



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Alocação Heurística de TCSCs em Linhas de Transmissão para Melhoria de Perfil de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência

Santiago Machado Pereira

João Monlevade, MG
2022

Santiago Machado Pereira

Alocação Heurística de TCSCs em Linhas de Transmissão para Melhoria de Perfil de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P436a Pereira, Santiago Machado.
Alocação heurística de TCSCs em linhas de transmissão para melhoria de perfil de tensão em sistemas elétricos de potência. [manuscrito] / Santiago Machado Pereira. - 2022.
65 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Energia elétrica - Transmissão. 2. Heurística. 3. Sistemas de energia elétrica. I. Barbosa, Carlos Henrique Nogueira de Resende. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.31

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Santiago Machado Pereira

Alocação Heurística de TCSCs em Linhas de Transmissão para Melhoria de Perfil de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovada em 14 de janeiro de 2022

Membros da banca

Doutor - Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutor - Mateus Antunes Oliveira Leite - (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais)
Doutor - Juan Carlos Galvis Manso - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 29/01/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/01/2022, às 16:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0273286** e o código CRC **C98ABA21**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.001055/2022-48

SEI nº 0273286

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: - www.ufop.br

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por me capacitar e me dar saúde para buscar meus objetivos.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais Antônio e Elizete por todo apoio dado.

Agradeço ao professor Dr. Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa pela disponibilidade em me ajudar a realizar este trabalho.

Também agradeço todos os amigos e professores que de alguma forma contribuíram nesta etapa da minha vida.

Resumo

Um sistema de transmissão de energia elétrica sobrecarregado pode resultar em valores inapropriados de tensão nas barras e altas perdas elétricas em suas linhas. Neste contexto, a alocação de dispositivos de compensação reativa, como o Compensador Série Controlado a Tiristor (TCSC), pode ser eficaz para minimizar essas condições inadequadas. Para que o compensador realmente traga melhorias ao sistema elétrico, esse deve ser alocado no local correto. Este trabalho apresenta uma heurística em conjunto com um índice de sensibilidade baseado na matriz Jacobiana do fluxo de potência, que tem como objetivo a determinação da localização ideal do TCSC. O índice de sensibilidade e a heurística foram implementados no software MATLAB. Testes foram realizados nos sistemas de 6 barras, IEEE-14 e IEEE-30. A metodologia foi validada pela confirmação da melhoria dos níveis de tensão nas barras com presença de subtensão de todos os sistemas testados.

Palavras-chave: Índice de sensibilidade, Compensação reativa, Energia elétrica – transmissão, Sistemas de energia elétrica.

Abstract

An overloaded electrical power transmission system can result in inappropriate voltage values on the buses and high electrical losses in your lines. In this context, the allocation of reactive compensation devices, such as the Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC), can be effective in minimizing these inappropriate conditions. For the compensator to really bring improvements to the electrical system, it must be placed in the right place. This work presents a heuristic together with a sensitivity index based on the Jacobian power flow matrix, which aims to determine the ideal location of the TCSC. The sensitivity index and the heuristic were implemented in the MATLAB software. Tests were performed on 6-bus, IEEE-14 and IEEE-30 systems. The methodology was validated by confirming the improvement of voltage levels in buses with undervoltage in all systems tested.

Keywords: Sensitivity Index, Reactive Compensation, Electric Power – Transmission, Electric Power Systems.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Modelo π equivalente de uma linha de transmissão.	6
Figura 2 – Modelo de linha curta.	7
Figura 3 – TCSC conectado ao sistema.	14
Figura 4 – Reatância do TCSC em função do ângulo de disparo (α).	15
Figura 5 – TCSC operando no modo de tiristor bloqueado.	16
Figura 6 – TCSC operando no modo de tiristor by-pass.	16
Figura 7 – TCSC operando no modo capacitivo.	17
Figura 8 – TCSC operando no modo indutivo.	17
Figura 9 – TCSC instalado em Raipur-Índia. 1- Reator; 2- Banco de capacitores; 3- Tiristores.	18
Figura 10 – Interconexão Rourkela-Raipur.	19
Figura 11 – TCSC conectado ao sistema.	21
Figura 12 – Fluxograma da heurística desenvolvida para alocação de TCSC em linhas de transmissão.	24
Figura 13 – Diagrama unifilar do sistema 6 Barras.	25
Figura 14 – Diagrama unifilar do sistema IEEE-14.	26
Figura 15 – Diagrama unifilar do sistema IEEE-30.	27
Figura 16 – Tensão nas barras PQ do sistema 6 Barras.	29
Figura 17 – Tensão nas barras PQ do sistema IEEE-14.	31
Figura 18 – Tensão nas barras PQ do sistema IEEE-30.	34

Lista de tabelas

Tabela 1 – Custos de compensadores de energia reativa.	19
Tabela 2 – Sensibilidade das linhas do sistema de 6 Barras.	29
Tabela 3 – Tensão na barra 5 do sistema de 6 barras.	29
Tabela 4 – Desvio de tensão do sistema de 6 barras.	30
Tabela 5 – Perda de potência ativa do sistema 6 barras.	30
Tabela 6 – Sensibilidade das linhas do sistema IEEE-14.	32
Tabela 7 – Tensão na barra 14 do sistema IEEE-14.	32
Tabela 8 – Desvio de tensão do sistema IEEE-14.	32
Tabela 9 – Perda de potência ativa do sistema IEEE-14.	33
Tabela 10 – Sensibilidade das linhas do sistema IEEE-30.	35
Tabela 11 – Tensão na barra 30 do sistema de IEEE-30.	36
Tabela 12 – Desvio de tensão do sistema IEEE-30.	36
Tabela 13 – Perda de potência ativa do sistema IEEE-30.	36
Tabela 14 – Compensação de 20%. Sistema 6 barras.	40
Tabela 15 – Compensação de 30%. Sistema 6 barras.	40
Tabela 16 – Compensação de 40%. Sistema 6 barras.	41
Tabela 17 – Compensação de 50%. Sistema 6 barras.	41
Tabela 18 – Compensação de 60%. Sistema 6 barras.	42
Tabela 19 – Compensação de 70%. Sistema 6 barras.	42
Tabela 20 – Compensação de 20%. Sistema IEEE-14.	43
Tabela 21 – Compensação de 30%. Sistema IEEE-14.	44
Tabela 22 – Compensação de 40%. Sistema IEEE-14.	45
Tabela 23 – Compensação de 50%. Sistema IEEE-14.	46
Tabela 24 – Compensação de 60%. Sistema IEEE-14.	47
Tabela 25 – Compensação de 70%. Sistema IEEE-14.	48
Tabela 26 – Compensação de 20%. Sistema IEEE-30.	49
Tabela 27 – Compensação de 30%. Sistema IEEE-30.	51
Tabela 28 – Compensação de 40%. Sistema IEEE-30.	53
Tabela 29 – Compensação de 50%. Sistema IEEE-30.	55
Tabela 30 – Compensação de 60%. Sistema IEEE-30.	57
Tabela 31 – Compensação de 70%. Sistema IEEE-30.	59
Tabela 32 – Dados das barras do sistema 6 Barras.	61
Tabela 33 – Dados das linhas do sistema 6 Barras.	61
Tabela 34 – Dados das barras do sistema IEEE-14.	62
Tabela 35 – Dados das linhas do sistema IEEE-14.	63
Tabela 36 – Dados dos barras do sistema IEEE-30.	64

Tabela 37 – Dados das linhas do sistema IEEE-30. 65

Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
IEEE	Institute of Electrical and Eletronics Engineers
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MVA	Mega Volt Ampere
MW	Mega Watts
ONS	Operador Nacional do Sistema
p.u	por unidade
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SVC	Static Var Compensator
TCR	Thyristor Controlled Reactor
TCSC	Thyristor Controlled Series Compensator

Lista de símbolos

B	Susceptância [B]
G	Condutância [S]
gc	Grau de compensação do TCSC
k	Barra de origem
m	Barra de destino
Pd	Potência ativa demandada [MW]
Pg	Potência ativa gerada [MW]
Qd	Potência reativa demandada [MVar]
Qg	Potência reativa gerada [MVar]
R	Resistência [Ω]
V	Tensão [V]
X_{TCSC}	Reatância do TCSC [Ω]
X	Reatância [Ω]

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Geral	2
1.2.2	Específicos	3
1.3	Estado da Arte	3
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1	Compensação Reativa	5
2.2	Linha de Transmissão	5
2.3	Fluxo de Potência	7
2.3.1	Método de Newton Raphson	8
2.3.1.1	Matriz Jacobiana	9
2.3.2	Algoritmo Método Iterativo de Newton-Raphson	11
2.3.2.1	Validação do Algoritmo Implementado	12
2.3.3	Perdas de Potência Ativa	12
2.4	Dispositivos FACTS	12
2.5	TCSC	13
2.5.1	Princípio de Funcionamento	14
2.5.2	Modos de Operação do TCSC em Estado Estacionário	15
2.5.3	Aplicação	17
2.5.4	Exemplo de Aplicação Real do TCSC	18
2.5.5	Desvantagens do TCSC	19
3	METODOLOGIA	20
3.1	Modelagem Estática do TCSC	20
3.2	Sensibilidade	21
3.3	Heurística de Alocação do TCSC	22
3.4	Sistemas de Teste	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1	Considerações	28
4.2	Solução do Sistema de 6 Barras	28
4.3	Solução do Sistema IEEE-14	30
4.4	Solução do Sistema IEEE-30	33

5	CONCLUSÕES	37
	REFERÊNCIAS	38
	APÊNDICE A – SISTEMA 6 BARRAS	40
A.1	Magnitude de tensão nas barras do sistema 6 barras quando há um TCSC alocado de forma individual em cada uma das linhas do sistema.	40
	APÊNDICE B – SISTEMA IEEE-14	43
B.1	Magnitude de tensão nas barras do sistema IEEE-14 quando há um TCSC alocado de forma individual em cada uma das linhas do sistema.	43
	APÊNDICE C – SISTEMA IEEE-30	49
C.1	Magnitude de tensão nas barras do sistema IEEE-30 quando há um TCSC alocado de forma individual em cada uma das linhas do sistema.	49
	ANEXO A – SISTEMA 6 BARRAS	61
A.1	Dados das Barras	61
A.2	Dados das Linhas	61
	ANEXO B – SISTEMA IEEE-14	62
B.1	Dados das Barras	62
B.2	Dados das Linhas	63
	ANEXO C – SISTEMA IEEE-30	64
C.1	Dados dos Barras	64
C.2	Dados das Linhas	65

1 Introdução

Um sistema elétrico de potência (SEP) é responsável pela conversão e pelo transporte de energia até os pontos de consumo. A literatura costuma dividi-lo em três grandes blocos (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010):

- **Geração:** perfaz a função de converter alguma forma de energia em energia elétrica;
- **Transmissão:** transporta a energia elétrica das unidades geradoras até as subestações de subtransmissão ou distribuição;
- **Distribuição:** distribui a energia elétrica recebida do sistema de transmissão a todos os consumidores.

Dos sistemas de transmissão, exige-se elevada confiabilidade, uma vez que são os responsáveis pelo atendimento dos grandes centros de consumo. Uma parte fundamental deste bloco, as linhas de transmissão, têm como objetivo realizar a conexão entre as usinas geradoras e os sistemas de subtransmissão e distribuição. Este objetivo é atendido por meio de rigorosos critérios de projeto e de operação (STEVENSON, 1974; KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

A crescente demanda de carga tem feito com que os SEPs operem cada vez mais próximos de seus limites de carregamento. Tal fato tem gerado preocupações referentes à sua segurança em relação à magnitude de tensão em suas barras. A princípio, estes problemas podem ser resolvidos a longo prazo, por meio da expansão dos sistemas de transmissão, entretanto, para este tipo de solução, devem-se considerar as restrições econômicas e ambientais impostas à construção de novas linhas de transmissão. A curto prazo, o corte de carga pode se tornar a única alternativa para solucionar estes problemas, porém, este procedimento traz impacto financeiro sobre os agentes do sistema (TORTELLI, 2010; NATURESA, 2001).

Alguns recursos como banco de capacitores e transformadores defasadores têm sido utilizados para reduzir os problemas decorrentes do crescimento da demanda. A evolução da eletrônica de potência e a criação dos tiristores capazes de operar em altos níveis de tensão, permitindo a sua aplicação nos SEPs, possibilitou o avanço dos equipamentos tradicionais e assim o desenvolvimento dos dispositivos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*). Estes dispositivos podem elevar a capacidade de transferência de potência ativa do sistema por meio da redução da potência reativa que flui pelas linhas, além de manter o fluxo de potência sobre linhas designadas. Neste contexto, o uso destes dispositivos permite que o SEP opere de forma segura com uma capacidade de transmissão próxima para a qual o sistema foi planejado (ANTUNEZ, 2014).

Com essas vantagens, surge outro problema: alocar os FACTS de maneira a otimizar o rendimento do dispositivo e conseqüentemente o rendimento do sistema. Neste contexto, o presente trabalho busca propor um método para alocação de TCSC (*Thyristor Controlled Series Compensation*), um tipo de dispositivo FACTS, em linhas de transmissão de sistemas sobrecarregados, de forma a garantir que a tensão em suas barras permaneça dentro dos limites preestabelecidos.

1.1 Motivação

A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, por meio do Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) que trata da qualidade da energia elétrica, estabelece faixas de classificação de tensões em regime permanente. Os sistemas que operam em alta tensão (superior a 69kV e inferior a 230 kV) e sistemas em extra alta tensão (acima de 230 kV) devem operar com tensão entre 95% e 105% da tensão nominal (ANEEL, 2016).

Conforme a carga do sistema aumenta durante o dia, as magnitudes das tensões nas barras do sistema decaem e este decaimento é usualmente corrigido por meio de chaveamento de capacitores e aumento da geração de reativos (NATURESA, 2001).

Capacitores fixos têm sido utilizados há décadas e são a forma mais simples de se realizar a compensação série a fim de se melhorar os níveis de tensão e aumentar a capacidade de transferência da potência ativa pelo fato da compensação reduzir a parcela de potência reativa. Contudo, o avanço na área da eletrônica de potência, permitiu o uso de controladores FACTS, que propiciam um rápido controle dos fluxos de potência nas linhas de transmissão, redução da parcela de potência reativa, amortecimento de oscilações de baixa frequência (0,2 Hz), além de melhorar o perfil de tensão do sistema. O TCSC é um dos principais controladores utilizados com esse propósito (CASTRO, 2005).

Para que a compensação de reativos realmente traga melhorias ao SEP, é necessário que o dispositivo de compensação utilizado para tal fim, no caso o TCSC, seja inserido no local correto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Este Trabalho busca apresentar uma técnica de alocação de TCSC em linhas de transmissão baseada na matriz jacobiana do fluxo de potência, visando uma operação mais segura, no que tange à manutenção dos limites de tensão nas barras, conforme o Módulo 8 do PRODIST ($\pm 0,05$ pu.).

1.2.2 Específicos

- Estudar e compreender a modelagem do dispositivo TCSC aplicado às linhas de transmissão;
- Compreender os modos de operação do TCSC;
- Avaliar uma técnica de alocação ótima de TCSC em redes de transmissão e implementá-la em ambiente computacional;
- Implementar o fluxo de potência via método de Newton-Raphson;
- Simular e avaliar a influência da alocação do TCSC sobre a magnitude de tensão nas barras e redução de perdas ativas em sistemas de teste.

1.3 Estado da Arte

Com o desenvolvimento dos dispositivos FACTS e sabendo da sua relevante capacidade para solucionar problemas relacionados com a queda da magnitude de tensão das barras dos sistemas de potência devido a alta demanda de carga, surge a necessidade de novos estudos relacionados à alocação ótima destes dispositivos, visando extrair o máximo de benefícios dos mesmos. Neste contexto, buscaram-se para este trabalho referências que tem como objetivo a alocação ótima bem como a análise dos efeitos provenientes do uso de um dispositivo FACTS, o TCSC.

Nadeem et al. (2019) faz uso de TCSC e SVC (*Static Var Compensator*) com intuito de solucionar os problemas de sobrecarga nas linhas de transmissão e baixas tensões nas barras por meio do controle de potência reativa. Os autores utilizam um índice de sensibilidade para encontrar o posicionamento ideal dos dispositivos FACTS e a Otimização por Enxame de Partículas (PSO) para definir o tamanho dos dispositivos usados. O método é aplicado no sistema operando em condições normais e sob contingências severas. Testes realizados em um sistema de 30 barras, com a inserção dos FACTS nas posições ideais mostram que há melhora no perfil de tensão e redução das perdas de potência ativa.

Bansal et al. (2010) utiliza um algoritmo genético para definir o local ótimo para a alocação de TCSC com objetivo de manter as tensões das barras dentro dos limites toleráveis. A localização ideal da instalação do TCSC, assim como a sua capacidade de compensação reativa nominal devem ser obtidas simultaneamente. Posteriormente, são realizados testes em sistemas de 9, 14 e 30 barras. Os resultados obtidos mostram que o algoritmo proposto é um método prático e eficaz para definir a localização ideal do TCSC.

Em Canizares e Faur (1999) são apresentados modelos de estado estacionário de dois controladores FACTS, o SVC e o TCSC, de modo a avaliar seus efeitos sobre o fenômeno de colapso de tensão nos sistemas de potência. Por meio dos resultados encontrados no ponto de colapso, é proposta uma estratégia para definir a localização e a compensação necessária

para aumentar a capacidade de carga do sistema. A estratégia proposta é aplicada em um sistema real para validação dos resultados.

Samimi, Naderi et al. (2012) com objetivo de solucionar congestionamento de linhas de transmissão, apresenta uma análise de sensibilidade para determinar a localização ideal do TCSC e um algoritmo genético para determinar o nível de compensação. A eficácia da abordagem sugerida foi testada no sistema IEEE-14. Resultados obtidos comparando o fluxo de potência antes e após a alocação do TCSC, mostram que houve redução do carregamento em linhas congestionadas após a alocação do TCSC.

Khan et al. (2015) apresenta dois índices, um relacionado ao congestionamento das linhas de transmissão e outro referente às baixas tensões nas barras. Esses índices indicam a melhor localização de TCSC e SVC, de modo que sua alocação traga melhorias relacionadas ao perfil de tensão e a sobrecargas nas linhas. Também é utilizado um dispositivo FACTS que combina a compensação série com a compensação em derivação, o UPFC (*Unified Power Flow Controller*), que tem capacidade de resolver congestionamentos de linhas e baixas tensões nas barras simultaneamente. O algoritmo proposto é avaliado no sistema IEEE-14, utilizando os FACTS em condições normais e em contingências.

Antunez (2014) apresenta uma função objetivo que determina o local específico para instalação de TCSC e SVC, considerando simultaneamente os benefícios dinâmicos, quanto os benefícios em regime permanente causados pela alocação destes dispositivos. São considerados vários fatores, como o investimento, estabilidade transitória do sistema, perdas totais e custo de geração. Uma meta-heurística é implementada e é utilizado o PSAT para realizar os cálculos necessários. Resultados obtidos em sistemas de 9 e 39 barras, mostram que o algoritmo desenvolvido encontra uma boa solução com um baixo custo computacional.

Dado o fato de grande parte das referências utilizarem o TCSC para evitar sobrecarregamento nas linhas de transmissão, utilizá-lo em conjunto com outros dispositivos FACTS como o SVC, ou ainda buscar a localização ideal do dispositivo por meio de algoritmos genéticos, optou-se pelo desenvolvimento de uma heurística em conjunto com um índice de sensibilidade baseado na matriz jacobiana do fluxo de potência, com objetivo de mitigar subtensões nas barras dos sistemas provocadas por sobrecarga.

1.4 Estrutura do Trabalho

O Capítulo 1 contém uma breve introdução ao tema do trabalho, além de motivação, objetivos e o estado da arte sobre diferentes métodos para alocação de TCSC em linhas de transmissão. O Capítulo 2 traz uma breve revisão sobre conceitos teóricos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. O Capítulo 3, apresenta formulação matemática do índice de sensibilidade, a heurística proposta e os sistemas de teste. O Capítulo 4 apresenta testes e resultados. Por fim, o Capítulo 5 trás as conclusões.

