21.

Figura 19 – Tensão em BT na carga 634

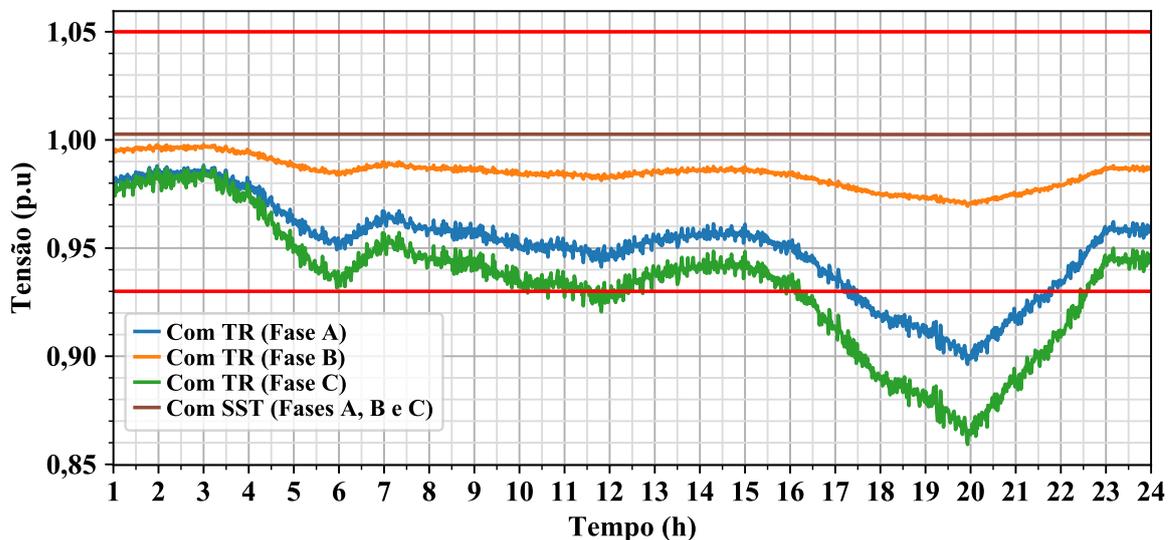


Figura 20 – Tensão em BT na carga 645

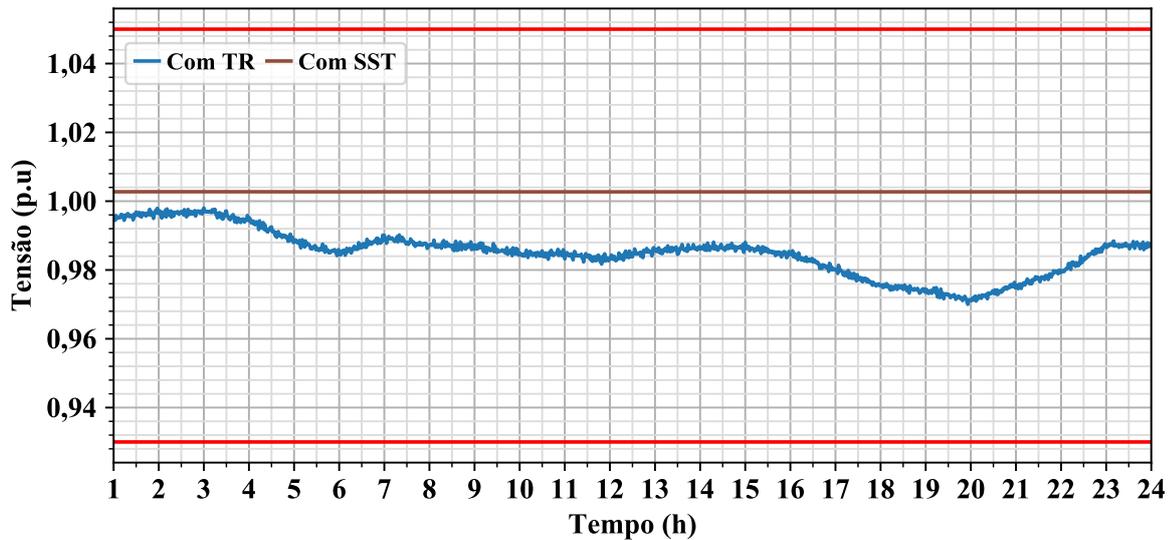
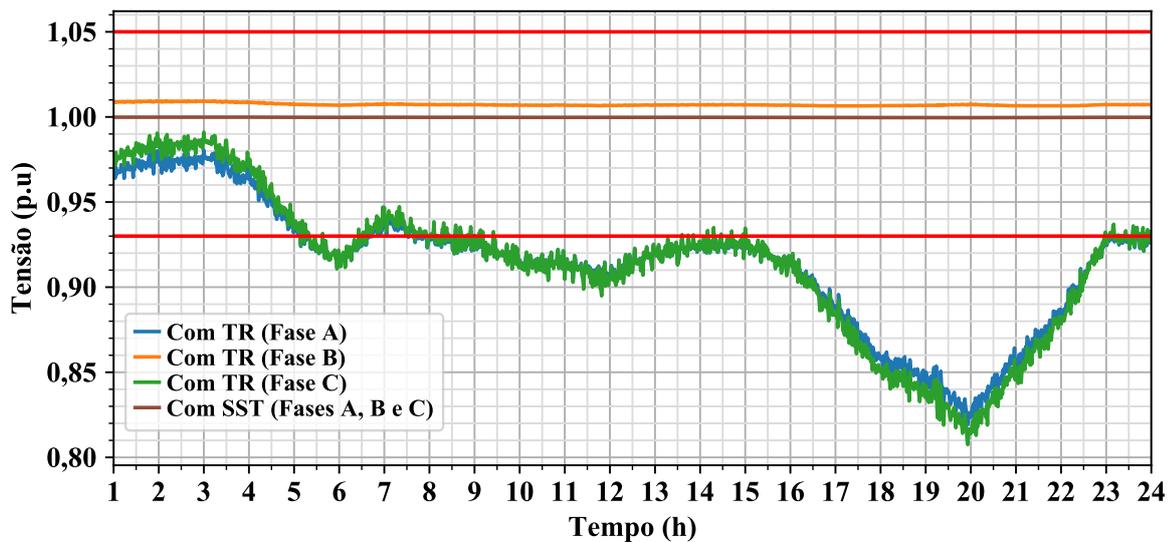