2 Fundamentação Teórica

Este capítulo fará uma revisão sobre conceitos abordados no trabalho. Conceitos sobre compensação reativa, linhas de transmissão, fluxo de potência e dispositivos FACTS, em especial o TCSC são apresentados.

2.1 Compensação Reativa

A potência reativa é uma medida de troca de energia entre a fonte e a parte reativa da carga. Os elementos armazenadores de energia, também chamados de reatâncias, não dissipam nem absorvem energia, mas trocam energia, recebendo-a e fornecendo-a com o restante do circuito, dessa forma, a potência reativa é transferida entre carga e fonte e vice-versa (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

A presença da potência reativa é altamente indesejável em um sistema elétrico, já que a sua presença está diretamente associada as variações de tensão presentes no sistema elétrico. Além de exigir cabos condutores com uma seção maior que a necessária para a transmissão de potência ativa, também chamada de potência útil e que realiza trabalho (DIXON et al., 2005; SUHETT, 2008).

A compensação reativa consiste no controle da potência reativa de modo a melhorar o desempenho dos sistemas de potência e mitigar situações indesejáveis que impedem uma operação segura dos SEPs, como níveis de tensão nas barras baixos e altos níveis de perdas ativas. Sendo assim, pode-se afirmar que a compensação de reativos eleva a qualidade de energia (DIXON et al., 2005).

A compensação reativa série e shunt são utilizadas para modificar as características elétricas naturais dos sistemas de potência. Enquanto a compensação shunt altera a impedância equivalente da carga a compensação série utiliza capacitores para diminuir a reatância equivalente de uma linha de transmissão (DIXON et al., 2005).

2.2 Linha de Transmissão

Conforme Monticelli (1983), as linhas em sistemas de potência podem ser representadas pelo modelo π *equivalente*, mostrado na Figura 1. Esse modelo é representado por três parâmetros, sendo dois deles em série, a resistência r_{km} e a reatância x_{km} , que formam a impedância z_{km} , além da susceptância shunt b_{km}^{sh} . A impedância do elemento série é dada por

$$z_{km} = r_{km} + jx_{km} \quad (2.1)$$

enquanto a admitância série é

$$y_{km} = g_{km} + jb_{km} = z_{km}^{-1} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} - j \frac{r_{km} x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (2.2)$$

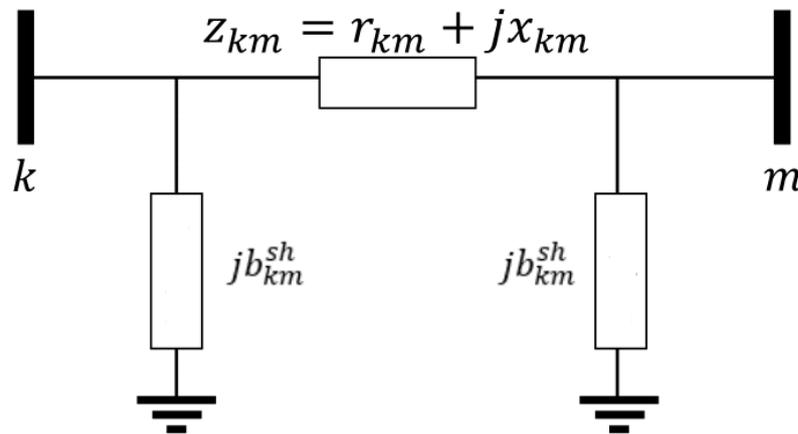
sendo assim, a condutância série g_{km} e a susceptância série b_{km} são dadas, respectivamente, por

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (2.3)$$

$$b_{km} = -j \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (2.4)$$

Quando se representa uma linha pelo modelo π , têm-se r_{km} e x_{km} positivos, o que implica em g_{km} positivo e b_{km} negativo (tipo indutivo). Como o elemento jb_{km}^{sh} é do tipo capacitivo, seu valor é positivo (MONTICELLI, 1983).

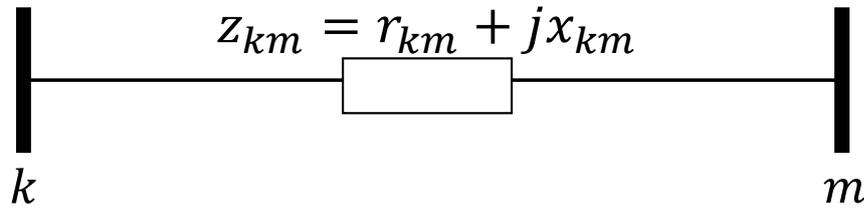
Figura 1 – Modelo π equivalente de uma linha de transmissão.



Fonte: Adaptado de (MONTICELLI, 1983)

Outra representação para as linhas de transmissão é mostrada na Figura 2, neste caso, a susceptância shunt jb_{km}^{sh} é desprezada e o modelo é representado apenas como uma resistência e uma reatância indutiva em série. Este modelo é mais aplicado em linhas curtas, ou seja, linhas com comprimento inferior a 80 km (STEVENSON, 1974).

Figura 2 – Modelo de linha curta.



Fonte: Adaptado de (MONTICELLI, 1983)

2.3 Fluxo de Potência

O cálculo do fluxo de potência consiste na determinação da tensão e ângulo em cada uma das barras de um sistema elétrico, da distribuição dos fluxos de potências ativa e reativa que fluem pelas linhas de transmissão e de outras grandezas de interesse, como perdas elétricas. A modelagem deste tipo de problema é estática, ou seja, a rede é representada por um conjunto de equações e inequações algébricas onde as variações com o tempo são suficientemente lentas para que se possa desconsiderar os efeitos transitórios (MONTICELLI, 1983).

Na formulação mais simples do problema, a cada barra k da rede são associadas quatro variáveis, sendo que duas são valores conhecidos e duas são incógnitas:

- V_k : magnitude da tensão nodal na barra k ;
- θ_k : ângulo da tensão nodal;
- P_k : potência ativa líquida;
- Q_k : potência reativa líquida;

onde o termo *líquida* em P_k e Q_k indicam a diferença entre potência gerada e consumida na barra k .

A depender de quais variáveis entram como dados e quais entram como incógnitas, definem-se três tipos de barras:

- Barra PQ (Barra de carga): P_k e Q_k são dados, enquanto V_k e θ_k devem ser calculados.
- Barra PV (Barra de geração): P_k e V_k são dados, enquanto Q_k e θ_k devem ser calculados.
- Barra $V\theta$ (Barra de referência): V_k e θ_k são dados, já P_k e Q_k são calculados. Esta fornece a referência angular do sistema, além de ser utilizada para fechar o balanço de potência do sistema, levando em conta as perdas de transmissão não conhecidas antes de se ter a solução final do problema.

Com base nas informações mencionadas anteriormente, tem-se que as equações básicas do fluxo de potência, que indicam a injeção de potência ativa e reativa em cada barra, são dadas pelas equações 2.5 e 2.6, respectivamente (MONTICELLI, 1983):

$$P_k(V, \theta) = V_k \left[\sum_{m \in \Omega_k}^n V_m (G_{km} \cos(\theta_{km}) + B_{km} \sen(\theta_{km})) \right], \quad k \in \{PQ, PV\} \quad (2.5)$$

$$Q_k(V, \theta) = V_k \left[\sum_{m \in \Omega_k}^n V_m (G_{km} \sen(\theta_{km}) - B_{km} \cos(\theta_{km})) \right], \quad k \in \{PQ\} \quad (2.6)$$

onde $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$ e representa a diferença angular entre as barras k e m , Ω_k representa o conjunto de barras ligadas à barra k , incluindo a barra de referência, n indica a quantidade de barras do sistema, já G_{km} e B_{km} representam respectivamente, a parte real e imaginária do elemento Y_{km} da matriz de admitâncias.

Devido à grande quantidade de termos e à grandiosidade dos sistemas de potência atuais, o cálculo do fluxo de potência é realizado por meio de métodos computacionais desenvolvidos especialmente para a resolução do sistema de equações e inequações algébricas que compõem o modelo estático da rede.

Entre estes métodos, podemos citar o *Método Iterativo de Newton-Raphson*, que será utilizado neste trabalho. Como o cálculo do fluxo de potência é essencial para o desenvolvimento do presente trabalho, a seguir será explanado como o mesmo é realizado por meio do *Método de Newton-Raphson*.

2.3.1 Método de Newton Raphson

Ao se calcular V_k e θ_k nas barras PQ , e θ_k nas barras PV , tem-se o estado (V_k, θ_k) em todas as barras da rede, possibilitando o cálculo de outras variáveis de interesse, como exemplo, os fluxos de potência e as perdas nas linhas de transmissão.

Para isso, considerando uma rede contendo NPQ barras de carga, NPV barras de geração e uma barra de referência, deve-se montar um sistema de equações algébricas de dimensão $2 NPQ + NPV$, com o mesmo número de incógnitas, de acordo com as equações 2.5 e 2.6 (MONTICELLI, 1983):

$$\Delta P_k = P_k^{esp} - P_k(V, \theta), \quad k \in (PQ, PV) \quad (2.7)$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{esp} - Q_k(V, \theta), \quad k \in (PQ). \quad (2.8)$$

As incógnitas do sistema podem ser agrupadas em um vetor x , de dimensão $2NPQ + NPV$, como mostrado na equação 2.9

$$x = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_{npv+npq} \\ V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_{npq} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

onde θ representa o ângulo das tensões das barras PQ e PV , e V a magnitude das tensões das barras PQ .

As equações 2.7 e 2.8 podem ser colocadas na forma vetorial, como mostrado na equação 2.10, em que ΔP representa as injeções de potência ativa nas barras PQ e PV , e ΔQ as injeções de potência reativa nas barras PQ

$$g(x) = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_{npv+npq} \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_{npq} \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

2.3.1.1 Matriz Jacobiana

Segundo Monticelli (1983) e Zanetta (2006), considerando o vetor de incógnitas dado pela equação 2.9 e o vetor de equações dado pela equação 2.10, pode-se obter a matriz jacobiana, conforme equação 2.11

$$J = \frac{\partial g}{\partial x} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

onde a submatriz H , de dimensão $(PQ + PV, PQ + PV)$, relaciona a injeção de potência ativa com o ângulo das tensões das barras e pode ser obtida por meio das equações

$$H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) \quad (2.12)$$

$$H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 B_{kk} - V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}). \quad (2.13)$$

Já a submatriz N , que relaciona a injeção de potência ativa com a tensão das barras, possui dimensão $(PQ + PV, PQ)$ e pode ser obtida por meio das equações 2.14 e 2.15.

$$N_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \quad (2.14)$$

$$N_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k G_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \quad (2.15)$$

A submatriz M , obtida por meio das equações 2.16 e 2.17, possui dimensão $(PQ, PV + PQ)$ e relaciona a injeção de potência reativa com o ângulo das tensões das barras.

$$M_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = -V_k V_m (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \quad (2.16)$$

$$M_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \quad (2.17)$$

A submatriz L , que relaciona injeção de potência reativa com a tensão das barras, possui dimensão (PQ, PQ) e é formada aplicando as equações 2.18 e 2.19. Por relacionar tensão e potência reativa, que é a base deste trabalho, será dado enfoque nesta submatriz ao longo deste trabalho.

$$L_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) \quad (2.18)$$

$$L_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -V_k B_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) \quad (2.19)$$

2.3.2 Algoritmo Método Iterativo de Newton-Raphson

O algoritmo aplicado à resolução do fluxo de potência por meio do método de Newton-Raphson, exposto por Monticelli (1983), pode ser visto a seguir.

1. Fazer o número de iterações $v = 0$, definir valores iniciais dos ângulos das tensões das barras PQ e PV (comumente o valor de ângulo escolhido é $\theta = 0^\circ$), e as magnitudes das tensões das barras PQ (usualmente o valor definido é $V = 1pu$).
2. Utilizar as equações (2.5) e (2.6) para calcular respectivamente, $P_k^v(V^v, \theta^v)$ para as barras do tipo PQ e PV e $Q_k^v(V^v, \theta^v)$ para as barras do tipo PQ. Determinar a potência líquida ativa ΔP_k^v e reativa ΔQ_k^v por meio das equações (2.7) e (2.8).
3. Testar de convergência: se $\max|\Delta P_k^v| \leq \varepsilon$ e $\max|\Delta Q_k^v| \leq \varepsilon$, significa que o processo convergiu para a solução $P_k^v(V^v, \theta^v)$ e $Q_k^v(V^v, \theta^v)$, caso contrário, passar para o passo 4. Onde (ε) é a taxa de convergência e deve ter um valor muito pequeno que garante a convergência do método.
4. Calcular a matriz jacobiana $J(V^v, \theta^v)$, utilizando as equações (2.12) a (2.19).

$$J(V^v, \theta^v) = \begin{bmatrix} H(V^v, \theta^v) & N(V^v, \theta^v) \\ M(V^v, \theta^v) & L(V^v, \theta^v) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

5. Estipular ΔV^v e $\Delta \theta^v$ por meio da resolução do sistema linear dado pela equação (2.21).

$$\begin{bmatrix} \Delta P(V^v, \theta^v) \\ \Delta Q(V^v, \theta^v) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(V^v, \theta^v) & N(V^v, \theta^v) \\ M(V^v, \theta^v) & L(V^v, \theta^v) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta^v \\ \Delta V^v \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

6. Determinar a nova solução (V^{v+1}, θ^{v+1}) por meio das equações (2.22) e (2.23).

$$\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta \theta^v \quad (2.22)$$

$$V^{v+1} = V^v + \Delta V^v \quad (2.23)$$

7. Incrementar o número de iterações e voltar ao passo 2.

2.3.2.1 Validação do Algoritmo Implementado

No presente trabalho, foi desenvolvido no software Matlab, o algoritmo de Newton-Raphson para o cálculo do fluxo de potência. Garantir que o algoritmo implementado forneça resultados confiáveis é imprescindível para se realizar as simulações requeridas neste trabalho.

Para isso, foram feitas comparações entre os resultados obtidos pelo algoritmo implementado e pelo Matpower, que é um módulo de software desenvolvido no Matlab para solucionar fluxo de potência. Nos sistemas de 6 barras e IEEE-14, que constam na base de dados do Matpower, as grandezas: Tensão e ângulo das barras, fluxo de potência ativa e reativa, perdas de potência ativa e reativa nas linhas, foram comparadas e mostraram resultados equivalentes, garantindo assim, que o algoritmo implementado fornece resultados corretos e está apto para o uso nas simulações necessárias.

2.3.3 Perdas de Potência Ativa

Segundo Monticelli (1983), a equação de perdas ativas em uma linha de transmissão é dada por

$$P_{km}^{perdas} = P_{km} + P_{mk} = g_{km}(V_k^2 + V_m^2 - 2V_kV_m\cos\theta_{km}) \quad (2.24)$$

sendo que k corresponde à barra de origem e m à barra de destino, P_{km} e P_{mk} são os fluxos de potência ativa de uma barra k para uma barra m , e vice-versa.

Conforme Vasconcelos et al. (2011), a compensação reativa é bastante benéfica quando se refere à redução de perdas ativas, mas quando há um superdimensionamento dessa compensação, ocorre um efeito reverso no que diz respeito à redução de perdas. Isto significa dizer que até certo valor de compensação as perdas seguem um comportamento de diminuição, no entanto, após este valor, à medida que se aumenta o nível de compensação, as perdas seguem um comportamento de aumento. Sendo assim, conclui-se que a compensação reativa com objetivo de regulação de tensão, quando superdimensionada pode, ao invés de reduzir, aumentar as perdas.

2.4 Dispositivos FACTS

A produção de chaves eletrônicas capazes de operar com tensão de bloqueio da ordem das dezenas de milhares de Volts e com capacidade de condução de corrente de milhares de Amperes, permitiu o desenvolvimento de conversores de alta potência e, assim, sua operação no sistema elétrico de potência (TORTELLI, 2010).

Componentes eletrônicos começaram a ser utilizados em sistemas de potência nos sistemas de transmissão de corrente contínua em alta tensão (HVDC), do inglês *High*

Voltage Direct Current. Nesse tipo de sistema, são utilizados conversores do tipo CA-CC e CC-CA controlados por tiristores (CASTRO, 2005).

A sigla FACTS, *Flexible Alternating Current Transmission Systems*, define uma série de equipamentos que por meio da eletrônica de potência permite obter um sistema mais confiável, flexível e eficaz. Por flexibilidade, entende-se a capacidade de rápida e contínua alteração dos parâmetros (nível de tensão, impedâncias de transferência e ângulo de transmissão) que controlam a dinâmica de funcionamento de um sistema (TORTELLI, 2010).

Com suas características avançadas de operação, esses conversores proporcionaram meios mais rápidos de controle, baseados na eletrônica de potência para a compensação de reativo. Sendo assim, podem-se destacar algumas vantagens do uso de controladores FACTS em sistemas de potência (CASTRO, 2005):

- regulação de tensão;
- redução de perdas nas linhas de transmissão;
- aumento da capacidade de transmissão;
- amortecimento de oscilações subsíncronas.

Segundo Tortelli (2010), a evolução das chaves de potência definiu duas gerações dos conversores FACTS:

- A primeira, que faz uso de tiristores convencionais ou SCRs, *Silicon Controlled Rectifiers*, que são chaves eletrônicas que possuem controle apenas do disparo, mas que em função de seu baixo custo, aliados com a alta eficiência e capacidade de suportar elevados valores de tensões e corrente, são amplamente empregados até os dias atuais;
- A segunda, que utiliza chaves eletrônicas que possuem capacidade de controle do disparo e do bloqueio, como o GTO, *Gate Turn-off Thyristor* e o IGBT, *Insulated Gate Bipolar Transistor*.

O presente trabalho tem como enfoque a utilização do TCSC, um dispositivo FACTS da primeira geração, o qual será tratado com mais detalhes a seguir.

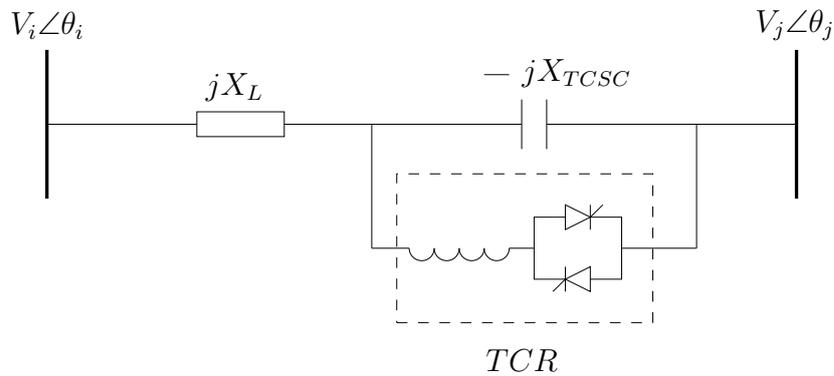
2.5 TCSC

É definido pelo IEEE como um compensador de reatância capacitiva que consiste em um banco de capacitores em série, em paralelo com um reator controlador por tiristor, a fim de fornecer uma reatância capacitiva em série suavemente variável (TORTELLI, 2010).

Apesar da definição destacar apenas a ação capacitiva do TCSC, esse pode emular uma reatância indutiva, sendo assim, o termo C da sigla é tratado como compensador e não capacitor (TORTELLI, 2010).

A configuração mais comum deste dispositivo faz uso de reator controlado por tiristor bidirecional (TCR) em paralelo com um capacitor, como mostra a Figura 3. Por meio dos disparos dos tiristores, pode-se mudar a reatância efetiva da linha (CASTRO, 2005).

Figura 3 – TCSC conectado ao sistema.



Fonte: (CASTRO, 2005).