Figura 21 – Tensão em BT na carga 671



4.5.2 Tensões nas cargas em MT

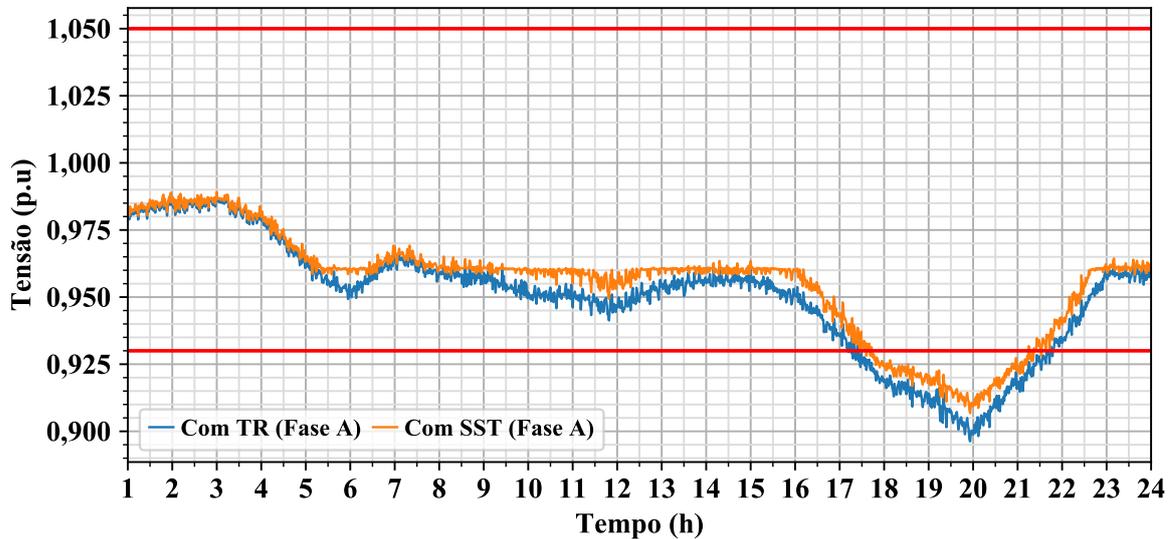
No lado primário do SST, ou seja, no lado conectado à rede de média tensão, a tensão varia conforme a curva da respectiva carga conectada, logo em determinados horários pode ocorrer violação dos limites de tensão. Além disso, em função de algumas cargas serem trifásicas desequilibradas, utiliza-se um SST em cada fase, com isso a ação de cada um causa efeito nos demais.

Na carga 634 foram utilizados 3 SSTs, sendo um para cada fase, devido a carga ser desequilibrada. Os controles dos SSTs atuam separadamente para corrigir o fator de potência da subestação, provocando variações na tensão do ponto de conexão do SST.

Na fase A (Figura 22) observa-se um pequeno aumento na tensão devido a ação

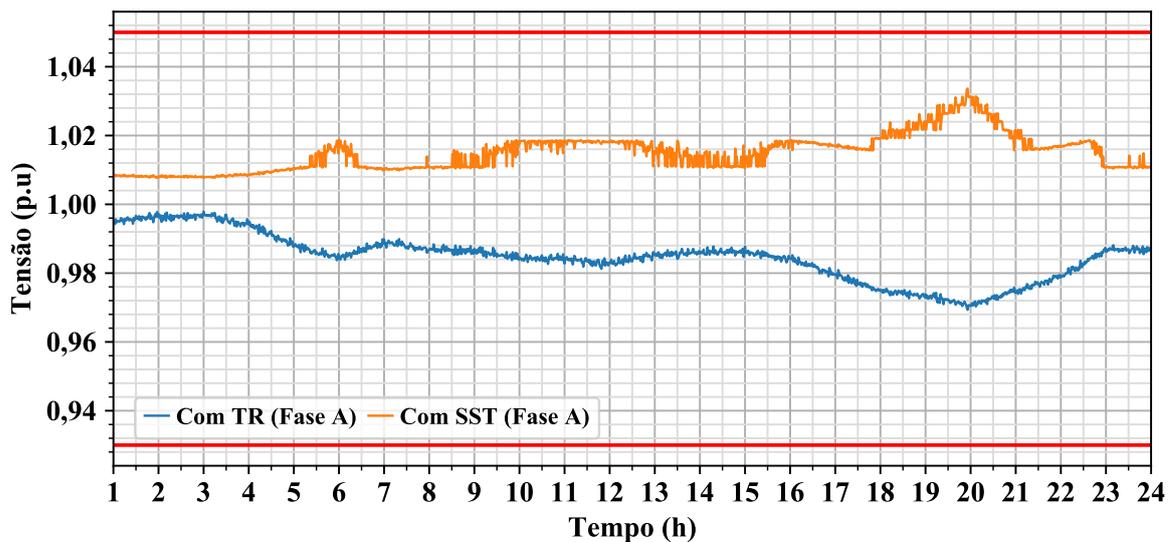
do controle. Mesmo com a atuação do controle, ainda há violação do nível de tensão entre 18h e 22h.

Figura 22 – Tensão em MT na carga 634 (Fase A)



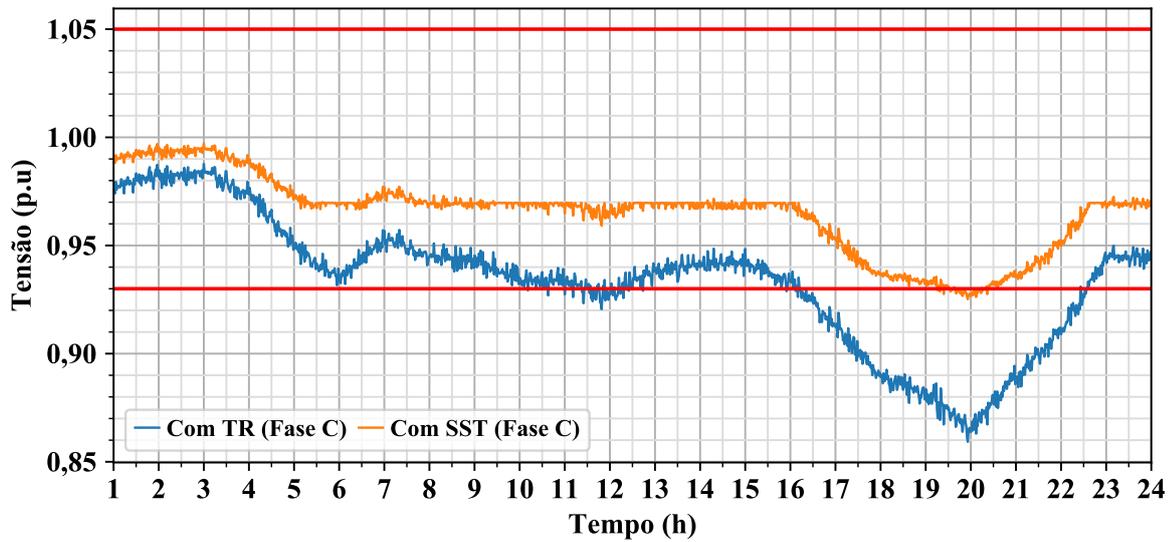
Na fase B (Figura 23), uma vez que os níveis de tensão ao utilizar um TR já eram adequados, houve um aumento acima de 1 p.u., porém manteve-se dentro dos limites permitidos.

Figura 23 – Tensão em MT na carga 634 (Fase B)



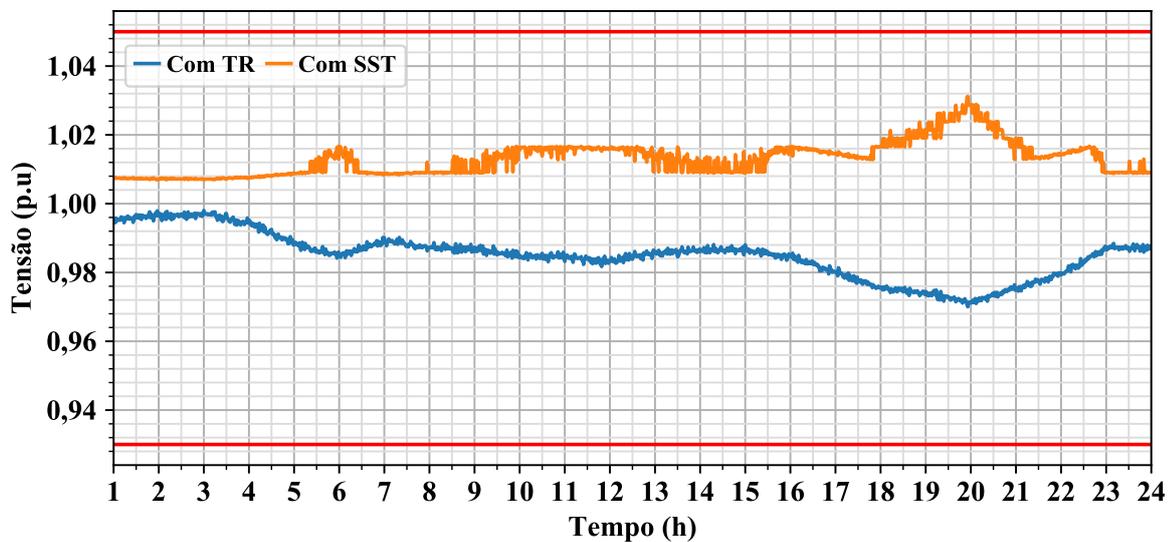
Já na fase C (Figura 24), a ação do controle do SST foi capaz de corrigir praticamente toda a violação que ocorria ao utilizar TR, permanecendo inadequada apenas às 20h.

Figura 24 – Tensão em MT na carga 634 (Fase C)



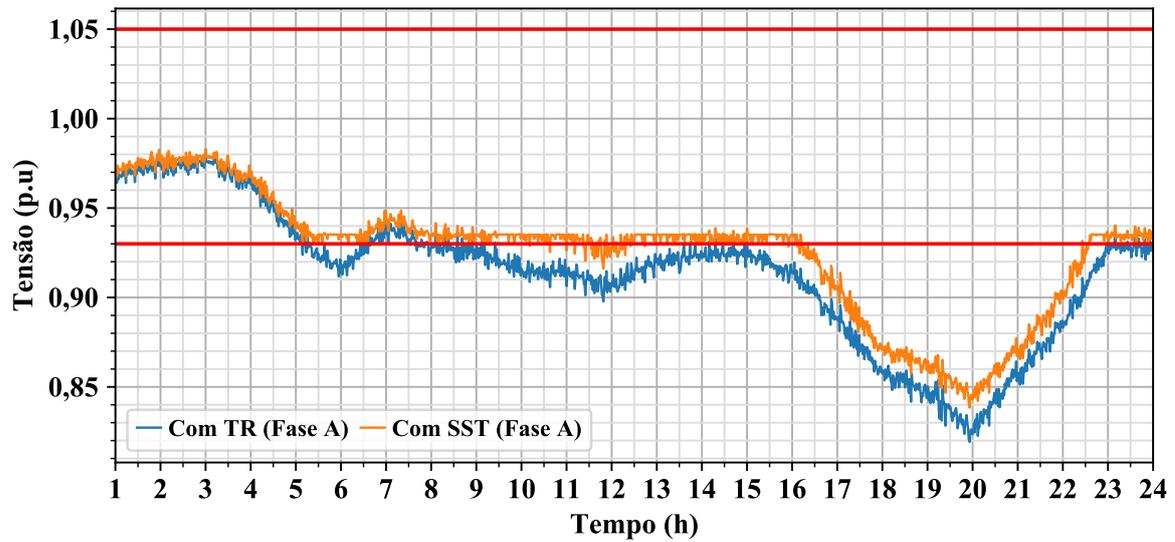
Na carga 645, a tensão em MT apresentou o mesmo comportamento da fase B da carga 634, permanecendo dentro dos limites permitidos.

Figura 25 – Tensão em MT na carga 645



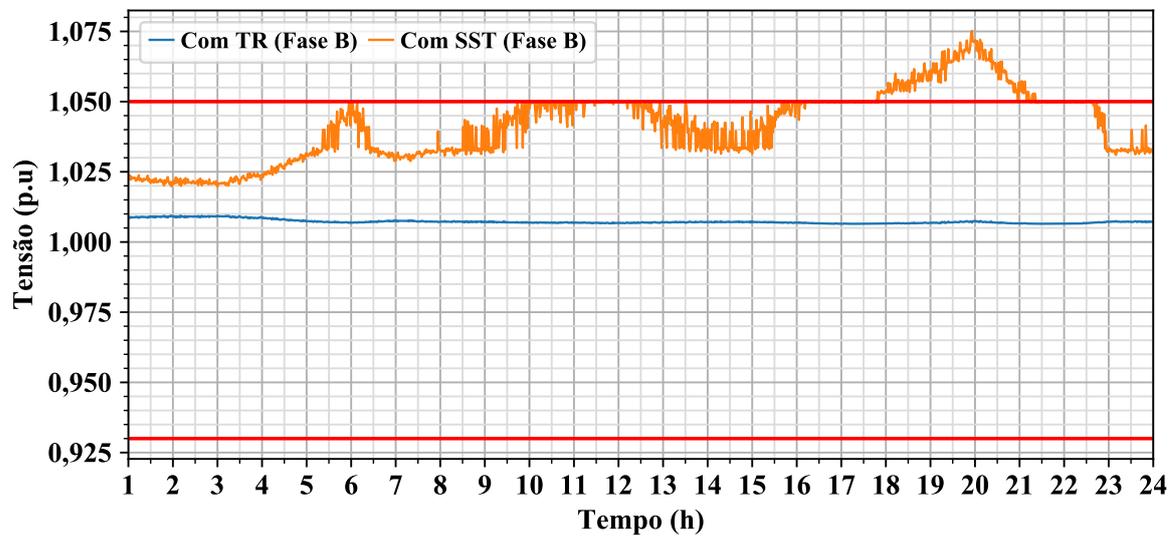
Na fase A (Figura 26), da carga 671, a ação do controle corrige a violação existente durante o dia e melhora o possível durante a noite.

Figura 26 – Tensão em MT na carga 671 (Fase A)



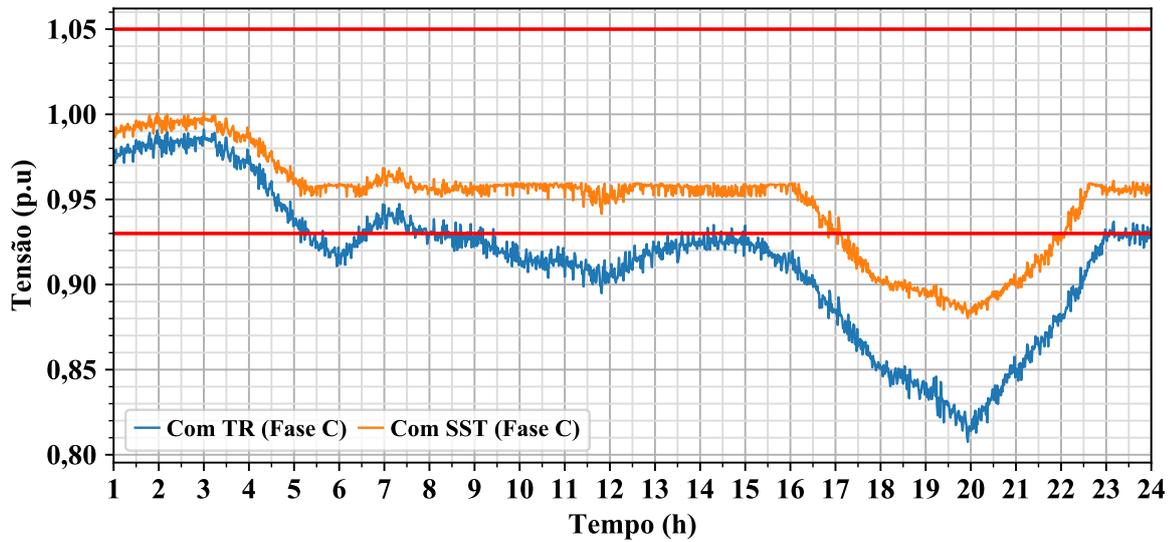
Na fase B (Figura 27), a ação do controle para corrigir o fator de potência provoca elevação na tensão e, durante a noite, essa elevação chega a ultrapassar o limite máximo de tensão.