2.5.1 Princípio de Funcionamento

Conforme Jesus et al. (2003), na frequência fundamental, a reatância equivalente do TCSC é dada pelo paralelo entre a reatância do TCR e a reatância do capacitor fixo X_C . A reatância indutiva do TCR é variável em função do ângulo de disparo (α) e dada por

$$X_{TCR}(\alpha) = x_L \frac{\pi}{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}, \quad x_L \leq x_L(\alpha) \leq \infty \quad (2.25)$$

já a reatância equivalente do TCSC é dada por

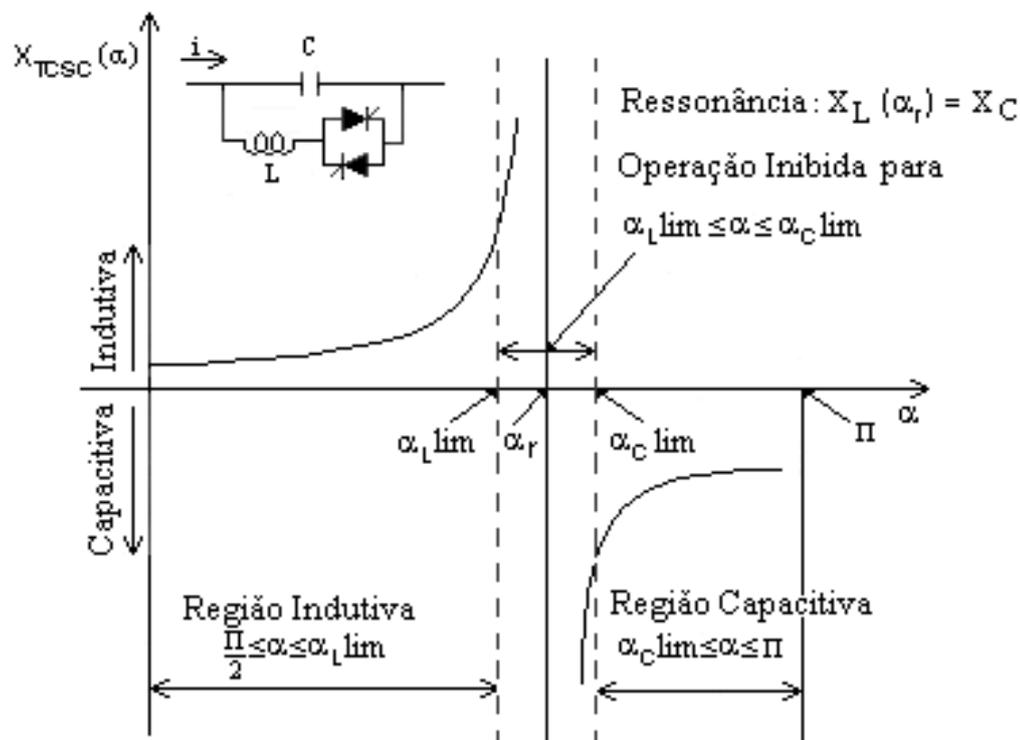
$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_C X_{TCR}(\alpha)}{X_{TCR}(\alpha) - X_C} \quad (2.26)$$

assim temos

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{\pi x_C x_L}{x_C [2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)] - \pi x_L} \quad (2.27)$$

Observa-se na Figura 4 o comportamento da reatância efetiva do TCSC em função da variação do ângulo de disparo. Nota-se que a reatância equivalente pode ser indutiva ou capacitiva. Destaca-se que quando $x_L(\alpha)$ tende a x_C , a reatância entra na faixa de ressonância ($\alpha_{Llim} \leq \alpha \leq \alpha_{Clim}$), a qual deve ser evitada na operação real devido ao valor de reatância teoricamente infinito. O TCSC possui caráter indutivo quando ($90^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{Llim}$) e capacitivo quando ($\alpha_{Clim} \leq \alpha \leq 180^\circ$).

Figura 4 – Reatância do TCSC em função do ângulo de disparo (α).



Fonte: (JESUS et al., 2003)

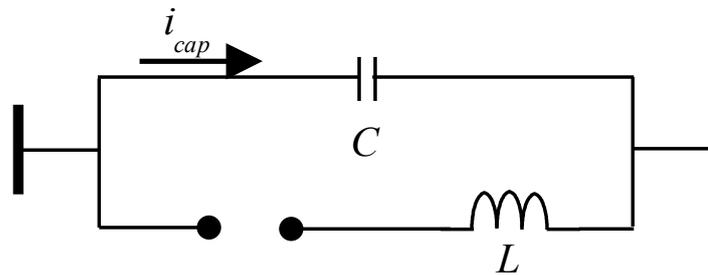
Vale ressaltar o fato de que o TCSC pode entrar em ressonância com a reatância da linha de transmissão, sendo assim, não se deve operar com níveis altos de compensação, portanto, a faixa de variação de compensação do TCSC deve estar limitada entre 20 e 70% da reatância da linha (TORTELLI, 2010).

2.5.2 Modos de Operação do TCSC em Estado Estacionário

Em condições normais de operação, o TCSC possui quatro modos de operação:

- **Tiristor bloqueado:** quando não há pulsos de disparo no tiristor, esse é mantido em estado não condutor, neste modo, à impedância equivalente do TCSC corresponde a reatância do capacitor, ou seja, o TCSC funciona como um capacitor fixo em série, como pode ser observado na Figura 5 (TORTELLI, 2010).

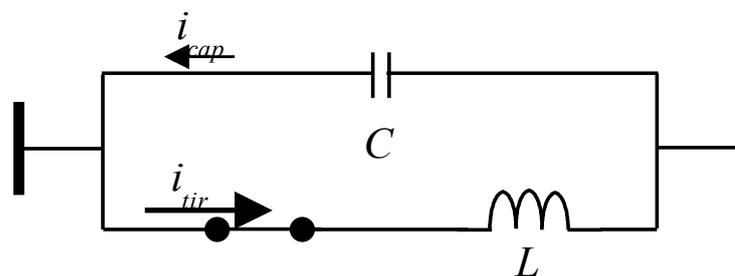
Figura 5 – TCSC operando no modo de tiristor bloqueado.



Fonte: (TORTELLI, 2010).

- **Tiristor em by-pass (condução completa):** neste caso, o tiristor se mantém em condução completa, fazendo com que a maior parte da corrente da linha passe pelo reator, sendo assim, ocasionando uma ação predominantemente indutiva ao TCSC, com reatância indutiva equivalente bem próxima a reatância indutiva nominal do TCSC, conforme apresentado na Figura 6 (KHEDERZADEH; SIDHU, 2006).

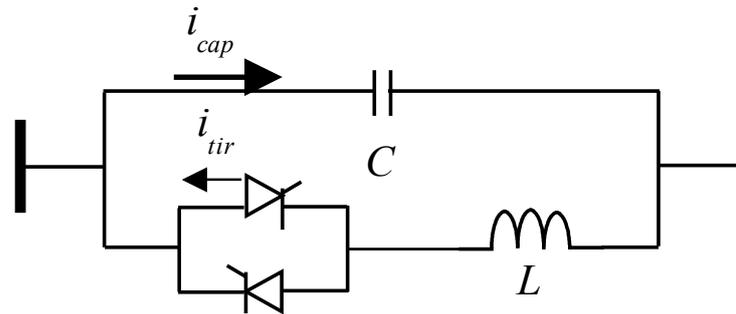
Figura 6 – TCSC operando no modo de tiristor by-pass.



Fonte: (TORTELLI, 2010).

- **Modo capacitivo:** neste modo, o tiristor apresenta um baixo nível de condução e, a reatância capacitiva equivalente resultante é até três vezes maior que a reatância capacitiva nominal do TCSC. Este é o modo normal de operação do TCSC (KHEDERZADEH; SIDHU, 2006). A Figura 7 ilustra essa situação.

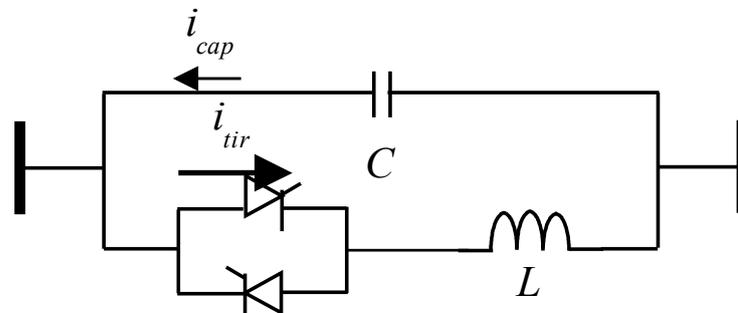
Figura 7 – TCSC operando no modo capacitivo.



Fonte: (TORTELLI, 2010).

- **Modo indutivo:** quando a circulação de corrente no tiristor é alta, o TCSC opera em modo indutivo, com reatância indutiva equivalente maior do que a reatância indutiva nominal do TCSC. O modo indutivo é menos atraente para a operação em regime permanente, pois aumenta a indutância da linha, por isso contrasta com as vantagens associadas à aplicação do TCSC, além de distorcer a onda (KHEDERZADEH; SIDHU, 2006). A Figura 8 ilustra este modo.

Figura 8 – TCSC operando no modo indutivo.



Fonte: (TORTELLI, 2010).

A operação indutiva e capacitiva, onde o tiristor opera com condução parcial, controlada pelo ângulo de disparo, é chamada de modo **Vernier** (TORTELLI, 2010).

2.5.3 Aplicação

Filho (2005) apresenta algumas situações em que a utilização do TCSC é eficaz para mitigar algum problema que impede a operação segura dos SEPs.

- O problema de subtensão em alta carga é comumente corrigido por meio do uso de capacitores shunt ou série, realizando o fornecimento de energia reativa. Uma

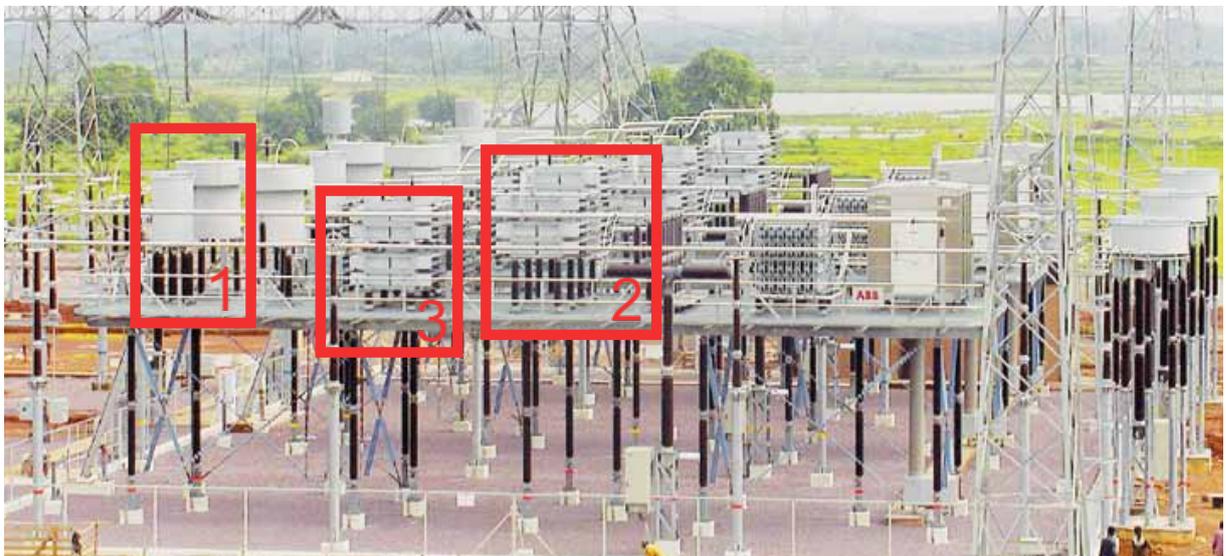
alternativa para mitigar este problema se dá com a utilização do TCSC, por meio da redução da reatância da linha.

- O problema de linha de transmissão acima do limite térmico pode ser corrigido por meio do uso do TCSC, pelo fato do mesmo aumentar a capacidade de transmissão da linha. Neste mesmo contexto, mediante ao ajuste da reatância da linha, pode-se também realizar a distribuição do fluxo de potência em linhas paralelas.
- Altas correntes de falta podem ser limitadas utilizando reator em série, neste caso, pode-se utilizar o TCSC em modo indutivo para realizar esta função.
- Oscilações de baixa frequência podem ser suavizadas também por meio do uso do TCSC.

2.5.4 Exemplo de Aplicação Real do TCSC

Conforme ABB (2010), a *Power Grid Corporation of India Ltd (PGCIL)* comprou dois TCSCs da ABB. Os mesmos foram instalados em uma linha de transmissão dupla de 400 kV e 412 km de extensão que interliga as cidades de Rourkela e Raipur na Índia, a Figura 9 mostra o compensador instalado.

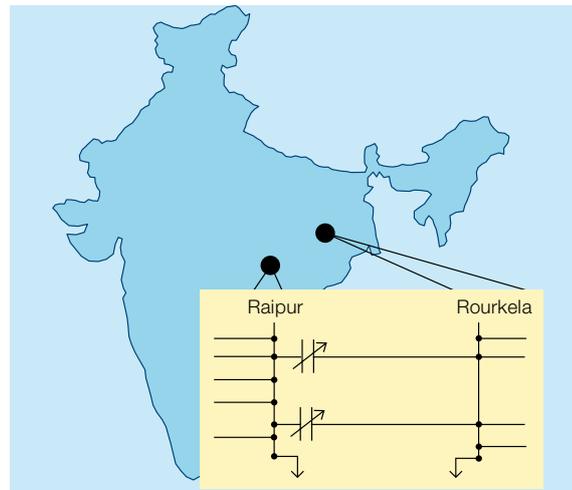
Figura 9 – TCSC instalado em Raipur-Índia. 1- Reator; 2- Banco de capacitores; 3- Tiristores.



Fonte: (ABB, 2010).

O principal objetivo da instalação desses compensadores é permitir a exportação de energia excedente da região oriental para a região ocidental da Índia durante as condições normais de operação e também durante contingências. Os TCSCs estão localizados ao final desta linha de transmissão, na cidade de Raipur, conforme a Figura 10.

Figura 10 – Interconexão Rourkela-Raipur.



Fonte: (ABB, 2010).

A não instalação destes compensadores provoca uma limitação na transferência de energia por esta linha. Simulações realizadas durante a fase de projeto, e posteriormente, confirmadas na fase de comissionamento e teste, provaram a eficácia do TCSC instalado nesta linha (ABB, 2010).

2.5.5 Desvantagens do TCSC

Como o TCSC é instalado em série com uma linha de transmissão, todo o equipamento deve ser instalado em uma plataforma totalmente isolada para a tensão do sistema, já que ambos os terminais estão na tensão da linha. Tal fato, requer que qualquer manutenção no equipamento necessite do desligamento total do mesmo (DIXON et al., 2005).

A construção destas plataformas totalmente isoladas para altos níveis de tensão contribui para outra grande desvantagem do TCSC, o seu alto custo. A Tabela 1 indica os custos de alguns tipos de compensação.

Tabela 1 – Custos de compensadores de energia reativa.

Compensador	Custo (\$/kVAr)
Capacitor shunt	8
Capacitor série	20
TCSC	40

Fonte: Adaptado de (ACHARYA; SODE-YOME; MITHULANANTHAN, 2005).

Nota-se que a compensação série já possui um custo superior quando comparada a compensação shunt, já a compensação por meio do TCSC apresenta o dobro do custo quando comparada com a compensação série com capacitores fixos, mostrando ser uma solução bem custosa financeiramente.

3 Metodologia

Neste capítulo é apresentada a modelagem estática do TCSC. Também é apresentado o índice de sensibilidade, bem como a heurística desenvolvida para a alocação do TCSC para manter a tensão nas barras dos sistemas dentro do limite estabelecido pelo PRODIST. Em seguida são apresentados os sistemas utilizados para se realizar os testes e simulações.

3.1 Modelagem Estática do TCSC

Conforme Sundar e Ravikumar (2012) e Viet et al. (2018), ao considerar o TCSC como uma reatância capacitiva em regime estacionário $-jX_{TCSC}$, temos que a nova reatância eficaz da linha X_{ef} , com a compensação série é dada por:

$$X_{ef} = X_{km} - X_{TCSC} \quad (3.1)$$

Sendo gc , o grau de compensação dado por:

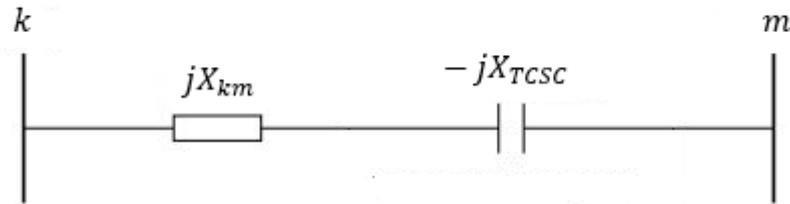
$$gc = \frac{X_{TCSC}}{X_{km}} \quad (3.2)$$

Tem-se que a nova reatância eficaz da linha é:

$$X_{TCSC} = (1 - gc)X_{km} \quad (3.3)$$

A análise da Figura 11 permite uma melhor compreensão da modelagem estática do TCSC.

Figura 11 – TCSC conectado ao sistema.



Fonte: Adaptado de (CASTRO, 2005).

Por meio da equação 3.3, observa-se que a alteração do grau de compensação gc , modifica a reatância da linha.

Segundo Feng e Shrestha (2001), a nova reatância da linha modifica os valores de condutância e susceptância, como mostrado nas equações 3.4 e 3.5 respectivamente.

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{ef}^2} \quad (3.4)$$

$$b_{km} = -\frac{x_{ef}}{r_{km}^2 + x_{ef}^2} \quad (3.5)$$

3.2 Sensibilidade

Segundo Monticelli (1983), em sistemas que operam com tensão superior a 230kV, as sensibilidades das submatrizes H e L são mais acentuadas que as sensibilidades das submatrizes N e M da matriz Jacobiana. De posse dessa informação e sabendo que a submatriz L relaciona potência reativa com a magnitude de tensão nas barras, a análise da mesma pode trazer informações importantes no que diz respeito à compensação de reativos em um sistema de potência.

A linha ideal para a alocação do TCSC pode ser encontrada por meio da análise de sensibilidade da submatriz L . Assim sendo, deve-se, a princípio, calcular as derivadas parciais das injeções de potência reativa em relação à variação da magnitude de tensão em cada uma das barras do sistema de potência. Ou seja, as equações 2.18 e 2.19 devem ser aplicadas a todas as barras do SEP — não somente às barras do tipo PQ, como

preconizado no método de Newton Raphson. Desta forma, obtêm-se a matriz L *expandida*, a qual é dada por

$$L_{exp} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial V_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix}_{(n,n)}. \quad (3.6)$$

Posteriormente, devem-se somar os resultados das derivadas parciais localizadas em cada uma das colunas da matriz L *expandida*, conforme descrito na equação 3.7

$$Sb_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial Q_j}{\partial V_i} \quad (3.7)$$

onde Sb_i é a soma de cada coluna e relaciona a injeção de potência reativa em todas as barras do SEP em relação à variação da magnitude de tensão em uma barra i do mesmo.

Após computar Sb para todos as barras do sistema elétrico, pode-se obter o valor de sensibilidade SL para cada linha do SEP. Uma vez que cada linha está conectada a duas barras, chamadas de k e m , aplica-se a equação 3.8 para determinar a sensibilidade de todas as linhas que compõem o sistema.

$$SL_i = Sb_k + Sb_m \quad (3.8)$$

Vale ressaltar que o sinal do valor de sensibilidade deve ser considerado para definir a linha mais sensível, uma vez que altos valores negativos de sensibilidades são provocados pelos valores contidos na diagonal principal da matriz L_{exp} e indicam forte relação da injeção de potência reativa em uma barra com a magnitude de tensão na mesma barra, sendo que o desejado é uma forte relação entre a variação de potência reativa em todas as barras em relação a uma única barra. Sendo assim, deve-se optar primeiramente por valores positivos.