Figura 27 – Tensão em MT na carga 671 (Fase B)



Na fase C (Figura 28), a ação do controle apresenta o mesmo efeito da fase A, corrigindo a maior parte das violações existentes.

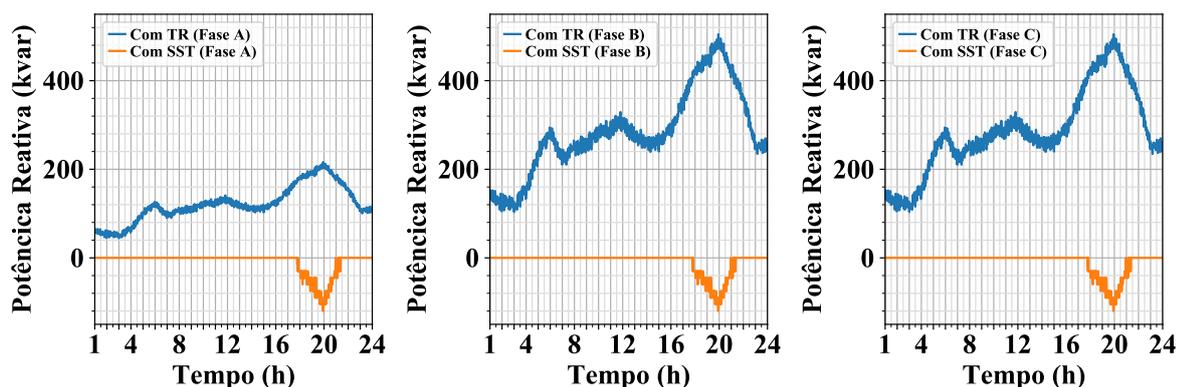
Figura 28 – Tensão em MT na carga 671 (Fase C)



4.5.3 Potência Reativa dos SSTs

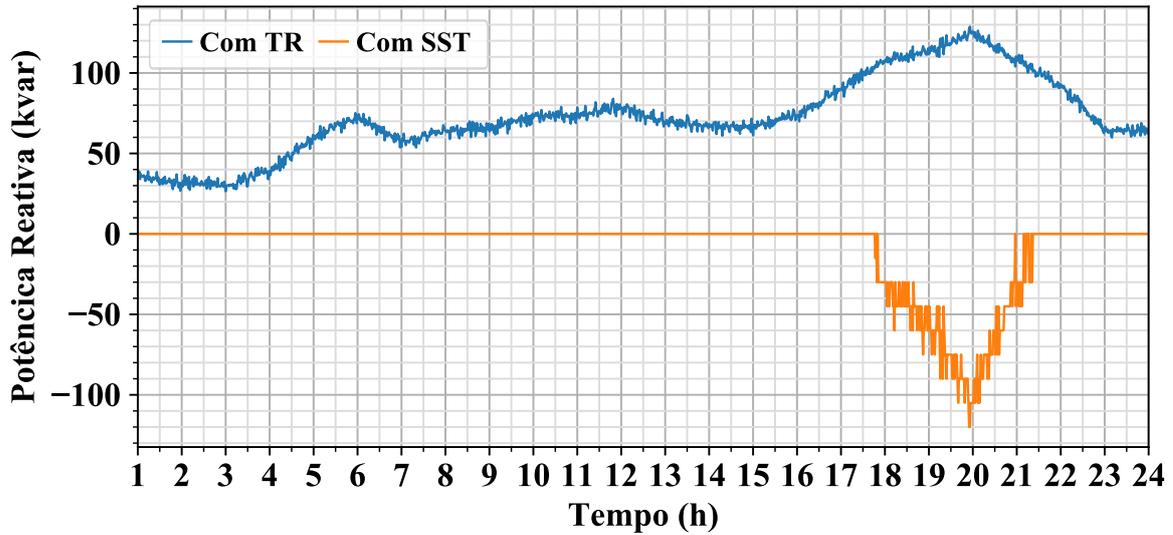
A Figura 29 apresenta a potência reativa em cada uma das fases do SST conectado na carga 634. Observa-se que o controle atuou no período das 18h às 22h, injetando potência reativa no sistema para elevar o nível de tensão na barra local e contribuir para a correção do fator de potência.

Figura 29 – Potência reativa do SST 634



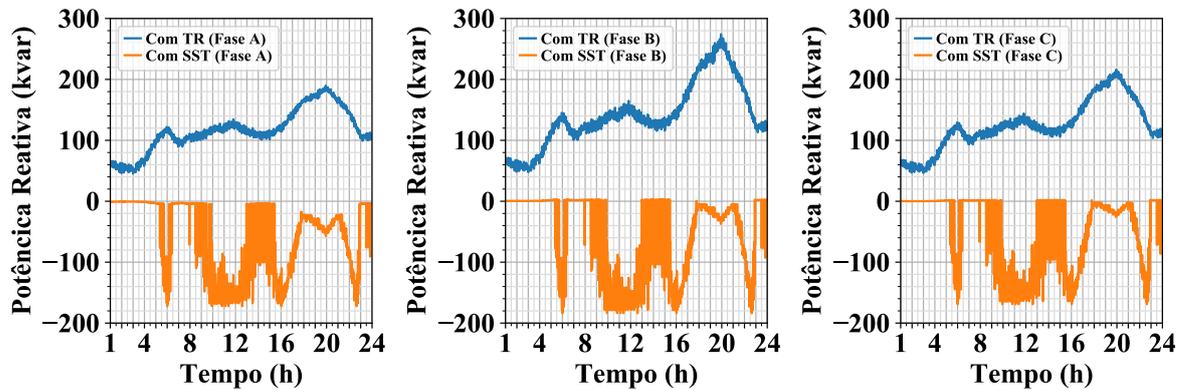
O SST da barra 645 seguiu o mesmo comportamento do SST da barra 634. Na Figura 30, observa-se que o controle aciona a injeção de potência reativa no período da 18h às 21h, a fim de elevar o nível de tensão na barra e contribuir para a correção do fator de potência.

Figura 30 – Potência reativa do SST 671



Já o SST da barra 671, aciona seu controle na maior parte do tempo, como pode ser observado na Figura 31, visto que esta barra apresenta vários pontos com violação de tensão.

Figura 31 – Potência reativa do SST 671



4.5.4 Potência Ativa dos SSTs

A Figura 32 apresenta a potência ativa que o SST drena da rede, não apresentando diferença entre o uso do TR e do SST.

A Figura 33 apresenta a potência ativa do SST, seguindo o mesmo comportamento do SST 634.