3.3 Heurística de Alocação do TCSC

A seguir é proposta uma heurística de alocação de TCSC em linhas de transmissão:

1. Aumentar gradualmente a carga inserida no sistema até o mesmo apresentar alguma barra com tensão inferior a 0,95 pu. O aumento de carga é feito somente nas barras onde há o consumo de potência ativa e de forma gradativa em incrementos de 5%, considerando a potência consumida na barra. Feito isso, obter:

- magnitude de tensão nas barras;
- desvio de tensão;

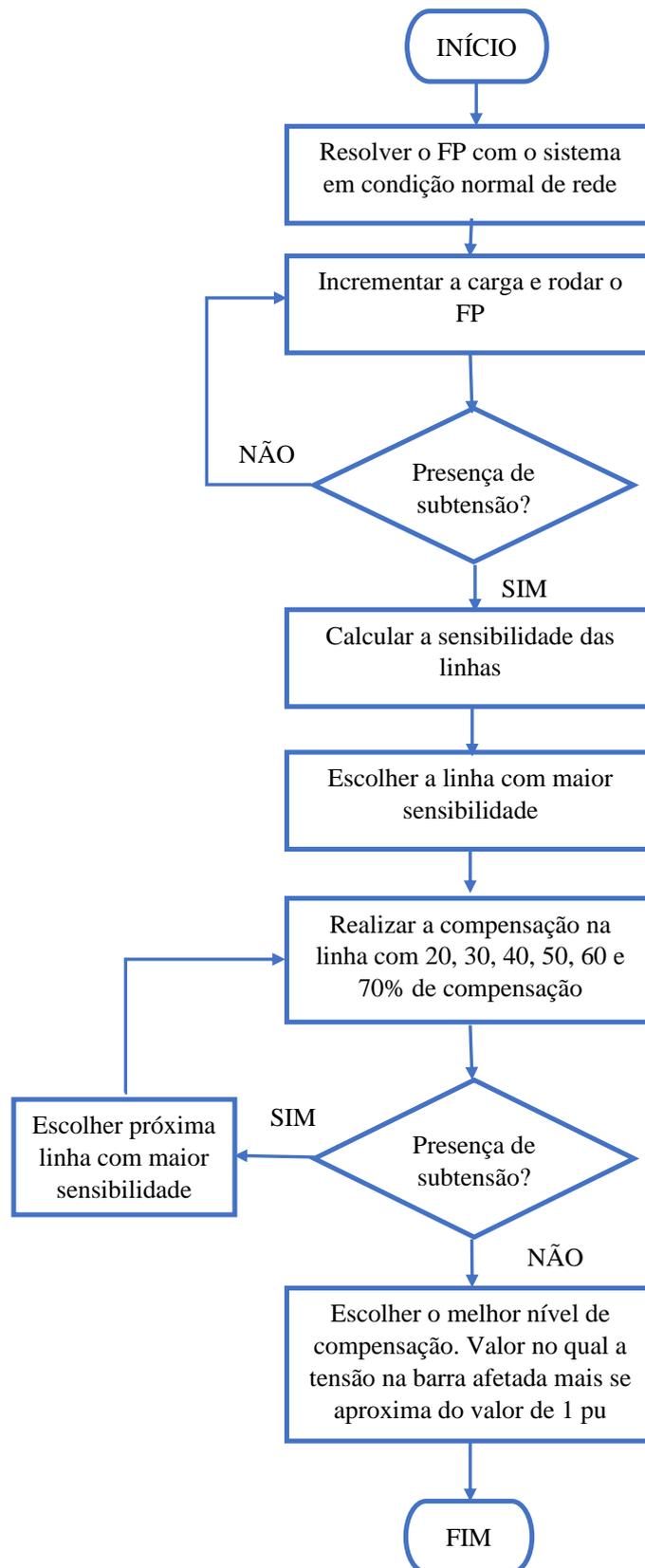
Para medir a dispersão média das tensões das barras, foi calculado o desvio de tensão (DV), medida que quanto menor for, mais adequado e próximo ao valor nominal de 1 pu é o perfil de tensão. O mesmo é calculado de acordo com a equação abaixo, onde N_b é o número de barras e V_i é a tensão na barra i .

$$DV = \frac{\sum_i^{N_b} |1 - V_i|}{N_b} \quad (3.9)$$

- perda de potência ativa.
2. Analisar a sensibilidade das linhas do SEP conforme descrito na seção 3.2.
 3. Alocar um TCSC na linha mais sensível do SEP, iniciando a compensação do TCSC em 20% e incrementar a compensação em intervalos de 10% até o limite de 70% de compensação.
 4. Analisar a alocação realizada no item 3, observando em qual nível de compensação a tensão na barra com subtensão ficou acima de 0,95 pu. O melhor nível de compensação é determinado quando a barra com subtensão apresentar tensão superior a 0,95 pu e valor mais próximo a 1 pu.
 5. Caso a linha escolhida no item anterior não alcance o objetivo de resolver o problema de subtensão na barra afetada, escolher a próxima linha com maior sensibilidade e voltar ao item 2. Este processo deve se repetir até a alocação do TCSC em uma linha manter a tensão acima de 0,95 pu na barra acometida pela subtensão.

É apresentado na Figura 12 o fluxograma da heurística proposta.

Figura 12 – Fluxograma da heurística desenvolvida para alocação de TCSC em linhas de transmissão.



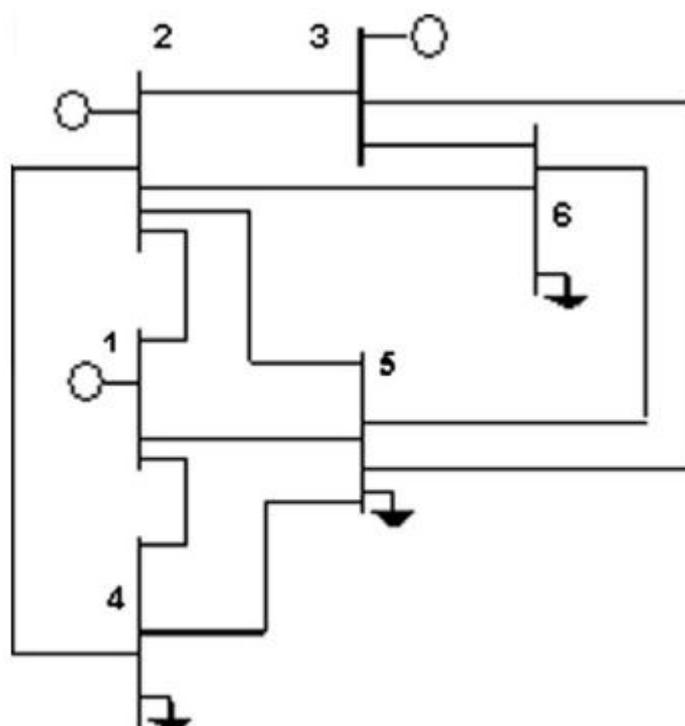
Fonte: Do autor.

3.4 Sistemas de Teste

Neste trabalho, três sistemas de teste serão utilizados para avaliar a heurística proposta. O sistema 6 barras, IEEE-14 e IEEE-30. Informações dos mesmos podem ser consultados nos Anexos deste trabalho.

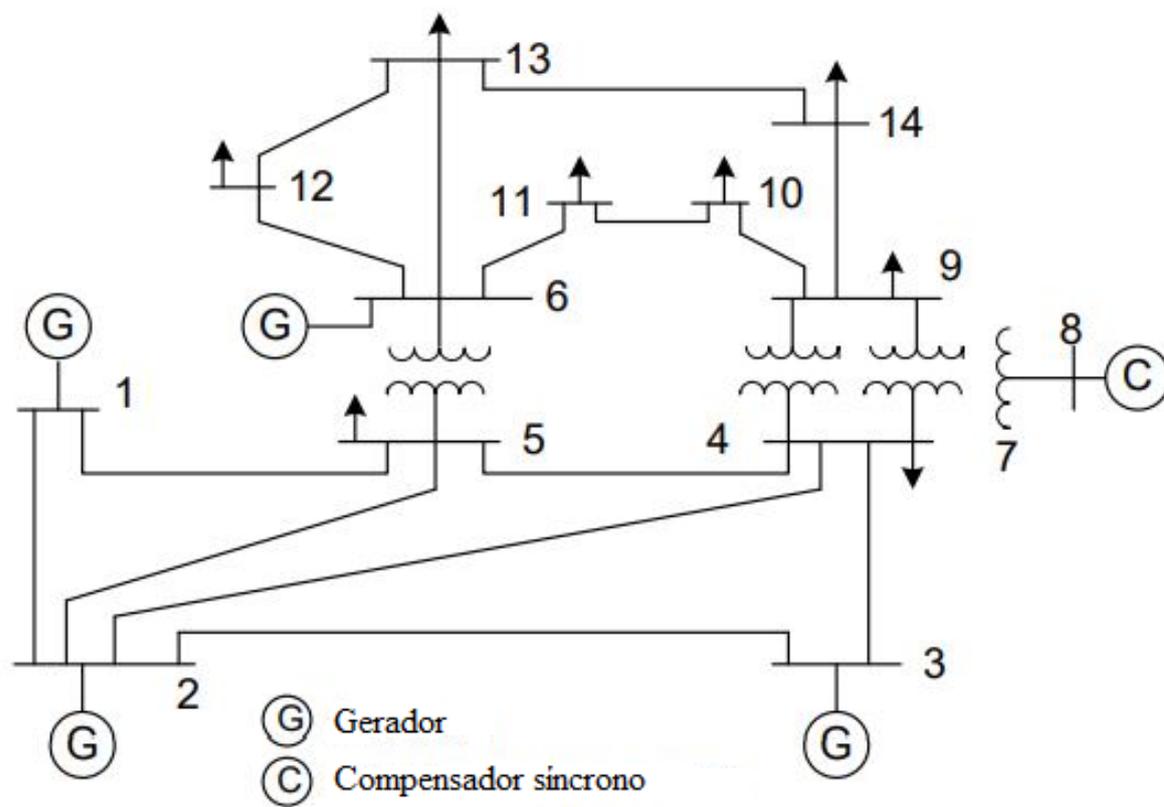
Nas Figuras 13, 14 e 15, observa-se respectivamente, o diagrama unifilar dos sistemas 6 barras, IEEE-14 e IEEE-30.

Figura 13 – Diagrama unifilar do sistema 6 Barras.



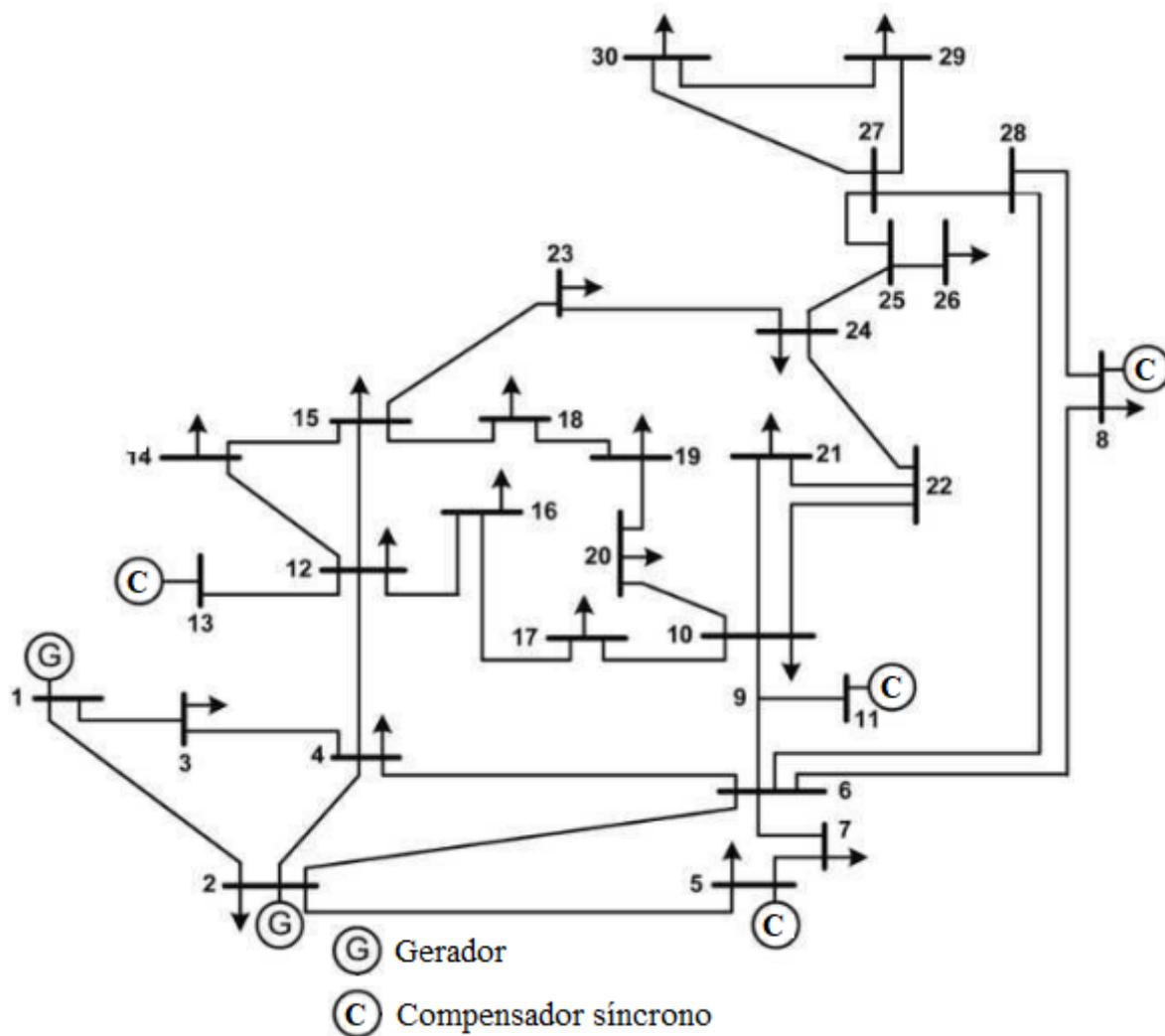
Fonte: (SUNDAR; RAVIKUMAR, 2012).

Figura 14 – Diagrama unifilar do sistema IEEE-14.



Fonte: (VIET et al., 2018).

Figura 15 – Diagrama unifilar do sistema IEEE-30.



Fonte: (NADEEM et al., 2019).

4 Resultados e Discussão

A heurística descrita na seção 3.3 para alocação de TCSC em linhas de transmissão, como forma de se garantir uma operação segura do SEP em relação a magnitude de tensão em suas barras, foi implementada no Matlab e testada nos sistemas de 6 barras, IEEE-14 e IEEE-30.

4.1 Considerações

Os valores de tensão da barra de referência e das barras de geração foram omitidos nas Figuras 16, 17 e 18 uma vez que são barras de tensão controlada e assim seus valores não mudam durante as simulações.

Vale ressaltar que os resultados obtidos são validados nos cenários de sobrecarga descritos na seção 3.3.

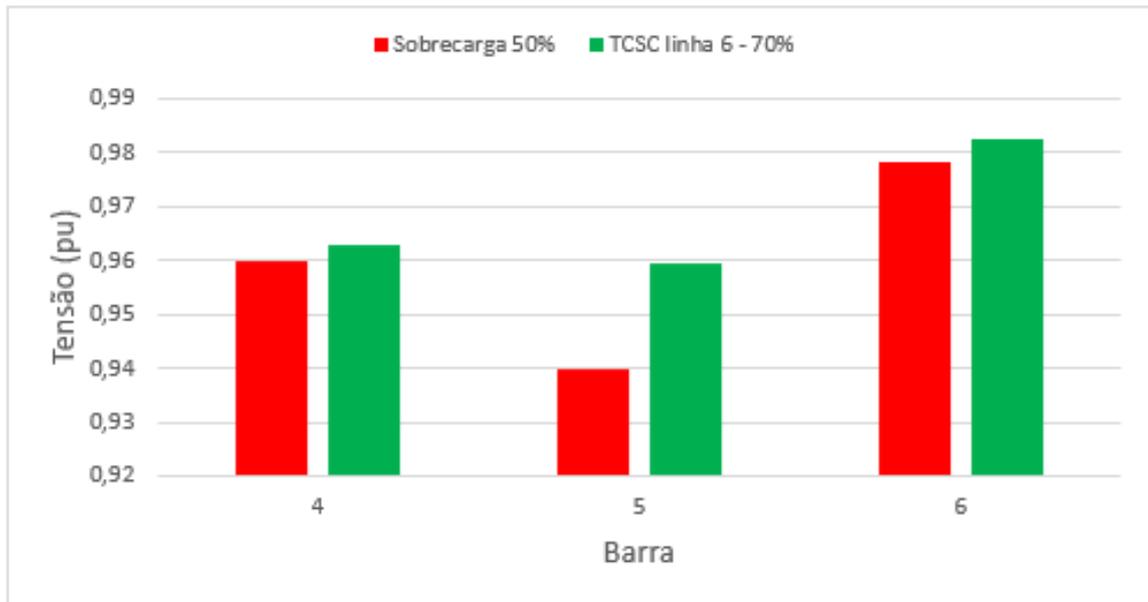
4.2 Solução do Sistema de 6 Barras

Conforme a heurística proposta, foi realizado um aumento gradual da carga inserida ao sistema de 6 barras. Quando esta sobrecarga atingiu 50%, a barra 5 apresentou tensão abaixo de 0,95 pu, conforme ilustrado pela Figura 16. Sendo assim, dando continuidade à heurística, deve-se realizar o cálculo da sensibilidade de modo a identificar as linhas candidatas a receber o TCSC com objetivo de corrigir esta condição adversa.

A Tabela 2 mostra que a linha 10 é a mais sensível do sistema, deste modo, foi realizada nesta linha a alocação do TCSC em todos os níveis de compensação indicados pela heurística, sendo que, em nenhum nível de compensação a alocação do compensador nesta linha foi capaz de solucionar o problema de subtensão na barra 5. Logo, o processo deve ser realizado com a linha 6, já que a mesma possui o segundo maior valor de sensibilidade.

Ao se alocar o TCSC na linha 6, a tensão na barra 5 é elevada de forma que seu valor fique dentro dos limites toleráveis. Tal fato começa a ocorrer a partir de 40% de compensação e atinge seu melhor resultado quando a compensação é de 70%, tal feito pode ser confirmado ao se analisar a Figura 16 além das Tabelas do Apêndice A.

Figura 16 – Tensão nas barras PQ do sistema 6 Barras.



Fonte: Do autor.

Tabela 2 – Sensibilidade das linhas do sistema de 6 Barras.

Barra de origem	Barra de destino	Linha	Valor de sensibilidade
1	2	1	-9,06
1	4	2	-8,21
1	5	3	-7,45
2	3	4	-4,54
2	4	5	-3,51
2	5	6	-0,75
2	6	7	-9,76
3	5	8	-2,93
3	6	9	-11,94
4	5	10	0,1
5	6	11	-8,15

Fonte: Do autor.

Ao se analisar a Tabela 3, nota-se que houve um aumento de 2,1% na tensão da barra 5 quando há a alocação do compensador na linha 6. Este aumento é suficiente para manter a tensão na barra 5 dentro dos limites estabelecidos pelo PRODIST.

Tabela 3 – Tensão na barra 5 do sistema de 6 barras.

Condição	Tensão (pu)
Sem TCSC	0,9397
TCSC linha 6 - 70%	0,9595

Fonte: Do autor.

Os valores de desvio de tensão obtidos com o sistema em sobrecarga de 50%, sem alocação do TCSC e com a alocação do mesmo na linha 6 com compensação de 70% podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 – Desvio de tensão do sistema de 6 barras.

Condição	Desvio de tensão (pu)
Sem TCSC	0,0487
TCSC linha 6 - 70%	0,0442

Fonte: Do autor.

Quando se analisa a Tabela 4, nota-se uma redução de 9,24% no desvio de tensão quando há alocação do compensador na linha 6. Isso se dá pelo aumento da tensão em todas as barras do sistema, fazendo com que as mesmas tenham valores mais próximos ao valor nominal de 1 pu. A Figura 16 mostra que realmente houve o aumento de tensão em todas as barras do sistema.

Os valores de perdas ativas obtidos com o sistema em sobrecarga de 50%, sem alocação do TCSC e com a alocação do mesmo na linha 6 com compensação de 70% podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5 – Perda de potência ativa do sistema 6 barras.

Condição	Perdas ativas (MW)
Sem TCSC	15,217
TCSC linha 6 - 70%	15,229

Fonte: Do autor.

A Tabela 5, mostra que em relação a redução das perdas ativas, a alocação do compensador não trouxe bons resultados, já que o sistema operando com sobrecarga de 50% sem o uso do TCSC opera com perdas ativas de 15,217 MW ou 4,83% e o sistema com TCSC na linha 6 apresenta perdas ativas de 15,229 MW ou 4,84%.