Figura 32 – Potência ativa do SST 634

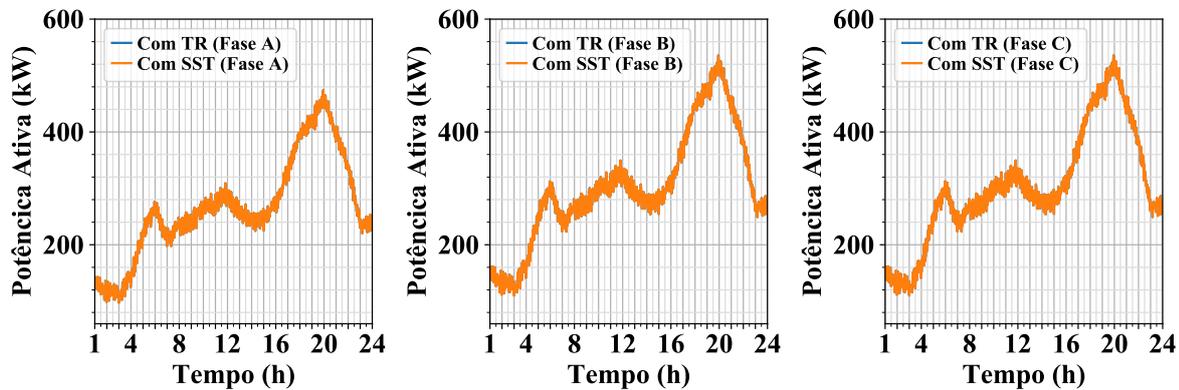
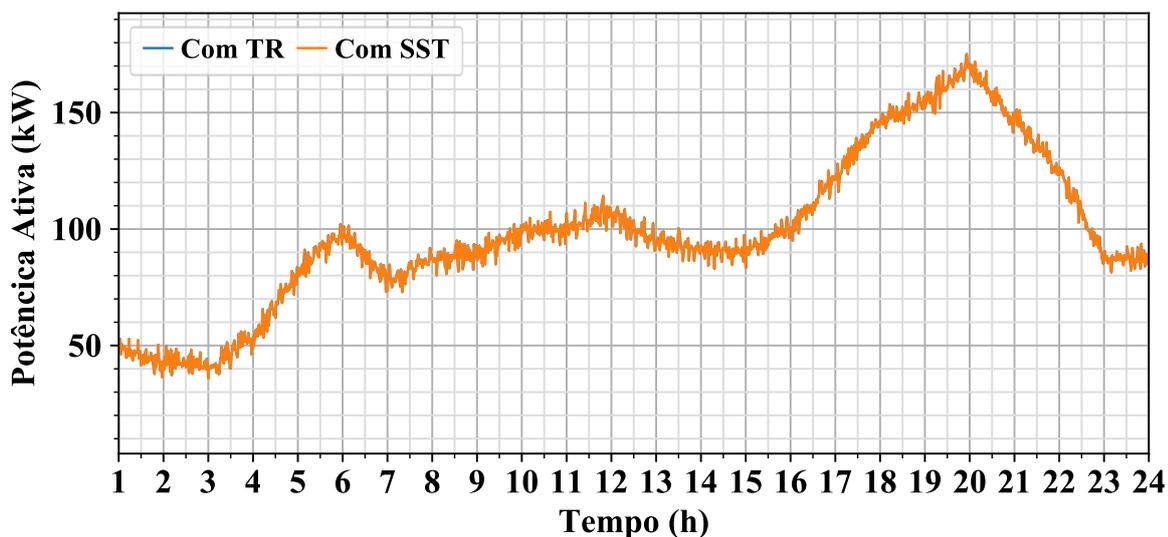


Figura 33 – Potência ativa do SST 645

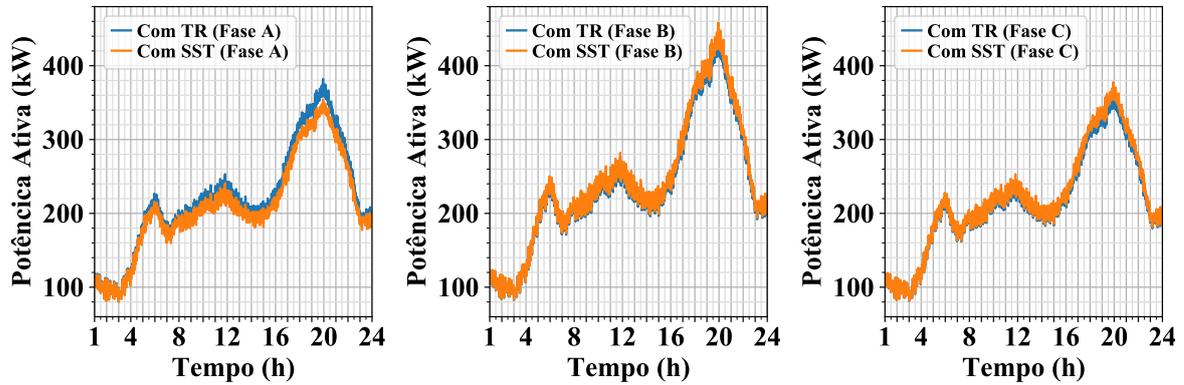


Já no SST 671, a potência ativa nas fases apresenta variações quando comparada à potência ativa utilizando TR (Figura 34). Como esse SST atua praticamente em todo o período do dia, a variação de potência reativa provoca uma diminuição nas perdas do sistema, corrigindo o fator de potência da subestação e elevando a tensão no ponto de conexão. Além disso, devido a variação do fluxo de potência em cada fase das linhas, a potência ativa na fase A apresenta uma redução, compensando o aumento de potência ativa nas fases B e C.

4.5.5 Potências da subestação

O fluxo de potência reativa da subestação sofre uma grande redução ao utilizar-se SSTs, pois a potência reativa solicitada pelas cargas é suprida diretamente pelo SST,

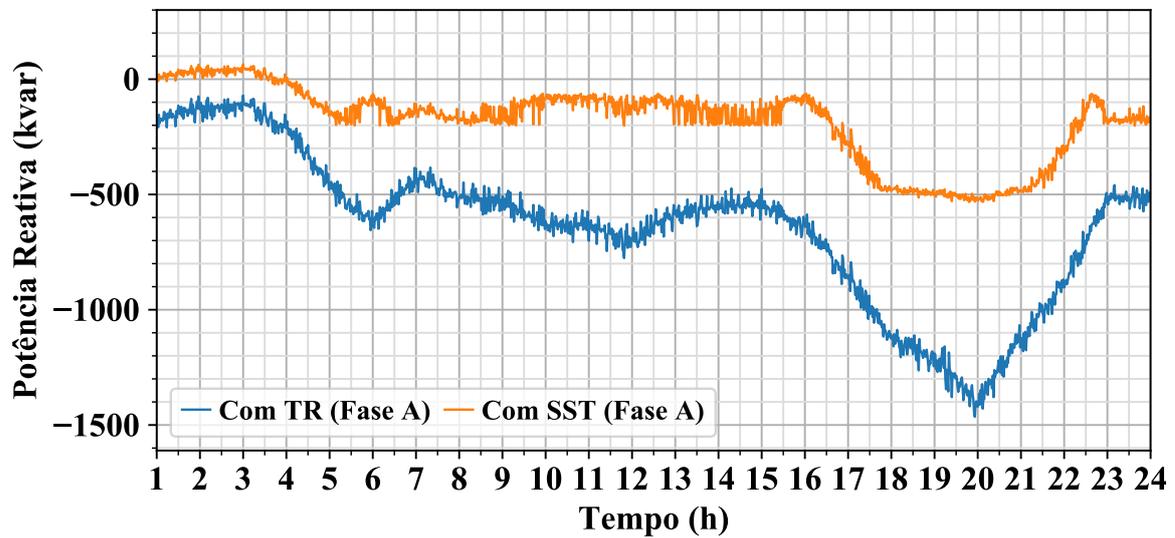
Figura 34 – Potência ativa do SST 671



não demandando da rede. Logo, o fluxo natural de reativos deve-se às cargas que estão conectadas a transformadores convencionais e às linhas.

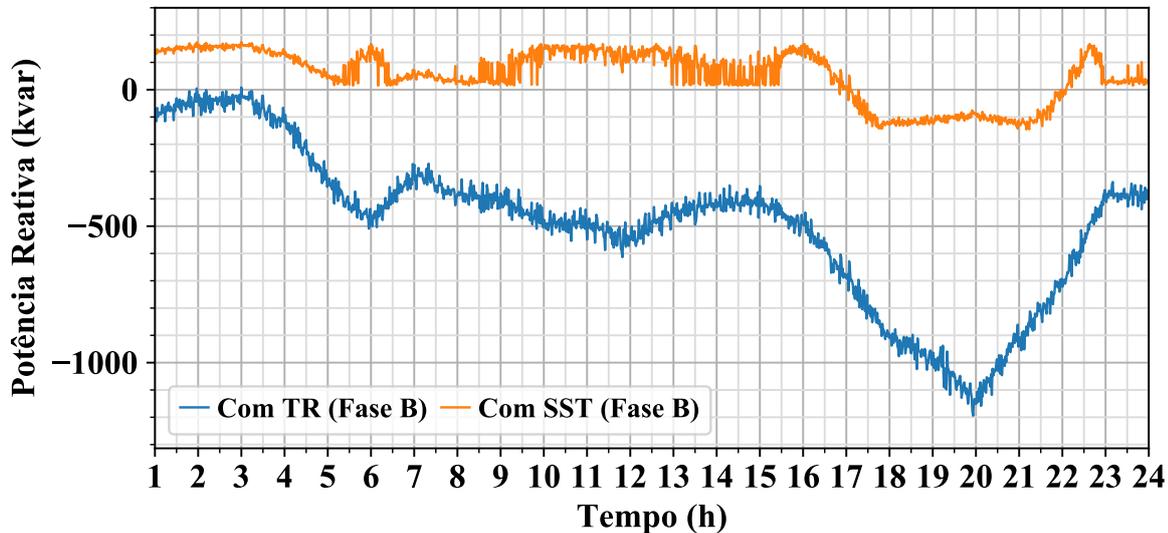
A Figura 35 apresenta a potência reativa fornecida pela fase A da subestação. Observa-se que inicialmente há uma redução da demanda de reativos, e conforme o controle dos SSTs são acionados.

Figura 35 – Potência reativa da subestação (Fase A)



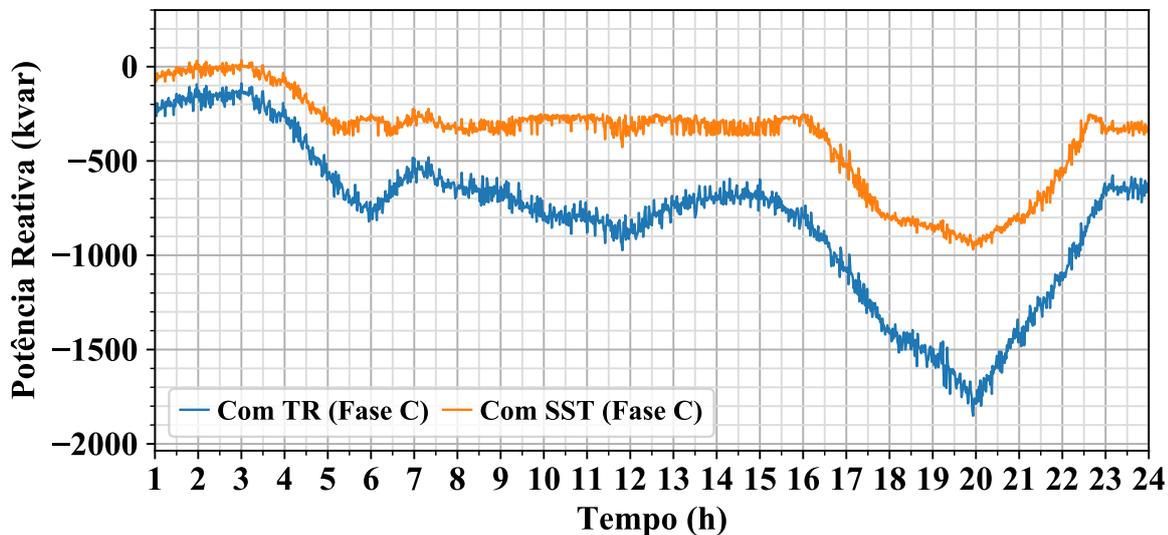
A Figura 36 apresenta a potência reativa fornecida pela fase B da subestação.

Figura 36 – Potência reativa da subestação (Fase B)



A Figura 37 apresenta a potência reativa fornecida pela fase C da subestação.

Figura 37 – Potência reativa da subestação (Fase C)



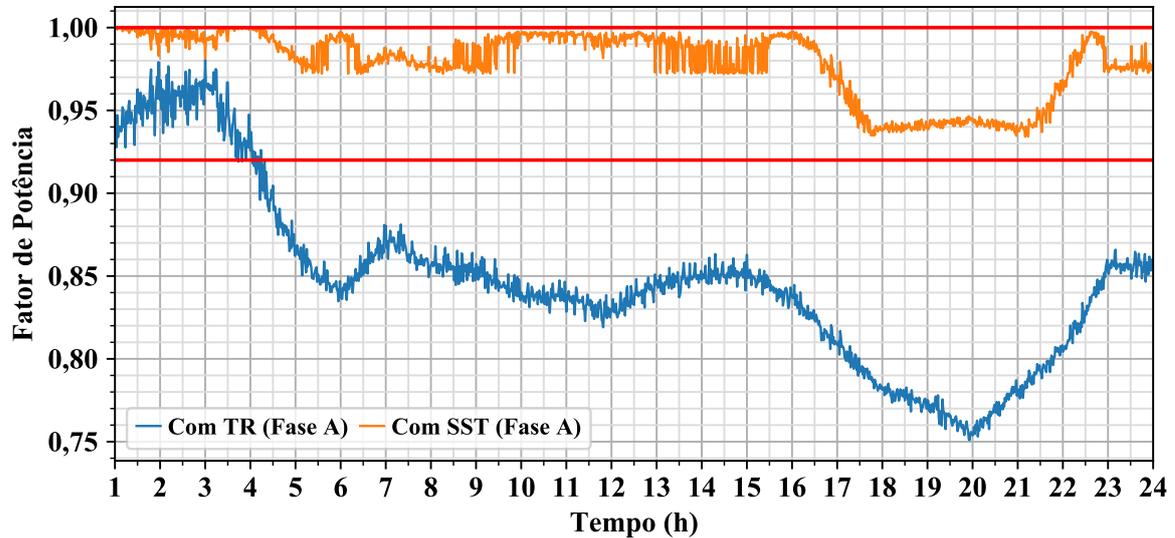
4.5.6 Fator de potência da subestação

O fato do SST reduzir a potência reativa fornecida pela subestação já provoca uma elevação do fator de potência, uma vez que haverá mais potência ativa do que reativa circulando no sistema. Nos instantes em que há a necessidade de corrigir o fator de potência, o controle dos SSTs atua injetando/absorvendo potência reativa.