4.3 Solução do Sistema IEEE-14

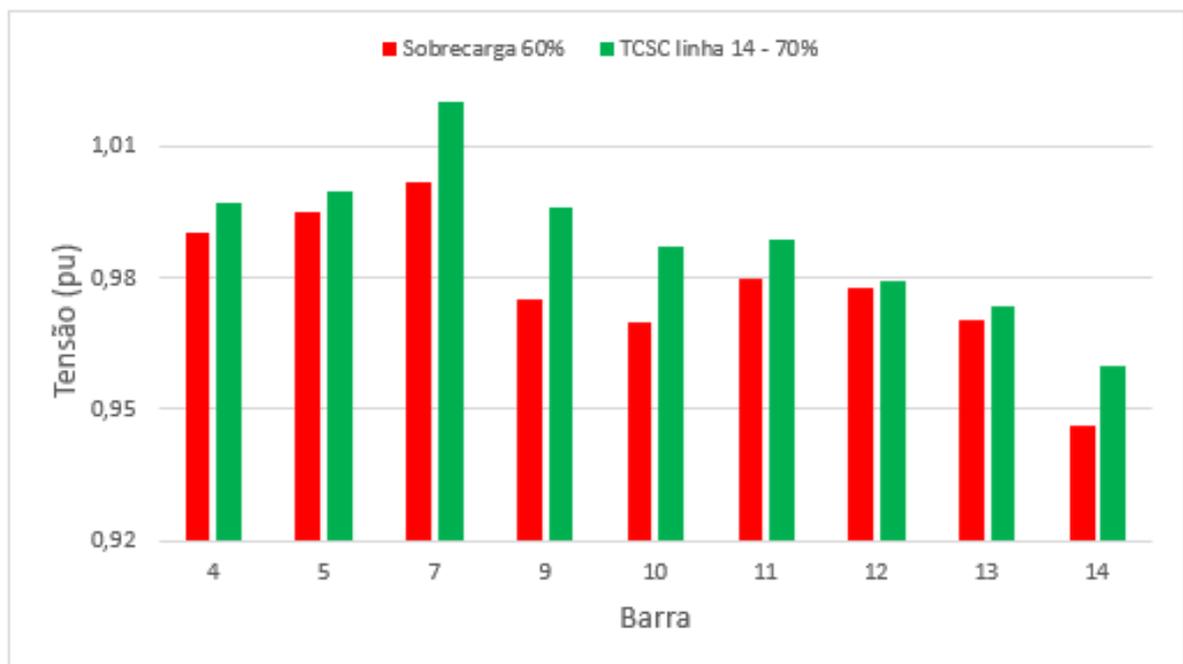
Realizando o aumento gradativo da carga conforme a heurística proposta, observa-se na Figura 17 que a barra 14 apresentou tensão inferior a 0,95 pu quando a sobrecarga atingiu 60%, sendo necessária a alocação do TCSC para retificar tal situação.

O cálculo da sensibilidade indicou a linha 18 como a mais sensível do sistema, conforme Tabela 6. Então foi realizada a alocação do TCSC nesta linha com os diferentes níveis de compensação conforme heurística, onde em nenhum dos casos a alocação nesta linha foi capaz de solucionar a subtensão na barra 14. Então, de acordo com a heurística

proposta, deve-se realizar este processo com a próxima linha com maior valor de sensibilidade, conforme resultado apresentado na Tabela 6, a segunda linha com maior valor de sensibilidade é a linha 14.

Ao alocar o TCSC na linha 14, a tensão da barra 14 se mantém com valor superior a 0,95 pu, ou seja, problema de subtensão foi resolvido. A partir de 30% de compensação, a tensão na barra 14 já se mantém em um nível superior ao mínimo permitido, mas conforme a heurística, o melhor resultado é dado pelo nível de compensação em que a tensão na barra afetada se aproxima mais do valor nominal de 1 pu, isso ocorre quando a compensação atinge seu máximo valor, ou seja, 70% de compensação, tal fato é confirmado ao analisar a Figura 17 e as Tabelas contidas no Apêndice B.

Figura 17 – Tensão nas barras PQ do sistema IEEE-14.



Fonte: Do autor.

Tabela 6 – Sensibilidade das linhas do sistema IEEE-14.

Barra de origem	Barra de destino	Linha	Valor da Sensibilidade
1	2	1	-17,76
1	5	2	-41,94
2	3	3	-22,76
2	4	4	-40,83
2	5	5	-54,42
3	4	6	-33,34
4	5	7	-65,01
4	7	8	-31,25
4	9	9	-30,07
5	6	10	-45,23
6	11	11	-6,42
6	12	12	-7,9
6	13	13	-12,1
7	8	14	-5,87
7	9	15	-9,9
9	10	16	-7,07
9	14	17	-10,49
10	11	18	-3,21
12	13	19	-8,15
13	14	20	-12,3

Fonte: Do autor.

A Tabela 7 mostra que a alocação do TCSC na linha 14 elevou a tensão na barra 14 em 1,44%, fazendo com que a tensão nessa barra fique acima do limite mínimo de 0,95 pu.

Tabela 7 – Tensão na barra 14 do sistema IEEE-14.

Condição	Tensão (pu)
Sem TCSC	0,9462
TCSC linha 14 - 70%	0,9598

Fonte: Do autor.

A Tabela 8 apresenta os valores de desvio de tensão obtidos com o sistema operando com sobrecarga de 60% sem e com a alocação de TCSC na linha 14 com 70% de compensação.

Tabela 8 – Desvio de tensão do sistema IEEE-14.

Condição	Desvio de tensão (pu)
Sem TCSC	0,0266
TCSC linha 14 - 70%	0,0232

Fonte: Do autor.

Também é observado na Figura 17 que a alocação do TCSC na linha 14 com 70% de compensação, eleva a tensão em todas as barras do sistema, fazendo com que as mesmas fiquem mais próximas do valor nominal de 1 pu. Isso é confirmado ao analisar a Tabela 8, onde observa-se que o desvio de tensão quando há o TCSC alocado é 12,78% menor quando comparado com o sistema sem a aplicação do TCSC.

A Tabela 9 apresenta os valores de perdas ativas obtidos com o sistema operando com sobrecarga de 60% sem e com o uso do TCSC na linha 14 com 70% de compensação.

Tabela 9 – Perda de potência ativa do sistema IEEE-14.

Condição	Perdas ativas (MW)
Sem TCSC	39,69
TCSC linha 14 - 70%	39,41

Fonte: Do autor.

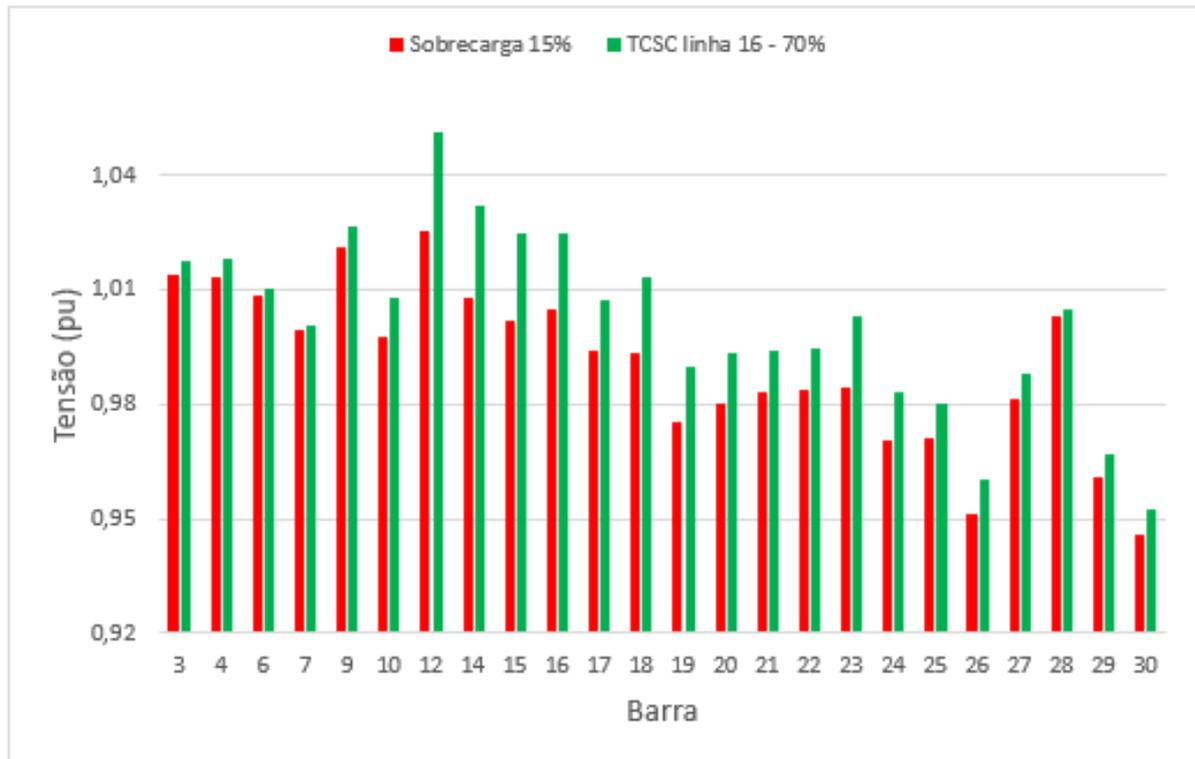
Ao analisar a Tabela 9, nota-se que em relação às perdas ativas, o sistema operando com carga 60% acima da condição normal apresenta perdas de 39,69 MW, ou seja, 9,11%. Já com a alocação do TCSC na linha 14, o sistema opera com perdas ativas de 39,41 MW ou 9,04%. Portanto, neste aspecto, a alocação do TCSC não obteve um desempenho satisfatório.

4.4 Solução do Sistema IEEE-30

Seguindo a heurística proposta, foi realizado o aumento progressivo da carga inserida ao Sistema IEEE-30. Ao observar a Figura 18, nota-se que a barra 30 apresentou tensão abaixo do limite inferior de 0,95 pu quando a sobrecarga alcançou 15%, deste modo, se faz necessária a utilização do TCSC para solucionar esta situação, que impede o funcionamento seguro do sistema.

O cálculo da sensibilidade indicou a linha 15 como a mais sensível do sistema, como mostra a Tabela 10, sendo assim, foi realizada a alocação do compensador nesta linha com valores de compensação seguindo a heurística, na qual nenhuma foi capaz de manter a tensão na barra 30 em níveis adequados. Então, o mesmo processo foi feito na linha 19, segunda linha com maior valor de sensibilidade e novamente a alocação nesta linha não trouxe o benefício esperado e a tensão na barra 30 continuou abaixo do limite inferior de 0,95 pu. Desta forma, o processo deve ser realizado na linha 16, linha com terceiro maior valor de sensibilidade.

Figura 18 – Tensão nas barras PQ do sistema IEEE-30.



Fonte: Do autor.

Ao alocar o TCSC na linha 16, a tensão na barra 30 permanece dentro dos limites toleráveis, sendo assim o problema de subtensão foi solucionado. Tal fato ocorre a partir de 50% de compensação e alcança seu melhor resultado quando a compensação atinge 70%, isso é comprovado ao se analisar as Tabelas do Apêndice C e a Figura 18, onde pode-se observar que a tensão da barra 30 permanece acima de 0,95 pu quando há a alocação do compensador na linha 16.

Tabela 10 – Sensibilidade das linhas do sistema IEEE-30.

Barra de origem	Barra de destino	Linha	Valor da sensibilidade
1	2	1	-4,68
1	3	2	-6,25
2	4	3	0,12
3	4	4	-1,44
2	5	5	-3,22
2	6	6	-11,35
3	6	7	-12,92
5	7	8	-22,54
6	7	9	-30,67
6	8	10	-22,96
6	9	11	-12,57
6	10	12	-10,58
9	11	13	-2,99
9	10	14	-3,40
4	12	15	2,66
12	13	16	0,74
12	14	17	0,01
12	15	18	-1,29
12	16	19	0,92
14	15	20	-3,42
16	17	21	-1,30
15	18	22	-4,52
18	19	23	-4,06
19	20	24	-4,05
10	20	25	-2,85
10	17	26	-1,85
10	21	27	-3,92
10	22	28	-1,11
21	22	29	-3,63
15	23	30	-3,18
22	24	31	-2,36
23	24	32	-2,77
24	25	33	-2,38
25	26	34	-1,30
25	27	35	-3,04
28	27	36	-10,14
27	29	37	-4,85
27	30	38	-5,53
29	30	39	-5,17
8	28	40	-20,62
6	28	41	-17,42

Fonte: Do autor.

Ao analisar a Tabela 11, nota-se que a alocação do TCSC na linha 16 elevou a tensão na barra 30 em 0,7%, valor suficiente para manter a tensão nessa barra acima de 0,95 pu.

Tabela 11 – Tensão na barra 30 do sistema de IEEE-30.

Condição	Tensão (pu)
Sem TCSC	0,9461
TCSC linha 16 - 70%	0,9527

Fonte: Do autor.

A Tabela 12 apresenta os valores de desvio de tensão obtidos com o sistema operando com sobrecarga de 15% sem e com a alocação de TCSC na linha 16 com 70% de compensação.

Tabela 12 – Desvio de tensão do sistema IEEE-30.

Condição	Desvio de tensão (pu)
Sem TCSC	0,0235
TCSC linha 16 - 70%	0,0239

Fonte: Do autor.

Houve um aumento de 1,7% do desvio de tensão, quando há alocação do TCSC na linha 16, como mostra a Tabela 12. Neste caso, este aumento não é considerado ruim, visto que houve elevação de tensão em todas as barras, inclusive nas barras com tensão acima de 1 pu, conforme mostra a Figura 18, as barras que se mantiveram com tensão acima de 1 pu contribuíram para o aumento do desvio de tensão, mas observa-se que em todas as barras a tensão fica dentro dos limites estipulados.

A Tabela 13 apresenta os valores de perdas ativas obtidos com o sistema operando com sobrecarga de 15% sem e com a alocação de TCSC na linha 16 com 70% de compensação.

Tabela 13 – Perda de potência ativa do sistema IEEE-30.

Condição	Perdas ativas (MW)
Sem TCSC	22,68
TCSC linha 16 - 70%	22,76

Fonte: Do autor.

Em relação a perdas ativas, observa-se na Tabela 13 que quando o sistema opera com sobrecarga de 15% sem o uso do compensador apresenta perdas de 22,68 MW ou 6,57%. Já quando há a alocação do TCSC na linha 16, o sistema opera com perdas ativas de 22,76 MW, ou seja, 6,60%. Sendo assim, em relação as perdas ativas a alocação não obteve bom desempenho.

5 Conclusões

Neste trabalho, foi criada uma heurística em conjunto com um índice de sensibilidade baseado na submatriz L da matriz Jacobiana, para a alocação de TCSC em linhas de transmissão em sistemas que possuem barras com tensão inferior ao limite mínimo exigido pelo PRODIST decorrente de sobrecarregamento.

Embora a alocação do TCSC na linha com maior sensibilidade não traga os melhores resultados, vale destacar que o espaço de busca da heurística é pequeno, uma vez que a segunda linha com maior sensibilidade foi a escolhida para a alocação do TCSC nos sistemas de 6 barras e IEEE-14, para o sistema IEEE-30 foi escolhida a terceira linha com maior valor de sensibilidade. Resultados obtidos mostram que alocação do compensador nas linhas de transmissão indicadas pela heurística permitiram que os sistemas operassem com tensão das barras na faixa determinada pelo PRODIST.

Outros aspectos também foram analisados nas simulações. No que se refere à redução de perdas ativas, observou-se que a alocação do TCSC não trouxe grandes melhorias aos sistemas testados, o que pode ter sido provocado pelo alto nível de compensação utilizado. Já em relação ao desvio de tensão, observou-se que a alocação do TCSC trouxe um aumento na tensão em praticamente todas as barras dos sistemas testados.

A fim de se confirmar os resultados do índice de sensibilidade, foram realizadas simulações de alocação do TCSC com compensação variando 10% no intervalo de 20 a 70% em todas as linhas de cada um dos sistemas testados. Por estas simulações, cujos seus resultados podem ser vistos nas Tabelas dos Apêndices deste Trabalho, nota-se que realmente são necessárias metodologias que busquem a alocação ideal dos dispositivos de compensação reativa, uma vez que, a instalação desses dispositivos em grande parte das linhas de transmissão de um sistema de potência não traz nenhum benefício, sendo em alguns casos até prejudicial. Como exemplo, o maior sistema testado, o sistema IEEE-30 possui 41 linhas de transmissão, dentre essas, apenas três (13, 16 e 36), foram capazes de solucionar o problema de subtensão. Em contrapartida, a alocação do TCSC nas linhas 2, 11 e 15, em alguns níveis de compensação, além de não solucionar a subtensão na barra 30, provocou subtensão na barra 26, ou seja, prejudicou ainda mais a operação do sistema.

Referências

- ABB. TCSC- Thyristor Controlled Series Compensation Keeping grids together. Library ABB, 2010. 18, 19
- ACHARYA, N.; SODE-YOME, A.; MITHULANANTHAN, N. Facts about flexible ac transmission systems (facts) controllers: practical installations and benefits. In: CITESEER. *Australasian universities power engineering conference (AUPEC)*. [S.l.], 2005. p. 533–538. 19
- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. *Fundamentos de circuitos elétricos*. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013. 5
- ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Modulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2016. 2
- ANTUNEZ, C. F. S. *Alocação de Equipamentos SVC e TCSC na Rede de Transmissão de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, 2014. 1, 4
- BANSAL, H. et al. Optimal location of fact devices to control reactive power. *International Journal of Engineering Science and Technology*, v. 2, 07 2010. 3
- CANIZARES, C.; FAUR, Z. Analysis of svc and tcsc controllers in voltage collapse. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, n. 1, p. 158–165, 1999. 3
- CASTRO, M. S. *A Influência de Controladores FACTS na Estabilidade de Ângulo a Pequenas Perturbações de Sistemas Elétricos de Potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 2005. 2, 13, 14, 21
- DIXON, J. et al. Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review. *Proceedings of the IEEE*, v. 93, n. 12, p. 2144–2164, 2005. 5, 19
- FENG, W.; SHRESTHA, G. Allocation of tcsc devices to optimize total transmission capacity in a competitive power market. In: *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)*. [S.l.: s.n.], 2001. v. 2, p. 587–593 vol.2. 21
- FILHO, S. A. *Análise de Controladores Eletrônicos em Sistemas de Distribuição de Energia*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, 2005. 17
- JESUS, N. C. de et al. Modelagem e simulação dinâmica do tcsc utilizando o programa de transitórios eletromagnéticos microtran para estudos de qualidade de energia. *SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA*, v. 5, p. 1–6, 2003. 14, 15
- KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. de; ROBBA, E. J. *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 1

- KHAN, I. et al. Optimal placement of facts controller scheme for enhancement of power system security in indian scenario. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, v. 2, n. 2, p. 161–171, 2015. ISSN 2314-7172. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2314717215000392>>. 4
- KHEDERZADEH, M.; SIDHU, T. Impact of tcsc on the protection of transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 1, p. 80–87, 2006. 16, 17
- MONTICELLI, A. J. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. São Paulo: E. Blucher, 1983. 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 21
- NADEEM, M. et al. Optimal sizing and allocation of svc and tcsc for reactive power planning in meshed network. In: *2019 International Conference on Applied and Engineering Mathematics (ICAEM)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 105–110. 3
- NADEEM, M. et al. Optimal sizing and allocation of svc and tcsc for reactive power planning in meshed network. *IEEE Transactions on Power Systems*, p. 1–6, 2019. 27
- NATURESA, J. S. *A Influência de Compensadores Estáticos de Reativos na Estabilidade de Tensão de Sistemas de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 2001. 1, 2
- SAMIMI, A.; NADERI, P. et al. A new method for optimal placement of tcsc based on sensitivity analysis for congestion management. *Smart Grid and Renewable Energy*, Scientific Research Publishing, v. 3, n. 1, p. 10–16, 2012. 4
- STEVENSON, W. D. *Elementos de análise de sistemas de potência*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1974. 1, 6
- SUHETT, M. R. Análise de técnicas de medição de potência reativa em medidores eletrônicos. *Rio De Janeiro, RJ-Brasil Março de*, 2008. 5
- SUNDAR, K. S.; RAVIKUMAR, H. Selection of tcsc location for secured optimal power flow under normal and network contingencies. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, v. 34, n. 1, p. 29–37, 2012. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061511002043>>. 20, 25
- TORTELLI, O. L. *Alocação e Operação de Controladores FACTS em Sistemas Elétricos de Potência*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2010. 1, 12, 13, 14, 15, 16, 17
- VASCONCELOS, F. et al. Estudos dos efeitos da alocação de bancos de capacitores na magnitude de tensão e nas perdas ativas em sistemas de distribuição. Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, 2011. 12
- VIET, N. et al. Optimal location of tcsc for social welfare maximization in deregulated electricity market. In: . [S.l.: s.n.], 2018. 20, 26
- WOOD, A.; WOLLENBERG, B. Power generation operation and control. In: . [S.l.: s.n.], 1996. 61
- ZANETTA, L. C. *Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência*. 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006. 9

APÊNDICE A – Sistema 6 Barras

A.1 Magnitude de tensão nas barras do sistema 6 barras quando há um TCSC alocado de forma individual em cada uma das linhas do sistema.