A Figura 38 apresenta o fator de potência na fase A da subestação. Nota-se que o fator de potência ao utilizar o SST permanece dentro dos limites permitidos, apresentando

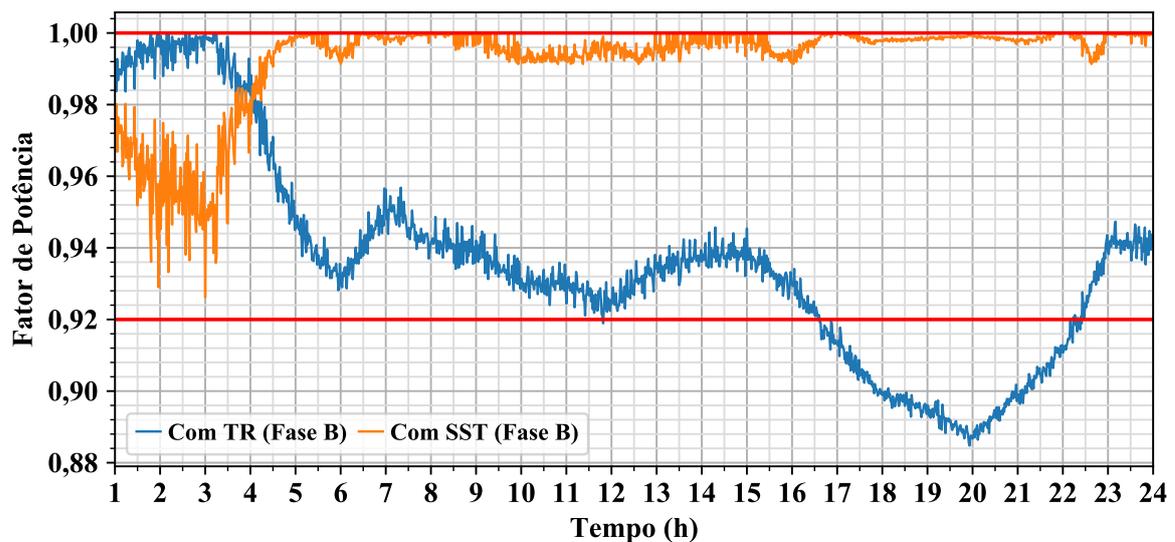
uma clara atuação do controle no período das 18h às 21h.

Figura 38 – Fator de potência da subestação (Fase A)



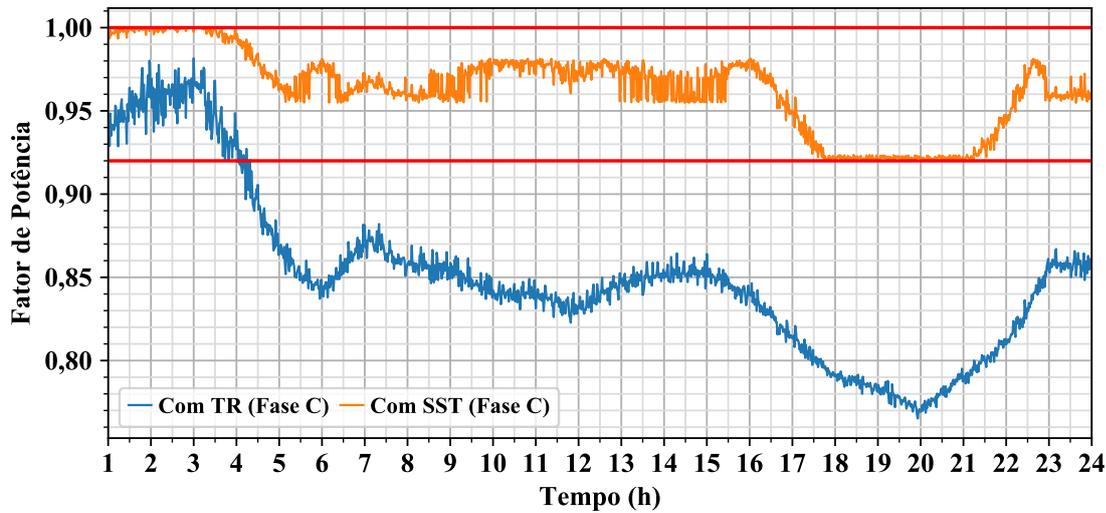
A Figura 38 apresenta o fator de potência na fase B da subestação. Neste caso, o fator de potência apresenta uma grande variação apenas nas primeiras horas, após isso mantém-se próximo a unidade.

Figura 39 – Fator de potência da subestação (Fase B)



A Figura 40 apresenta o fator de potência na fase C da subestação. O controle atua em diversos períodos como às 6h, das 13h às 15h e, nitidamente, das 18h às 21h, fazendo com o que o fator de potência não fique abaixo do limite inferior.

Figura 40 – Fator de potência da subestação (Fase C)



4.6 Resumo dos testes

A Tabela 8 apresenta um breve resumo dos testes realizados, indicando se foi possível, ou não, obter as correções desejadas.

Tabela 8 – Resumo dos testes

Teste	Regulação de tensão em BT (1 p.u)	Aumento nos níveis de tensão em MT	Correção de violações de tensão em MT	Correção do Fator de Potência da Subestação
1	Sim	Sim	Sim	Sim
2	Sim	Sim	Sim	Sim
3	Sim	Sim	Sim	Sim
4	Sim	Sim	Parcialmente	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor.

Apenas no Teste 4 a correção das violações de tensão em MT foram parciais. A Tabela 9 mostra um resumo do Teste 4, apresentando o resultado obtido em cada barra.

Tabela 9 – Resumo do teste 4

Barra	Fase	Baixa Tensão		Média Tensão
		Regulação em BT (1 p.u)	Elevou a tensão	Correção das violações de tensão
634	A	Sim	Sim	Parcialmente
	B	Sim	Sim	Manteve dentro dos limites
	C	Sim	Sim	Pequena violação às 20h
645	B	Sim	Sim	Manteve dentro dos limites
671	A	Sim	Sim	Parcialmente
	B	Sim	Sim	Passou a haver violação
	C	Sim	Sim	Parcialmente

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 Considerações Finais

5.1 Conclusões

O advento das *Smart Grids* trás consigo a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias para melhorar a qualidade da energia elétrica. O transformador de distribuição convencional, apesar de ser um equipamento bem consolidado nas redes elétricas, por ser robusto e eficiente, passa a perder espaço nas *Smart Grids*, por ser um dispositivo passivo, ou seja, que não permite que seja controlado. Já o transformador de estado sólido, além de desempenhar as funções do transformador convencional, destaca-se por sua capacidade de controle de potência reativa, o que contribui de maneira eficaz à regulação de tensão e correção de fator de potência.

Ao longo dos anos, diversos estudos estão sendo realizados com os SSTs, buscando desenvolvê-los e aprimorá-los, comprovando a sua relevância na implementação das *Smart Grids*. Entretanto, apesar dos diversos benefícios, sua implementação ainda é um desafio, principalmente devido ao custo, eficiência e confiabilidade. Tais fatores devem-se ao elevado número de componentes eletrônicos e semicondutores que ainda apresentam custo elevado e eficiência a ser melhorada.

Com a metodologia proposta, pode-se desenvolver um modelo funcional para o SST, a fim de utilizá-lo na plataforma do OpenDSS[®] para validar as funcionalidades desse equipamento. Além disso, adotando as restrições impostas aos inversores de frequência, quanto a compensação de potência reativa, foi possível definir limites de operação para o SST, a fim de realizar as devidas compensações sem ultrapassar seus limites operacionais.

A estratégia de controle VVC utilizada, proporcionou os ajustes necessários de tensão e fator de potência, salvo quando o SST atingia seu limite de operação. Em alguns casos, o SST não foi capaz de corrigir os níveis de tensão ou, até mesmo, ultrapassou o limite máximo de tensão permitido pelo PRODIST. Apesar desse equipamento ser capaz de desempenhar diversas funções presentes em outros equipamentos de maneira satisfatória, sozinho não é capaz de atender a todas as necessidades de uma rede grande. No caso apresentado na Figura 27, por exemplo, a tensão ultrapassa o limite máximo permitido, havendo a necessidade da atuação de outros dispositivos como o regulador de tensão.