Tabela 14 – Compensação de 20%. Sistema 6 barras.

Condição	Tensão nas barras		
	V4	V5	V6
Sem TCSC	0,9597	0,9397	0,9781
TCSC linha 1	0,9601	0,9404	0,9782
TCSC linha 2	0,9628	0,9409	0,9783
TCSC linha 3	0,9605	0,9413	0,9785
TCSC linha 4	0,9598	0,9399	0,9784
TCSC linha 5	0,9698	0,9412	0,9784
TCSC linha 6	0,9605	0,9445	0,9791
TCSC linha 7	0,9599	0,9405	0,9792
TCSC linha 8	0,9608	0,9465	0,9792
TCSC linha 9	0,9602	0,9424	0,9891
TCSC linha 10	0,9601	0,9391	0,9780
TCSC linha 11	0,9601	0,9419	0,9761

Fonte: Do autor.

Tabela 15 – Compensação de 30%. Sistema 6 barras.

Condição	Tensão nas barras		
	V4	V5	V6
Sem TCSC	0,9597	0,9397	0,9781
TCSC linha 1	0,9602	0,9406	0,9782
TCSC linha 2	0,9640	0,9414	0,9784
TCSC linha 3	0,9607	0,9416	0,9787
TCSC linha 4	0,9598	0,9401	0,9786
TCSC linha 5	0,9754	0,9421	0,9786
TCSC linha 6	0,9609	0,9472	0,9797
TCSC linha 7	0,9599	0,9409	0,9796
TCSC linha 8	0,9614	0,9506	0,9798
TCSC linha 9	0,9604	0,9438	0,9951
TCSC linha 10	0,9605	0,9386	0,9779
TCSC linha 11	0,9603	0,9434	0,9748

Fonte: Do autor.

Tabela 16 – Compensação de 40%. Sistema 6 barras.

Condição	Tensão nas barras		
	V4	V5	V6
Sem TCSC	0,9597	0,9397	0,9781
TCSC linha 1	0,9602	0,9407	0,9782
TCSC linha 2	0,9648	0,9420	0,9785
TCSC linha 3	0,9609	0,9413	0,9787
TCSC linha 4	0,9598	0,9402	0,9788
TCSC linha 5	0,9812	0,9429	0,9788
TCSC linha 6	0,9614	0,9502	0,9804
TCSC linha 7	0,9600	0,9412	0,9798
TCSC linha 8	0,9621	0,9552	0,9805
TCSC linha 9	0,9606	0,9454	1,0014
TCSC linha 10	0,9610	0,9379	0,9778
TCSC linha 11	0,9606	0,9452	0,9732

Fonte: Do autor.

Tabela 17 – Compensação de 50%. Sistema 6 barras.

Condição	Tensão nas barras		
	V4	V5	V6
Sem TCSC	0,9597	0,9397	0,9781
TCSC linha 1	0,9602	0,9407	0,9782
TCSC linha 2	0,9649	0,9422	0,9785
TCSC linha 3	0,9608	0,9398	0,9785
TCSC linha 4	0,9599	0,9403	0,9790
TCSC linha 5	0,9875	0,9439	0,9790
TCSC linha 6	0,9619	0,9533	0,9810
TCSC linha 7	0,9600	0,9414	0,9796
TCSC linha 8	0,9629	0,9604	0,9812
TCSC linha 9	0,9609	0,9470	1,0083
TCSC linha 10	0,9617	0,9369	0,9776
TCSC linha 11	0,9609	0,9473	0,9714

Fonte: Do autor.

Tabela 18 – Compensação de 60%. Sistema 6 barras.

Condição	Tensão nas barras		
	V4	V5	V6
Sem TCSC	0,9597	0,9397	0,9781
TCSC linha 1	0,9600	0,9403	0,9782
TCSC linha 2	0,9638	0,9422	0,9785
TCSC linha 3	0,9604	0,9366	0,9779
TCSC linha 4	0,9599	0,9404	0,9792
TCSC linha 5	0,9941	0,9448	0,9792
TCSC linha 6	0,9624	0,9565	0,9817
TCSC linha 7	0,9601	0,9416	0,9788
TCSC linha 8	0,9638	0,9663	0,9820
TCSC linha 9	0,9611	0,9488	1,0156
TCSC linha 10	0,9627	0,9356	0,9773
TCSC linha 11	0,9613	0,9500	0,9691

Fonte: Do autor.

Tabela 19 – Compensação de 70%. Sistema 6 barras.

Condição	Tensão nas barras		
	V4	V5	V6
Sem TCSC	0,9597	0,9397	0,9781
TCSC linha 1	0,9593	0,9389	0,9780
TCSC linha 2	0,9609	0,9417	0,9784
TCSC linha 3	0,9594	0,9303	0,9767
TCSC linha 4	0,9599	0,9404	0,9793
TCSC linha 5	1,0013	0,9459	0,9794
TCSC linha 6	0,9628	0,9595	0,9824
TCSC linha 7	0,9600	0,9415	0,9772
TCSC linha 8	0,9648	0,9730	0,9829
TCSC linha 9	0,9614	0,9506	1,0235
TCSC linha 10	0,9641	0,9339	0,9770
TCSC linha 11	0,9618	0,9534	0,9663

Fonte: Do autor.

APÊNDICE B – Sistema IEEE-14

B.1 Magnitude de tensão nas barras do sistema IEEE-14 quando há um TCSC alocado de forma individual em cada uma das linhas do sistema.

Tabela 20 – Compensação de 20%. Sistema IEEE-14.

Condição	Tensão nas barras								
	V4	V5	V7	V9	V10	V11	V12	V13	V14
Sem TCSC	0,9903	0,9953	1,0018	0,9753	0,9697	0,9798	0,9778	0,9704	0,9462
TCSC linha 1	0,9906	0,9958	1,0019	0,9754	0,9698	0,9798	0,9778	0,9704	0,9463
TCSC linha 2	0,9905	0,9954	1,0018	0,9752	0,9696	0,9797	0,9778	0,9704	0,9461
TCSC linha 3	0,9911	0,9961	1,0022	0,9757	0,9700	0,9800	0,9778	0,9705	0,9465
TCSC linha 4	0,9906	0,9959	1,0019	0,9755	0,9699	0,9799	0,9778	0,9705	0,9463
TCSC linha 5	0,9908	0,9959	1,0020	0,9754	0,9698	0,9798	0,9778	0,9704	0,9462
TCSC linha 6	0,9928	0,9968	1,0029	0,9763	0,9705	0,9802	0,9778	0,9706	0,9468
TCSC linha 7	0,9898	0,9962	1,0017	0,9753	0,9698	0,9798	0,9777	0,9705	0,9462
TCSC linha 8	0,9909	0,9958	1,0015	0,9757	0,9701	0,9800	0,9778	0,9705	0,9465
TCSC linha 9	0,9904	0,9955	1,0027	0,9768	0,9710	0,9805	0,9778	0,9707	0,9472
TCSC linha 10	0,9909	0,9956	1,0016	0,9740	0,9684	0,9789	0,9777	0,9700	0,9452
TCSC linha 11	0,9904	0,9953	1,0020	0,9756	0,9703	0,9810	0,9778	0,9705	0,9464
TCSC linha 12	0,9903	0,9953	1,0018	0,9753	0,9697	0,9798	0,9789	0,9705	0,9462
TCSC linha 13	0,9904	0,9953	1,0019	0,9755	0,9699	0,9799	0,9781	0,9721	0,9470
TCSC linha 14	0,9917	0,9962	1,0079	0,9795	0,9732	0,9815	0,9781	0,9710	0,9489
TCSC linha 15	0,9903	0,9954	1,0008	0,9788	0,9726	0,9813	0,9780	0,9710	0,9485
TCSC linha 16	0,9903	0,9953	1,0018	0,9752	0,9701	0,9800	0,9778	0,9704	0,9461
TCSC linha 17	0,9903	0,9953	1,0018	0,9753	0,9697	0,9797	0,9778	0,9708	0,9474
TCSC linha 18	0,9904	0,9953	1,0019	0,9755	0,9700	0,9793	0,9778	0,9705	0,9463
TCSC linha 19	0,9903	0,9953	1,0018	0,9753	0,9697	0,9798	0,9777	0,9704	0,9462
TCSC linha 20	0,9904	0,9953	1,0019	0,9755	0,9698	0,9799	0,9777	0,9702	0,9470

Fonte: Do autor.

Tabela 21 – Compensação de 30%. Sistema IEEE-14.

Condição	Tensão nas barras								
	V4	V5	V7	V9	V10	V11	V12	V13	V14
Sem TCSC	0,9903	0,9953	1,0018	0,9753	0,9697	0,9798	0,9778	0,9704	0,9462
TCSC linha 1	0,9906	0,9960	1,0020	0,9755	0,9699	0,9799	0,9778	0,9705	0,9463
TCSC linha 2	0,9904	0,9950	1,0017	0,9751	0,9695	0,9796	0,9778	0,9703	0,9460
TCSC linha 3	0,9915	0,9965	1,0023	0,9759	0,9702	0,9801	0,9778	0,9705	0,9466
TCSC linha 4	0,9903	0,9960	1,0019	0,9755	0,9699	0,9799	0,9778	0,9705	0,9463
TCSC linha 5	0,9910	0,9961	1,0020	0,9754	0,9698	0,9798	0,9778	0,9704	0,9462
TCSC linha 6	0,9945	0,9978	1,0037	0,9770	0,9711	0,9805	0,9779	0,9707	0,9473
TCSC linha 7	0,9895	0,9968	1,0016	0,9753	0,9698	0,9799	0,9777	0,9705	0,9463
TCSC linha 8	0,9912	0,9962	1,0013	0,9759	0,9703	0,9802	0,9777	0,9706	0,9466
TCSC linha 9	0,9904	0,9957	1,0033	0,9777	0,9718	0,9810	0,9779	0,9709	0,9478
TCSC linha 10	0,9913	0,9957	1,0014	0,9733	0,9677	0,9784	0,9777	0,9697	0,9446
TCSC linha 11	0,9905	0,9953	1,0021	0,9758	0,9706	0,9817	0,9778	0,9705	0,9465
TCSC linha 12	0,9903	0,9953	1,0018	0,9753	0,9697	0,9798	0,9794	0,9704	0,9462
TCSC linha 13	0,9904	0,9953	1,0020	0,9756	0,9699	0,9799	0,9782	0,9728	0,9474
TCSC linha 14	0,9925	0,9967	1,0115	0,9820	0,9752	0,9826	0,9783	0,9714	0,9505
TCSC linha 15	0,9904	0,9955	1,0003	0,9806	0,9742	0,9821	0,9781	0,9713	0,9497
TCSC linha 16	0,9903	0,9953	1,0017	0,9752	0,9703	0,9801	0,9778	0,9704	0,9461
TCSC linha 17	0,9903	0,9953	1,0018	0,9754	0,9697	0,9797	0,9779	0,9709	0,9480
TCSC linha 18	0,9904	0,9953	1,0020	0,9756	0,9702	0,9791	0,9778	0,9705	0,9464
TCSC linha 19	0,9903	0,9953	1,0018	0,9753	0,9697	0,9798	0,9777	0,9705	0,9462
TCSC linha 20	0,9904	0,9953	1,0020	0,9755	0,9699	0,9799	0,9777	0,9700	0,9473

Fonte: Do autor.

Tabela 22 – Compensação de 40%. Sistema IEEE-14.

Condição	Tensão nas barras								
	V4	V5	V7	V9	V10	V11	V12	V13	V14
Sem TCSC	0,9903	0,9953	1,0018	0,9753	0,9697	0,9798	0,9778	0,9704	0,9462
TCSC linha 1	0,9907	0,9962	1,0020	0,9756	0,9699	0,9799	0,9778	0,9705	0,9464
TCSC linha 2	0,9899	0,9941	1,0015	0,9748	0,9692	0,9795	0,9777	0,9703	0,9458
TCSC linha 3	0,9918	0,9970	1,0025	0,9761	0,9704	0,9802	0,9778	0,9706	0,9467
TCSC linha 4	0,9897	0,9959	1,0016	0,9753	0,9697	0,9798	0,9777	0,9705	0,9462
TCSC linha 5	0,9910	0,9960	1,0020	0,9753	0,9697	0,9797	0,9778	0,9704	0,9462
TCSC linha 6	0,9967	0,9991	1,0046	0,9779	0,9719	0,9809	0,9780	0,9708	0,9479
TCSC linha 7	0,9892	0,9974	1,0015	0,9754	0,9698	0,9799	0,9777	0,9705	0,9463
TCSC linha 8	0,9916	0,9965	1,0010	0,9761	0,9705	0,9803	0,9777	0,9707	0,9468
TCSC linha 9	0,9904	0,9958	1,0040	0,9789	0,9728	0,9815	0,9779	0,9711	0,9486
TCSC linha 10	0,9916	0,9960	1,0012	0,9724	0,9669	0,9778	0,9777	0,9695	0,9440
TCSC linha 11	0,9905	0,9953	1,0022	0,9760	0,9709	0,9823	0,9778	0,9706	0,9467
TCSC linha 12	0,9903	0,9953	1,0018	0,9752	0,9696	0,9798	0,9798	0,9704	0,9461
TCSC linha 13	0,9904	0,9953	1,0020	0,9756	0,9700	0,9800	0,9782	0,9735	0,9478
TCSC linha 14	0,9934	0,9973	1,0156	0,9848	0,9776	0,9838	0,9785	0,9718	0,9524
TCSC linha 15	0,9904	0,9956	0,9998	0,9826	0,9758	0,9830	0,9783	0,9716	0,9509
TCSC linha 16	0,9903	0,9953	1,0017	0,9752	0,9705	0,9802	0,9778	0,9704	0,9461
TCSC linha 17	0,9903	0,9954	1,0018	0,9755	0,9698	0,9797	0,9779	0,9711	0,9485
TCSC linha 18	0,9904	0,9953	1,0020	0,9757	0,9704	0,9789	0,9778	0,9705	0,9465
TCSC linha 19	0,9903	0,9953	1,0018	0,9753	0,9697	0,9798	0,9777	0,9705	0,9462
TCSC linha 20	0,9904	0,9952	1,0020	0,9756	0,9700	0,9800	0,9777	0,9699	0,9477

Fonte: Do autor.

Tabela 23 – Compensação de 50%. Sistema IEEE-14.

Condição	Tensão nas barras								
	V4	V5	V7	V9	V10	V11	V12	V13	V14
Sem TCSC	0,9903	0,9953	1,0018	0,9753	0,9697	0,9798	0,9778	0,9704	0,9462
TCSC linha 1	0,9908	0,9964	1,0020	0,9756	0,9700	0,9799	0,9778	0,9705	0,9464
TCSC linha 2	0,9890	0,9924	1,0010	0,9743	0,9688	0,9792	0,9777	0,9702	0,9455
TCSC linha 3	0,9921	0,9973	1,0027	0,9763	0,9706	0,9802	0,9778	0,9706	0,9469
TCSC linha 4	0,9884	0,9954	1,0010	0,9748	0,9694	0,9797	0,9777	0,9704	0,9459
TCSC linha 5	0,9907	0,9955	1,0019	0,9752	0,9695	0,9796	0,9778	0,9703	0,9461
TCSC linha 6	0,9994	1,0008	1,0058	0,9790	0,9728	0,9813	0,9780	0,9710	0,9486
TCSC linha 7	0,9888	0,9980	1,0013	0,9753	0,9698	0,9799	0,9777	0,9705	0,9463
TCSC linha 8	0,9921	0,9969	1,0006	0,9762	0,9706	0,9804	0,9777	0,9707	0,9469
TCSC linha 9	0,9905	0,9961	1,0048	0,9802	0,9740	0,9822	0,9780	0,9714	0,9495
TCSC linha 10	0,9920	0,9962	1,0010	0,9715	0,9659	0,9771	0,9777	0,9692	0,9432
TCSC linha 11	0,9905	0,9953	1,0023	0,9762	0,9712	0,9830	0,9778	0,9706	0,9468
TCSC linha 12	0,9903	0,9952	1,0018	0,9752	0,9696	0,9797	0,9801	0,9703	0,9461
TCSC linha 13	0,9905	0,9952	1,0021	0,9757	0,9701	0,9800	0,9782	0,9741	0,9481
TCSC linha 14	0,9945	0,9980	1,0203	0,9881	0,9803	0,9852	0,9787	0,9723	0,9545
TCSC linha 15	0,9904	0,9957	0,9993	0,9846	0,9775	0,9839	0,9784	0,9719	0,9523
TCSC linha 16	0,9903	0,9953	1,0017	0,9751	0,9707	0,9803	0,9778	0,9704	0,9461
TCSC linha 17	0,9903	0,9954	1,0019	0,9756	0,9699	0,9798	0,9779	0,9713	0,9489
TCSC linha 18	0,9905	0,9953	1,0021	0,9758	0,9706	0,9787	0,9778	0,9705	0,9466
TCSC linha 19	0,9903	0,9953	1,0018	0,9753	0,9697	0,9798	0,9777	0,9705	0,9462
TCSC linha 20	0,9905	0,9952	1,0020	0,9756	0,9700	0,9800	0,9777	0,9698	0,9479

Fonte: Do autor.

Tabela 24 – Compensação de 60%. Sistema IEEE-14.

Condição	Tensão nas barras								
	V4	V5	V7	V9	V10	V11	V12	V13	V14
Sem TCSC	0,9903	0,9953	1,0018	0,9753	0,9697	0,9798	0,9778	0,9704	0,9462
TCSC linha 1	0,9908	0,9965	1,0021	0,9757	0,9700	0,9800	0,9778	0,9705	0,9464
TCSC linha 2	0,9872	0,9894	1,0002	0,9734	0,9680	0,9788	0,9776	0,9700	0,9449
TCSC linha 3	0,9924	0,9977	1,0028	0,9765	0,9707	0,9803	0,9778	0,9706	0,9470
TCSC linha 4	0,9861	0,9942	1,0001	0,9740	0,9687	0,9793	0,9776	0,9703	0,9454
TCSC linha 5	0,9901	0,9944	1,0016	0,9748	0,9692	0,9795	0,9777	0,9703	0,9459
TCSC linha 6	1,0028	1,0029	1,0073	0,9805	0,9740	0,9820	0,9782	0,9712	0,9496
TCSC linha 7	0,9884	0,9987	1,0012	0,9753	0,9698	0,9800	0,9777	0,9705	0,9463
TCSC linha 8	0,9926	0,9974	1,0002	0,9763	0,9707	0,9805	0,9777	0,9708	0,9469
TCSC linha 9	0,9906	0,9964	1,0058	0,9819	0,9754	0,9830	0,9781	0,9717	0,9506
TCSC linha 10	0,9925	0,9965	1,0007	0,9705	0,9649	0,9763	0,9776	0,9688	0,9424
TCSC linha 11	0,9906	0,9953	1,0024	0,9763	0,9715	0,9836	0,9778	0,9706	0,9469
TCSC linha 12	0,9903	0,9952	1,0017	0,9752	0,9696	0,9797	0,9802	0,9701	0,9460
TCSC linha 13	0,9905	0,9952	1,0021	0,9757	0,9701	0,9801	0,9781	0,9746	0,9483
TCSC linha 14	0,9957	0,9988	1,0258	0,9918	0,9834	0,9868	0,9790	0,9729	0,9569
TCSC linha 15	0,9904	0,9957	0,9987	0,9867	0,9793	0,9848	0,9786	0,9722	0,9536
TCSC linha 16	0,9903	0,9953	1,0017	0,9751	0,9709	0,9804	0,9778	0,9704	0,9461
TCSC linha 17	0,9903	0,9954	1,0019	0,9757	0,9700	0,9798	0,9779	0,9714	0,9493
TCSC linha 18	0,9905	0,9953	1,0022	0,9759	0,9708	0,9784	0,9778	0,9705	0,9466
TCSC linha 19	0,9903	0,9953	1,0018	0,9753	0,9697	0,9798	0,9777	0,9705	0,9462
TCSC linha 20	0,9905	0,9952	1,0021	0,9756	0,9700	0,9800	0,9777	0,9698	0,9481

Fonte: Do autor.