5.2 Trabalhos publicados

O desenvolvimento desse trabalho proporcionou as seguintes publicações:

- **Trabalho publicado em anais de eventos (Resumo Expandido)**

1. LONDERO, R. P.; MELLO, A. P. C. Transformador de Estado Sólido em Redes de Distribuição de Energia com Recursos Energéticos Distribuídos In: **Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, 2018, Santana do Livramento. Anais do 10º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão da UNIPAMPA., 2018. v.2.

- **Trabalho completo aceito para publicação em anais de eventos**

1. LONDERO, R. P.; MELLO, A. P. C; SILVA, G. S. Comparison between conventional and solid state transformers in smart distribution grids. In: **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America**, 2019. Gramado, RS, Brazil.

5.3 Propostas de trabalhos futuros

Como sugestões de trabalhos futuros enumeram-se as seguintes abordagens:

1. Implementar uma técnica de otimização do controle do SST;
2. Implementar uma técnica para ajuste do passo de incremento ΔQ , a fim de estimar valores adequados de incremento e otimizar o tempo de execução do controle;
3. Utilizar técnicas para estimar os pontos críticos para instalar SSTs;
4. Avaliar o comportamento do SST em redes maiores, juntamente com outros dispositivos de regulação;
5. Otimizar a implementação da modelagem proposta no OpenDSS®.
6. Realizar uma análise econômica, comparando custos e impactos econômicos na realização da troca desses transformadores.

Referências

- Bottrell, N.; Prodanovic, M.; Green, T. C. Dynamic stability of a microgrid with an active load. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 28, n. 11, p. 5107–5119, nov. 2013. ISSN 0885-8993.
- BROOKS, J. L. **Solid state transformer concept development**. Naval Material Command, Civil Engineering Laboratory, Naval Construction Battalion Center, Port Hueneme, CA, 1980.
- CARNE, G. D. et al. Frequency-Based Overload Control of Smart Transformers. **IEEE Eindhoven PowerTech**, p. 1–5, 2015.
- CARNE, G. D. et al. Load Control Using Sensitivity Identification by Means of Smart Transformer. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 4, p. 2606–2615, jul. 2018.
- CARNE, G. D. et al. Reverse Power Flow Control in a ST-Fed Distribution Grid. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 9, n. 4, p. 3811–3819, 2018. ISSN 19493053.
- CARNE, G. D.; LISERRE, M.; VOURNAS, C. On-Line Load Sensitivity Identification in LV Distribution Grids. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 32, n. 2, p. 1570–1571, 2017.
- CHEN, Q. et al. Autonomous energy management strategy for solid-state transformer to integrate PV-assisted EV charging station participating in ancillary service. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 13, n. 1, p. 258–269, fev. 2017. ISSN 1551-3203.
- COSTA, F. et al. The Smart Transformer. **IEEE Power Electronics Magazine**, n. June, p. 56–67, 2017.
- DIAS, T. L. **Estudo de Transformadores de Estado Sólido para Conexão de Sistemas de Geração Distribuída à Rede de Distribuição de Energia Elétrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- EICHKOFF, H. S. Análise da Geração Distribuída para o Controle de Tensão e Potência Reativa em Sistemas Modernos de Distribuição. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Gramado, RS, Brasil: CBENS, 2018.
- FUCHS, E.; MASOUM, M. **Power Quality in Power Systems and Electrical Machines**. [S.l.]: Elsevier Science, 2011. ISBN 9780080559179.
- GODOI, L. A. A. **Transformador de Estado Sólido no Controle do Fluxo de Potência em Redes de Distribuição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, 2018.
- GUERRA, G.; MARTINEZ-VELASCO, J. A. A solid state transformer model for power flow calculations. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 89, p. 40 – 51, 2017. ISSN 0142-0615.

- HUANG, A. Q.; BURGOS, R. Review of Solid-State Transformer Technologies and Their Application in Power Distribution Systems. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, v. 1, n. 3, p. 186–198, 2013.
- HUBER, J. E.; KOLAR, J. W. Solid-state transformers: On the origins and evolution of key concepts. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 10, n. 3, p. 19–28, set. 2016. ISSN 1932-4529.
- HUBER, J. E.; KOLAR, J. W. Applicability of Solid-State Transformers in Today's and Future Distribution Grids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 00, n. 0, p. 1–10, 2017.
- KERSTING, W. H. Radial distribution test feeders. In: **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting**. Columbus, OH, USA: IEEE, 2001. v. 2. ISBN 0-7803-6672-7.
- KOLAR, J. W.; ORTIZ, G. I. Solid State Transformer Concepts in Traction and Smart Grid Applications. **Tutorial at the 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (ECCE Europe 2012)**, Novid Sad Serbia, 2015.
- KUMAR, C. et al. Sizing and SOC Management of a Smart-Transformer-Based Energy Storage System. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 65, n. 8, p. 6709–6718, 2018. ISSN 02780046.
- LAMB, J.; MIRAFZAL, B. Active and reactive power operational region for grid-tied inverters. In: **IEEE 7th Int. Symp. Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)**. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2016. p. 1–6. ISSN 2329-5767.
- LAMB, J.; MIRAFZAL, B. Grid-interactive cascaded h-bridge multilevel converter pq plane operating region analysis. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 53, n. 6, p. 5744–5752, nov. 2017. ISSN 0093-9994.
- LIU, B. et al. Solid state transformer application to grid connected photovoltaic inverters. In: **International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)**. Chengdu, China: IEEE, 2016. p. 248–251. ISBN 978-1-4673-8903-7.
- MADRUGA, E. P. **Otimização de níveis de tensão nas redes de distribuição considerando a alocação de bancos de capacitores e reguladores de tensão**. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.
- MELLO, A. P. C. de. **Estratégia de controle Volt/VAr coordenado para sistemas de distribuição inteligentes**. 196 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.
- PEREIRA, P. R. d. S. **Métodos para Otimização dos ajuste dos Reguladores de Tensão e Zonas de Tap em Sistemas De Distribuição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- PITEL, M. K. P. E. I. Analysis and design of electronic transformers for electric power distribution system. In: **IEEE Power Electronics Society**. [S.l.]: IEEE, 1999. v. 14, n. 6. ISBN 10.1109/63.803407.

- RASHIDI, M.; BANI-AHMED, A.; NASIRI, A. Application of a multi-port solid state transformer for volt-var control in distribution systems. In: **IEEE Power Energy Society General Meeting**. Chicago, IL, USA: IEEE, 2017. p. 1–4. ISSN 1944-9933.
- REGO, D. J. P. **Transformador Eletrônico de Potência como Solução para a Regulação da Tensão e Frequência em Redes Elétricas Isoladas Engenharia Eletrotécnica e de Computadores Júri**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) — Técnico Lisboa, Lisboa, 2015.
- RODRIGUES, W. et al. Aplicação do Transformador de Estado Sólido em Sistemas de Distribuição. In: **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**. Natal, RN, Brasil: SBSE, 2016.
- SHAH, D.; CROW, M. L. Online volt-var control for distribution systems with solid-state transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 31, n. 1, p. 343–350, fev. 2016. ISSN 0885-8977.
- She, X. et al. On integration of solid-state transformer with zonal DC microgrid. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3, n. 2, p. 975–985, jun. 2012. ISSN 1949-3053.
- SHEN, Z.; BARAN, M. E. Gradient based centralized optimal volt/var control strategy for smart distribution system. In: **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conf. (ISGT)**. Washington, DC, USA: IEEE, 2013. p. 1–6.
- WOLF, M. **Design and implementation of a modular converter with application to a solid state transformer**. 183 p. Dissertação (Master of Science in Engineering) — University of Stellenbosh, Matielang, South Africa, 2009.