Tabela 25 – Compensação de 70%. Sistema IEEE-14.

Condição	Tensão nas barras								
	V4	V5	V7	V9	V10	V11	V12	V13	V14
Sem TCSC	0,9903	0,9953	1,0018	0,9753	0,9697	0,9798	0,9778	0,9704	0,9462
TCSC linha 1	0,9908	0,9965	1,0021	0,9757	0,9700	0,9800	0,9778	0,9705	0,9465
TCSC linha 2	0,9839	0,9842	0,9987	0,9719	0,9667	0,9782	0,9775	0,9698	0,9439
TCSC linha 3	0,9926	0,9980	1,0029	0,9766	0,9708	0,9804	0,9778	0,9707	0,9471
TCSC linha 4	0,9823	0,9922	0,9984	0,9725	0,9674	0,9787	0,9775	0,9701	0,9444
TCSC linha 5	0,9889	0,9923	1,0010	0,9742	0,9687	0,9792	0,9777	0,9702	0,9454
TCSC linha 6	1,0074	1,0058	1,0093	0,9824	0,9756	0,9828	0,9783	0,9715	0,9508
TCSC linha 7	0,9879	0,9995	1,0010	0,9753	0,9698	0,9800	0,9777	0,9705	0,9462
TCSC linha 8	0,9932	0,9979	0,9995	0,9763	0,9708	0,9806	0,9777	0,9708	0,9469
TCSC linha 9	0,9908	0,9968	1,0070	0,9839	0,9772	0,9840	0,9782	0,9721	0,9519
TCSC linha 10	0,9930	0,9970	1,0004	0,9693	0,9637	0,9754	0,9775	0,9684	0,9414
TCSC linha 11	0,9906	0,9953	1,0025	0,9765	0,9718	0,9843	0,9778	0,9707	0,9470
TCSC linha 12	0,9903	0,9952	1,0017	0,9751	0,9695	0,9797	0,9802	0,9698	0,9458
TCSC linha 13	0,9905	0,9952	1,0021	0,9757	0,9701	0,9801	0,9780	0,9750	0,9485
TCSC linha 14	0,9971	0,9998	1,0321	0,9962	0,9871	0,9887	0,9794	0,9736	0,9598
TCSC linha 15	0,9904	0,9958	0,9981	0,9889	0,9811	0,9858	0,9787	0,9726	0,9551
TCSC linha 16	0,9903	0,9953	1,0017	0,9751	0,9711	0,9805	0,9778	0,9703	0,9460
TCSC linha 17	0,9903	0,9955	1,0020	0,9759	0,9701	0,9798	0,9779	0,9715	0,9496
TCSC linha 18	0,9905	0,9953	1,0022	0,9761	0,9710	0,9782	0,9778	0,9706	0,9467
TCSC linha 19	0,9903	0,9953	1,0018	0,9753	0,9697	0,9798	0,9777	0,9705	0,9462
TCSC linha 20	0,9905	0,9952	1,0021	0,9756	0,9700	0,9800	0,9777	0,9697	0,9482

Fonte: Do autor.

APÊNDICE C – Sistema IEEE-30

C.1 Magnitude de tensão nas barras do sistema IEEE-30 quando há um TCSC alocado de forma individual em cada uma das linhas do sistema.

Tabela 26 – Compensação de 20%. Sistema IEEE-30.

Condição	Tensão nas barras											
	V3	V4	V6	V7	V9	V10	V12	V14	V15	V16	V17	V18
Sem TCSC	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 1	1,0145	1,0134	1,0084	0,9998	1,0212	0,9976	1,0254	1,0077	1,0017	1,0052	0,9944	0,9936
TCSC linha 2	1,0139	1,0131	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0253	1,0076	1,0017	1,0051	0,9942	0,9935
TCSC linha 3	1,0144	1,0135	1,0084	0,9998	1,0212	0,9974	1,0255	1,0078	1,0018	1,0052	0,9943	0,9937
TCSC linha 4	1,0143	1,0131	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0076	1,0017	1,0051	0,9943	0,9935
TCSC linha 5	1,0146	1,0136	1,0086	0,9998	1,0213	0,9977	1,0254	1,0077	1,0018	1,0054	0,9945	0,9936
TCSC linha 6	1,0145	1,0135	1,0083	0,9997	1,0212	0,9977	1,0254	1,0076	1,0017	1,0053	0,9944	0,9934
TCSC linha 7	1,0149	1,0138	1,0082	0,9997	1,0212	0,9977	1,0254	1,0076	1,0017	1,0054	0,9945	0,9934
TCSC linha 8	1,0145	1,0134	1,0087	1,0017	1,0214	0,9977	1,0255	1,0077	1,0018	1,0053	0,9945	0,9937
TCSC linha 9	1,0142	1,0132	1,0084	0,9994	1,0212	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9936
TCSC linha 10	1,0146	1,0136	1,0090	1,0001	1,0215	0,9978	1,0255	1,0078	1,0019	1,0054	0,9946	0,9938
TCSC linha 11	1,0144	1,0135	1,0085	0,9998	1,0204	0,9975	1,0252	1,0073	1,0014	1,0052	0,9943	0,9930
TCSC linha 12	1,0143	1,0134	1,0083	0,9997	1,0218	0,9986	1,0254	1,0077	1,0019	1,0058	0,9952	0,9936
TCSC linha 13	1,0148	1,0138	1,0090	1,0001	1,0267	1,0013	1,0265	1,0090	1,0033	1,0074	0,9977	0,9957
TCSC linha 14	1,0143	1,0135	1,0084	0,9997	1,0202	1,0004	1,0260	1,0085	1,0027	1,0069	0,9968	0,9949
TCSC linha 15	1,0145	1,0135	1,0085	0,9999	1,0208	0,9964	1,0256	1,0080	1,0019	1,0045	0,9935	0,9942
TCSC linha 16	1,0149	1,0143	1,0088	1,0000	1,0223	0,9997	1,0310	1,0130	1,0067	1,0094	0,9972	0,9979
TCSC linha 17	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0254	1,0087	1,0018	1,0052	0,9943	0,9937
TCSC linha 18	1,0142	1,0132	1,0084	0,9997	1,0212	0,9976	1,0253	1,0080	1,0032	1,0053	0,9944	0,9950
TCSC linha 19	1,0142	1,0132	1,0084	0,9997	1,0214	0,9979	1,0251	1,0074	1,0015	1,0066	0,9951	0,9934
TCSC linha 20	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0075	1,0017	1,0052	0,9943	0,9936
TCSC linha 21	1,0142	1,0132	1,0084	0,9997	1,0213	0,9978	1,0252	1,0074	1,0016	1,0044	0,9949	0,9934
TCSC linha 22	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0254	1,0077	1,0018	1,0052	0,9942	0,9940
TCSC linha 23	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9936
TCSC linha 24	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 25	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0212	0,9976	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9944	0,9934
TCSC linha 26	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0254	1,0077	1,0017	1,0053	0,9945	0,9936
TCSC linha 27	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0254	1,0077	1,0018	1,0052	0,9943	0,9937
TCSC linha 28	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0254	1,0077	1,0018	1,0052	0,9943	0,9936
TCSC linha 29	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 30	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9977	1,0252	1,0074	1,0013	1,0052	0,9944	0,9931
TCSC linha 31	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0254	1,0077	1,0019	1,0051	0,9942	0,9937
TCSC linha 32	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9976	1,0252	1,0074	1,0013	1,0052	0,9944	0,9932
TCSC linha 33	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0253	1,0076	1,0016	1,0051	0,9943	0,9935
TCSC linha 34	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 35	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9936
TCSC linha 36	1,0143	1,0134	1,0084	0,9998	1,0212	0,9976	1,0254	1,0078	1,0020	1,0053	0,9944	0,9938
TCSC linha 37	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 38	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 39	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 40	1,0143	1,0133	1,0085	0,9998	1,0212	0,9976	1,0254	1,0077	1,0018	1,0052	0,9944	0,9936
TCSC linha 41	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935

continua na próxima página ...

continuação da página anterior

Condição	Tensão nas barras											
	V19	V20	V21	V22	V23	V24	V25	V26	V27	V28	V29	V30
Sem TCSC	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 1	0,9755	0,9805	0,9835	0,9841	0,9843	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 2	0,9753	0,9803	0,9834	0,9839	0,9842	0,9702	0,9711	0,9511	0,9813	1,0029	0,9607	0,9461
TCSC linha 3	0,9753	0,9803	0,9834	0,9840	0,9843	0,9703	0,9712	0,9512	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 4	0,9754	0,9803	0,9834	0,9840	0,9842	0,9702	0,9711	0,9511	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 5	0,9757	0,9807	0,9837	0,9842	0,9843	0,9705	0,9714	0,9514	0,9816	1,0031	0,9610	0,9464
TCSC linha 6	0,9757	0,9806	0,9836	0,9842	0,9843	0,9704	0,9713	0,9513	0,9815	1,0029	0,9608	0,9462
TCSC linha 7	0,9758	0,9808	0,9837	0,9842	0,9843	0,9704	0,9713	0,9513	0,9815	1,0029	0,9609	0,9463
TCSC linha 8	0,9756	0,9806	0,9837	0,9842	0,9844	0,9705	0,9714	0,9514	0,9816	1,0033	0,9610	0,9464
TCSC linha 9	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 10	0,9757	0,9807	0,9838	0,9843	0,9845	0,9706	0,9716	0,9516	0,9818	1,0034	0,9612	0,9466
TCSC linha 11	0,9758	0,9806	0,9835	0,9840	0,9840	0,9701	0,9708	0,9508	0,9809	1,0031	0,9603	0,9457
TCSC linha 12	0,9767	0,9816	0,9845	0,9850	0,9845	0,9708	0,9713	0,9513	0,9812	1,0030	0,9605	0,9459
TCSC linha 13	0,9787	0,9838	0,9871	0,9876	0,9863	0,9731	0,9732	0,9532	0,9829	1,0036	0,9622	0,9477
TCSC linha 14	0,9780	0,9831	0,9862	0,9867	0,9856	0,9722	0,9723	0,9523	0,9820	1,0031	0,9614	0,9468
TCSC linha 15	0,9736	0,9787	0,9824	0,9830	0,9840	0,9697	0,9704	0,9504	0,9806	1,0031	0,9599	0,9453
TCSC linha 16	0,9785	0,9833	0,9858	0,9864	0,9883	0,9731	0,9731	0,9532	0,9827	1,0034	0,9621	0,9476
TCSC linha 17	0,9754	0,9803	0,9835	0,9840	0,9843	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 18	0,9756	0,9805	0,9836	0,9842	0,9853	0,9708	0,9715	0,9515	0,9815	1,0030	0,9609	0,9463
TCSC linha 19	0,9759	0,9808	0,9839	0,9844	0,9842	0,9705	0,9713	0,9513	0,9814	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 20	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 21	0,9757	0,9807	0,9837	0,9843	0,9842	0,9704	0,9713	0,9513	0,9814	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 22	0,9751	0,9801	0,9834	0,9839	0,9843	0,9703	0,9712	0,9512	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 23	0,9754	0,9803	0,9834	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 24	0,9759	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 25	0,9771	0,9820	0,9836	0,9841	0,9842	0,9704	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 26	0,9754	0,9803	0,9834	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 27	0,9754	0,9803	0,9845	0,9849	0,9845	0,9708	0,9715	0,9515	0,9815	1,0030	0,9609	0,9463
TCSC linha 28	0,9754	0,9803	0,9838	0,9845	0,9844	0,9706	0,9713	0,9513	0,9814	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 29	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 30	0,9755	0,9805	0,9837	0,9843	0,9856	0,9710	0,9716	0,9516	0,9816	1,0030	0,9610	0,9464
TCSC linha 31	0,9753	0,9802	0,9833	0,9838	0,9846	0,9710	0,9715	0,9515	0,9815	1,0030	0,9609	0,9463
TCSC linha 32	0,9755	0,9805	0,9837	0,9843	0,9833	0,9710	0,9716	0,9516	0,9816	1,0030	0,9610	0,9464
TCSC linha 33	0,9754	0,9803	0,9834	0,9839	0,9841	0,9702	0,9716	0,9516	0,9817	1,0030	0,9610	0,9464
TCSC linha 34	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9531	0,9814	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 35	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9843	0,9705	0,9717	0,9517	0,9814	1,0029	0,9607	0,9461
TCSC linha 36	0,9756	0,9805	0,9837	0,9843	0,9850	0,9716	0,9747	0,9548	0,9863	1,0029	0,9657	0,9512
TCSC linha 37	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9713	0,9513	0,9815	1,0030	0,9615	0,9467
TCSC linha 38	0,9755	0,9804	0,9835	0,9841	0,9843	0,9704	0,9714	0,9514	0,9816	1,0030	0,9616	0,9474
TCSC linha 39	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9606	0,9465
TCSC linha 40	0,9755	0,9805	0,9836	0,9841	0,9843	0,9704	0,9714	0,9515	0,9817	1,0034	0,9611	0,9465
TCSC linha 41	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9714	0,9514	0,9817	1,0032	0,9611	0,9465

Fonte: Do autor.

Tabela 27 – Compensação de 30%. Sistema IEEE-30.

Condição	Tensão nas barras											
	V3	V4	V6	V7	V9	V10	V12	V14	V15	V16	V17	V18
Sem TCSC	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 1	1,0146	1,0135	1,0084	0,9998	1,0212	0,9976	1,0254	1,0077	1,0018	1,0053	0,9944	0,9936
TCSC linha 2	1,0135	1,0128	1,0082	0,9996	1,0210	0,9973	1,0252	1,0075	1,0016	1,0050	0,9941	0,9934
TCSC linha 3	1,0144	1,0134	1,0085	0,9998	1,0211	0,9974	1,0255	1,0078	1,0019	1,0051	0,9942	0,9938
TCSC linha 4	1,0143	1,0130	1,0084	0,9997	1,0211	0,9974	1,0253	1,0076	1,0017	1,0051	0,9943	0,9935
TCSC linha 5	1,0148	1,0138	1,0087	0,9999	1,0214	0,9979	1,0255	1,0077	1,0018	1,0054	0,9946	0,9936
TCSC linha 6	1,0146	1,0136	1,0082	0,9996	1,0212	0,9977	1,0253	1,0075	1,0017	1,0053	0,9945	0,9933
TCSC linha 7	1,0153	1,0142	1,0082	0,9996	1,0212	0,9978	1,0254	1,0076	1,0017	1,0055	0,9946	0,9934
TCSC linha 8	1,0146	1,0136	1,0090	1,0030	1,0215	0,9978	1,0255	1,0078	1,0019	1,0054	0,9946	0,9938
TCSC linha 9	1,0142	1,0132	1,0085	0,9991	1,0212	0,9975	1,0254	1,0077	1,0017	1,0052	0,9943	0,9936
TCSC linha 10	1,0149	1,0138	1,0093	1,0003	1,0217	0,9980	1,0256	1,0079	1,0020	1,0056	0,9948	0,9939
TCSC linha 11	1,0145	1,0136	1,0086	0,9999	1,0199	0,9975	1,0250	1,0072	1,0013	1,0052	0,9942	0,9927
TCSC linha 12	1,0143	1,0136	1,0083	0,9997	1,0222	0,9993	1,0255	1,0078	1,0020	1,0062	0,9958	0,9937
TCSC linha 13	1,0151	1,0141	1,0095	1,0004	1,0301	1,0036	1,0271	1,0098	1,0043	1,0088	0,9997	0,9970
TCSC linha 14	1,0144	1,0136	1,0084	0,9997	1,0196	1,0020	1,0264	1,0089	1,0033	1,0078	0,9982	0,9956
TCSC linha 15	1,0146	1,0137	1,0087	0,9999	1,0205	0,9958	1,0257	1,0082	1,0019	1,0040	0,9929	0,9945
TCSC linha 16	1,0153	1,0149	1,0090	1,0001	1,0230	1,0010	1,0343	1,0161	1,0095	1,0119	0,9988	1,0004
TCSC linha 17	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0254	1,0093	1,0019	1,0052	0,9943	0,9938
TCSC linha 18	1,0142	1,0132	1,0084	0,9997	1,0212	0,9976	1,0254	1,0082	1,0040	1,0053	0,9944	0,9957
TCSC linha 19	1,0142	1,0131	1,0084	0,9998	1,0215	0,9982	1,0249	1,0072	1,0014	1,0074	0,9955	0,9933
TCSC linha 20	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0074	1,0018	1,0052	0,9943	0,9936
TCSC linha 21	1,0142	1,0132	1,0084	0,9997	1,0214	0,9980	1,0251	1,0074	1,0015	1,0039	0,9952	0,9934
TCSC linha 22	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0254	1,0078	1,0019	1,0052	0,9942	0,9942
TCSC linha 23	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9936
TCSC linha 24	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 25	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0213	0,9977	1,0253	1,0075	1,0017	1,0052	0,9945	0,9933
TCSC linha 26	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0254	1,0077	1,0017	1,0054	0,9945	0,9936
TCSC linha 27	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0254	1,0078	1,0019	1,0052	0,9943	0,9938
TCSC linha 28	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0254	1,0077	1,0018	1,0052	0,9943	0,9937
TCSC linha 29	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 30	1,0142	1,0132	1,0084	0,9997	1,0213	0,9977	1,0252	1,0072	1,0011	1,0052	0,9945	0,9930
TCSC linha 31	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0211	0,9973	1,0254	1,0078	1,0020	1,0051	0,9942	0,9938
TCSC linha 32	1,0142	1,0132	1,0084	0,9997	1,0213	0,9977	1,0251	1,0072	1,0011	1,0052	0,9945	0,9930
TCSC linha 33	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0253	1,0076	1,0016	1,0051	0,9942	0,9934
TCSC linha 34	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 35	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0076	1,0018	1,0052	0,9943	0,9936
TCSC linha 36	1,0143	1,0134	1,0084	0,9998	1,0213	0,9976	1,0255	1,0079	1,0022	1,0053	0,9945	0,9940
TCSC linha 37	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 38	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0077	1,0017	1,0052	0,9944	0,9936
TCSC linha 39	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 40	1,0143	1,0133	1,0085	0,9998	1,0213	0,9976	1,0254	1,0077	1,0018	1,0053	0,9945	0,9936
TCSC linha 41	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0076	1,0017	1,0051	0,9943	0,9935

continua na próxima página ...

continuação da página anterior

Condição	Tensão nas barras											
	V19	V20	V21	V22	V23	V24	V25	V26	V27	V28	V29	V30
Sem TCSC	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 1	0,9755	0,9805	0,9836	0,9841	0,9843	0,9704	0,9713	0,9513	0,9815	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 2	0,9752	0,9802	0,9833	0,9838	0,9841	0,9701	0,9710	0,9510	0,9812	1,0028	0,9605	0,9459
TCSC linha 3	0,9751	0,9801	0,9833	0,9839	0,9843	0,9703	0,9711	0,9511	0,9813	1,0031	0,9606	0,9460
TCSC linha 4	0,9753	0,9803	0,9834	0,9839	0,9842	0,9702	0,9711	0,9511	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 5	0,9759	0,9808	0,9838	0,9844	0,9844	0,9706	0,9715	0,9515	0,9817	1,0032	0,9611	0,9465
TCSC linha 6	0,9758	0,9807	0,9836	0,9842	0,9842	0,9704	0,9713	0,9513	0,9814	1,0028	0,9608	0,9462
TCSC linha 7	0,9761	0,9810	0,9838	0,9843	0,9843	0,9705	0,9714	0,9514	0,9816	1,0028	0,9609	0,9463
TCSC linha 8	0,9757	0,9807	0,9838	0,9843	0,9845	0,9706	0,9716	0,9516	0,9818	1,0035	0,9612	0,9466
TCSC linha 9	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9843	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0031	0,9608	0,9462
TCSC linha 10	0,9759	0,9809	0,9840	0,9845	0,9846	0,9708	0,9718	0,9519	0,9821	1,0037	0,9615	0,9469
TCSC linha 11	0,9759	0,9807	0,9834	0,9839	0,9838	0,9699	0,9706	0,9506	0,9807	1,0032	0,9600	0,9454
TCSC linha 12	0,9775	0,9824	0,9852	0,9857	0,9848	0,9712	0,9713	0,9513	0,9811	1,0030	0,9604	0,9458
TCSC linha 13	0,9807	0,9859	0,9894	0,9898	0,9877	0,9748	0,9744	0,9545	0,9838	1,0040	0,9632	0,9486
TCSC linha 14	0,9795	0,9845	0,9877	0,9882	0,9864	0,9732	0,9729	0,9529	0,9823	1,0032	0,9617	0,9471
TCSC linha 15	0,9725	0,9777	0,9818	0,9824	0,9839	0,9693	0,9700	0,9500	0,9801	1,0032	0,9594	0,9448
TCSC linha 16	0,9803	0,9849	0,9872	0,9878	0,9906	0,9747	0,9742	0,9543	0,9835	1,0037	0,9630	0,9484
TCSC linha 17	0,9753	0,9803	0,9835	0,9840	0,9843	0,9703	0,9712	0,9512	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 18	0,9756	0,9806	0,9837	0,9843	0,9859	0,9711	0,9716	0,9516	0,9816	1,0030	0,9609	0,9464
TCSC linha 19	0,9761	0,9811	0,9841	0,9846	0,9842	0,9706	0,9714	0,9514	0,9815	1,0030	0,9609	0,9463
TCSC linha 20	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9843	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 21	0,9759	0,9808	0,9839	0,9844	0,9842	0,9705	0,9713	0,9513	0,9815	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 22	0,9749	0,9800	0,9834	0,9839	0,9843	0,9702	0,9711	0,9511	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 23	0,9753	0,9803	0,9834	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 24	0,9761	0,9805	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 25	0,9779	0,9828	0,9837	0,9842	0,9842	0,9704	0,9713	0,9513	0,9814	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 26	0,9753	0,9803	0,9834	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 27	0,9754	0,9803	0,9850	0,9853	0,9847	0,9711	0,9716	0,9516	0,9816	1,0030	0,9609	0,9463
TCSC linha 28	0,9754	0,9803	0,9840	0,9847	0,9845	0,9707	0,9714	0,9514	0,9815	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 29	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9702	0,9712	0,9512	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 30	0,9756	0,9806	0,9838	0,9844	0,9864	0,9714	0,9718	0,9518	0,9818	1,0030	0,9611	0,9465
TCSC linha 31	0,9752	0,9802	0,9832	0,9837	0,9848	0,9713	0,9717	0,9517	0,9816	1,0030	0,9610	0,9464
TCSC linha 32	0,9755	0,9805	0,9838	0,9844	0,9828	0,9713	0,9718	0,9518	0,9818	1,0030	0,9611	0,9465
TCSC linha 33	0,9753	0,9803	0,9834	0,9839	0,9841	0,9701	0,9718	0,9518	0,9818	1,0030	0,9612	0,9466
TCSC linha 34	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9713	0,9541	0,9814	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 35	0,9754	0,9804	0,9835	0,9841	0,9844	0,9706	0,9720	0,9520	0,9814	1,0029	0,9607	0,9461
TCSC linha 36	0,9756	0,9806	0,9839	0,9845	0,9853	0,9722	0,9765	0,9566	0,9887	1,0030	0,9682	0,9538
TCSC linha 37	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9713	0,9513	0,9816	1,0030	0,9618	0,9469
TCSC linha 38	0,9755	0,9804	0,9835	0,9841	0,9843	0,9704	0,9715	0,9515	0,9818	1,0030	0,9619	0,9479
TCSC linha 39	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9606	0,9467
TCSC linha 40	0,9756	0,9805	0,9836	0,9842	0,9844	0,9705	0,9716	0,9516	0,9819	1,0037	0,9613	0,9467
TCSC linha 41	0,9754	0,9803	0,9834	0,9840	0,9843	0,9704	0,9715	0,9515	0,9819	1,0033	0,9612	0,9466

Fonte: Do autor.

Tabela 28 – Compensação de 40%. Sistema IEEE-30.

Condição	Tensão nas barras											
	V3	V4	V6	V7	V9	V10	V12	V14	V15	V16	V17	V18
Sem TCSC	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 1	1,0148	1,0136	1,0085	0,9998	1,0212	0,9976	1,0255	1,0077	1,0018	1,0053	0,9944	0,9936
TCSC linha 2	1,0127	1,0122	1,0079	0,9994	1,0208	0,9971	1,0250	1,0073	1,0014	1,0048	0,9939	0,9932
TCSC linha 3	1,0143	1,0132	1,0084	0,9998	1,0211	0,9972	1,0255	1,0078	1,0018	1,0050	0,9941	0,9938
TCSC linha 4	1,0143	1,0130	1,0084	0,9997	1,0211	0,9974	1,0253	1,0076	1,0017	1,0051	0,9942	0,9935
TCSC linha 5	1,0149	1,0140	1,0088	0,9999	1,0215	0,9980	1,0255	1,0077	1,0019	1,0055	0,9947	0,9936
TCSC linha 6	1,0145	1,0137	1,0078	0,9994	1,0210	0,9976	1,0252	1,0074	1,0016	1,0053	0,9944	0,9932
TCSC linha 7	1,0158	1,0146	1,0081	0,9996	1,0213	0,9980	1,0254	1,0076	1,0018	1,0056	0,9947	0,9933
TCSC linha 8	1,0148	1,0137	1,0093	1,0044	1,0216	0,9980	1,0256	1,0079	1,0020	1,0055	0,9948	0,9939
TCSC linha 9	1,0143	1,0132	1,0085	0,9988	1,0212	0,9976	1,0254	1,0077	1,0018	1,0052	0,9944	0,9936
TCSC linha 10	1,0152	1,0140	1,0098	1,0006	1,0219	0,9983	1,0258	1,0081	1,0022	1,0057	0,9950	0,9941
TCSC linha 11	1,0146	1,0138	1,0088	1,0000	1,0194	0,9974	1,0249	1,0070	1,0011	1,0051	0,9941	0,9923
TCSC linha 12	1,0144	1,0137	1,0083	0,9997	1,0226	1,0001	1,0255	1,0078	1,0021	1,0067	0,9965	0,9938
TCSC linha 13	1,0155	1,0145	1,0099	1,0007	1,0341	1,0063	1,0279	1,0108	1,0055	1,0104	1,0021	0,9985
TCSC linha 14	1,0145	1,0137	1,0084	0,9998	1,0191	1,0036	1,0268	1,0094	1,0039	1,0087	0,9996	0,9963
TCSC linha 15	1,0149	1,0140	1,0088	1,0000	1,0203	0,9950	1,0256	1,0082	1,0018	1,0034	0,9923	0,9948
TCSC linha 16	1,0157	1,0156	1,0093	1,0003	1,0238	1,0024	1,0379	1,0195	1,0127	1,0146	1,0006	1,0032
TCSC linha 17	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0254	1,0097	1,0019	1,0052	0,9943	0,9938
TCSC linha 18	1,0142	1,0131	1,0084	0,9997	1,0213	0,9977	1,0254	1,0084	1,0047	1,0054	0,9945	0,9965
TCSC linha 19	1,0142	1,0131	1,0084	0,9998	1,0216	0,9984	1,0248	1,0071	1,0014	1,0082	0,9960	0,9932
TCSC linha 20	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0074	1,0018	1,0052	0,9943	0,9936
TCSC linha 21	1,0142	1,0131	1,0084	0,9998	1,0215	0,9981	1,0250	1,0073	1,0015	1,0035	0,9955	0,9933
TCSC linha 22	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9973	1,0255	1,0078	1,0019	1,0052	0,9942	0,9944
TCSC linha 23	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0254	1,0077	1,0017	1,0052	0,9943	0,9936
TCSC linha 24	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9944	0,9935
TCSC linha 25	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0213	0,9978	1,0253	1,0075	1,0016	1,0052	0,9946	0,9932
TCSC linha 26	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0254	1,0077	1,0017	1,0054	0,9946	0,9936
TCSC linha 27	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0255	1,0078	1,0020	1,0052	0,9943	0,9939
TCSC linha 28	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0254	1,0077	1,0019	1,0052	0,9943	0,9937
TCSC linha 29	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 30	1,0142	1,0132	1,0084	0,9997	1,0213	0,9978	1,0251	1,0071	1,0009	1,0052	0,9945	0,9928
TCSC linha 31	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0210	0,9973	1,0255	1,0078	1,0021	1,0051	0,9942	0,9939
TCSC linha 32	1,0142	1,0132	1,0084	0,9997	1,0213	0,9978	1,0251	1,0071	1,0009	1,0052	0,9945	0,9928
TCSC linha 33	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0253	1,0075	1,0016	1,0051	0,9942	0,9934
TCSC linha 34	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 35	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0077	1,0018	1,0052	0,9943	0,9936
TCSC linha 36	1,0144	1,0135	1,0085	0,9998	1,0213	0,9977	1,0255	1,0079	1,0023	1,0053	0,9945	0,9941
TCSC linha 37	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 38	1,0142	1,0133	1,0084	0,9997	1,0212	0,9976	1,0254	1,0077	1,0018	1,0052	0,9944	0,9936
TCSC linha 39	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 40	1,0144	1,0134	1,0086	0,9999	1,0213	0,9977	1,0255	1,0078	1,0019	1,0053	0,9945	0,9937
TCSC linha 41	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0253	1,0076	1,0017	1,0051	0,9943	0,9935

continua na próxima página ...

continuação da página anterior

Condição	Tensão nas barras											
	V19	V20	V21	V22	V23	V24	V25	V26	V27	V28	V29	V30
Sem TCSC	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 1	0,9756	0,9805	0,9836	0,9841	0,9843	0,9704	0,9713	0,9513	0,9815	1,0031	0,9608	0,9463
TCSC linha 2	0,9750	0,9799	0,9831	0,9836	0,9838	0,9699	0,9708	0,9508	0,9809	1,0026	0,9603	0,9457
TCSC linha 3	0,9750	0,9800	0,9832	0,9838	0,9842	0,9702	0,9710	0,9510	0,9812	1,0031	0,9605	0,9459
TCSC linha 4	0,9753	0,9803	0,9834	0,9839	0,9842	0,9702	0,9711	0,9511	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 5	0,9761	0,9810	0,9840	0,9845	0,9845	0,9707	0,9716	0,9516	0,9819	1,0033	0,9612	0,9466
TCSC linha 6	0,9758	0,9807	0,9836	0,9841	0,9841	0,9703	0,9711	0,9511	0,9813	1,0026	0,9607	0,9461
TCSC linha 7	0,9763	0,9812	0,9839	0,9844	0,9844	0,9706	0,9715	0,9515	0,9816	1,0028	0,9610	0,9464
TCSC linha 8	0,9759	0,9808	0,9840	0,9845	0,9846	0,9708	0,9718	0,9518	0,9820	1,0037	0,9614	0,9468
TCSC linha 9	0,9754	0,9804	0,9835	0,9841	0,9843	0,9704	0,9713	0,9513	0,9815	1,0031	0,9608	0,9462
TCSC linha 10	0,9761	0,9811	0,9842	0,9848	0,9848	0,9711	0,9721	0,9522	0,9824	1,0040	0,9618	0,9472
TCSC linha 11	0,9760	0,9808	0,9833	0,9838	0,9836	0,9697	0,9703	0,9503	0,9804	1,0033	0,9598	0,9451
TCSC linha 12	0,9784	0,9833	0,9859	0,9864	0,9850	0,9716	0,9714	0,9514	0,9809	1,0031	0,9603	0,9457
TCSC linha 13	0,9830	0,9883	0,9920	0,9923	0,9892	0,9767	0,9758	0,9559	0,9848	1,0045	0,9643	0,9497
TCSC linha 14	0,9809	0,9860	0,9893	0,9897	0,9872	0,9743	0,9735	0,9536	0,9827	1,0032	0,9621	0,9475
TCSC linha 15	0,9712	0,9766	0,9811	0,9817	0,9836	0,9688	0,9695	0,9494	0,9796	1,0033	0,9589	0,9443
TCSC linha 16	0,9823	0,9868	0,9887	0,9893	0,9932	0,9765	0,9755	0,9556	0,9844	1,0040	0,9639	0,9493
TCSC linha 17	0,9753	0,9803	0,9834	0,9840	0,9844	0,9703	0,9712	0,9512	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 18	0,9757	0,9806	0,9838	0,9844	0,9864	0,9713	0,9717	0,9518	0,9816	1,0031	0,9610	0,9464
TCSC linha 19	0,9764	0,9813	0,9843	0,9848	0,9842	0,9707	0,9714	0,9514	0,9815	1,0030	0,9609	0,9463
TCSC linha 20	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9843	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 21	0,9760	0,9810	0,9841	0,9846	0,9842	0,9706	0,9714	0,9514	0,9815	1,0030	0,9608	0,9463
TCSC linha 22	0,9747	0,9798	0,9833	0,9839	0,9843	0,9702	0,9711	0,9511	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 23	0,9753	0,9803	0,9834	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 24	0,9764	0,9805	0,9835	0,9841	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 25	0,9786	0,9835	0,9838	0,9843	0,9842	0,9705	0,9713	0,9513	0,9814	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 26	0,9753	0,9803	0,9834	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 27	0,9753	0,9803	0,9855	0,9857	0,9849	0,9714	0,9718	0,9518	0,9816	1,0030	0,9610	0,9464
TCSC linha 28	0,9753	0,9803	0,9842	0,9850	0,9846	0,9709	0,9715	0,9515	0,9815	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 29	0,9754	0,9804	0,9835	0,9839	0,9842	0,9702	0,9711	0,9512	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 30	0,9757	0,9807	0,9840	0,9846	0,9871	0,9717	0,9721	0,9521	0,9819	1,0031	0,9613	0,9467
TCSC linha 31	0,9752	0,9801	0,9831	0,9836	0,9850	0,9716	0,9719	0,9519	0,9817	1,0030	0,9611	0,9465
TCSC linha 32	0,9756	0,9806	0,9840	0,9846	0,9823	0,9717	0,9721	0,9521	0,9819	1,0031	0,9613	0,9467
TCSC linha 33	0,9753	0,9803	0,9833	0,9838	0,9841	0,9700	0,9720	0,9520	0,9820	1,0030	0,9614	0,9468
TCSC linha 34	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9713	0,9551	0,9814	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 35	0,9755	0,9804	0,9835	0,9841	0,9844	0,9706	0,9722	0,9522	0,9814	1,0029	0,9607	0,9461
TCSC linha 36	0,9757	0,9806	0,9840	0,9846	0,9857	0,9728	0,9782	0,9584	0,9911	1,0030	0,9707	0,9563
TCSC linha 37	0,9755	0,9804	0,9835	0,9841	0,9843	0,9704	0,9714	0,9514	0,9817	1,0030	0,9620	0,9471
TCSC linha 38	0,9755	0,9805	0,9836	0,9841	0,9843	0,9705	0,9716	0,9516	0,9820	1,0030	0,9622	0,9482
TCSC linha 39	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9713	0,9513	0,9815	1,0030	0,9606	0,9469
TCSC linha 40	0,9756	0,9806	0,9837	0,9843	0,9845	0,9706	0,9718	0,9518	0,9822	1,0041	0,9616	0,9470
TCSC linha 41	0,9754	0,9803	0,9834	0,9840	0,9843	0,9704	0,9716	0,9517	0,9820	1,0034	0,9614	0,9468

Fonte: Do autor.

Tabela 29 – Compensação de 50%. Sistema IEEE-30.

Condição	Tensão nas barras											
	V3	V4	V6	V7	V9	V10	V12	V14	V15	V16	V17	V18
Sem TCSC	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 1	1,0149	1,0136	1,0085	0,9998	1,0213	0,9976	1,0255	1,0077	1,0018	1,0053	0,9945	0,9936
TCSC linha 2	1,0114	1,0112	1,0074	0,9992	1,0206	0,9967	1,0247	1,0070	1,0010	1,0044	0,9936	0,9929
TCSC linha 3	1,0140	1,0128	1,0084	0,9997	1,0210	0,9971	1,0254	1,0078	1,0017	1,0049	0,9940	0,9938
TCSC linha 4	1,0143	1,0129	1,0084	0,9998	1,0211	0,9974	1,0253	1,0076	1,0016	1,0051	0,9942	0,9935
TCSC linha 5	1,0151	1,0141	1,0089	0,9998	1,0216	0,9981	1,0255	1,0078	1,0019	1,0056	0,9949	0,9936
TCSC linha 6	1,0143	1,0136	1,0073	0,9991	1,0208	0,9974	1,0251	1,0072	1,0014	1,0051	0,9942	0,9929
TCSC linha 7	1,0163	1,0150	1,0080	0,9995	1,0213	0,9981	1,0255	1,0076	1,0018	1,0057	0,9948	0,9933
TCSC linha 8	1,0150	1,0139	1,0096	1,0060	1,0218	0,9982	1,0257	1,0080	1,0021	1,0057	0,9949	0,9940
TCSC linha 9	1,0143	1,0133	1,0086	0,9984	1,0213	0,9976	1,0254	1,0077	1,0018	1,0052	0,9944	0,9937
TCSC linha 10	1,0155	1,0143	1,0103	1,0009	1,0222	0,9985	1,0259	1,0082	1,0024	1,0059	0,9953	0,9943
TCSC linha 11	1,0147	1,0139	1,0089	1,0001	1,0186	0,9972	1,0247	1,0067	1,0008	1,0050	0,9939	0,9919
TCSC linha 12	1,0145	1,0139	1,0083	0,9997	1,0232	1,0011	1,0256	1,0078	1,0022	1,0073	0,9974	0,9938
TCSC linha 13	1,0159	1,0150	1,0105	1,0010	1,0387	1,0095	1,0288	1,0120	1,0068	1,0123	1,0049	1,0003
TCSC linha 14	1,0145	1,0139	1,0084	0,9998	1,0185	1,0053	1,0271	1,0099	1,0045	1,0097	1,0011	0,9971
TCSC linha 15	1,0151	1,0144	1,0090	1,0001	1,0199	0,9942	1,0255	1,0082	1,0016	1,0026	0,9915	0,9950
TCSC linha 16	1,0162	1,0164	1,0096	1,0005	1,0246	1,0040	1,0419	1,0233	1,0162	1,0176	1,0027	1,0062
TCSC linha 17	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0255	1,0101	1,0019	1,0052	0,9943	0,9938
TCSC linha 18	1,0142	1,0131	1,0084	0,9998	1,0213	0,9977	1,0254	1,0085	1,0054	1,0054	0,9945	0,9972
TCSC linha 19	1,0142	1,0130	1,0084	0,9998	1,0218	0,9987	1,0247	1,0070	1,0013	1,0090	0,9964	0,9931
TCSC linha 20	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0074	1,0018	1,0052	0,9943	0,9936
TCSC linha 21	1,0142	1,0131	1,0084	0,9998	1,0216	0,9983	1,0248	1,0072	1,0014	1,0030	0,9958	0,9933
TCSC linha 22	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0210	0,9973	1,0255	1,0079	1,0020	1,0052	0,9941	0,9945
TCSC linha 23	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0254	1,0077	1,0017	1,0052	0,9943	0,9937
TCSC linha 24	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9976	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9944	0,9935
TCSC linha 25	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0213	0,9979	1,0253	1,0075	1,0016	1,0052	0,9947	0,9931
TCSC linha 26	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0254	1,0077	1,0018	1,0055	0,9947	0,9936
TCSC linha 27	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0255	1,0079	1,0021	1,0052	0,9943	0,9940
TCSC linha 28	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0254	1,0077	1,0019	1,0052	0,9943	0,9938
TCSC linha 29	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 30	1,0142	1,0131	1,0084	0,9998	1,0214	0,9979	1,0250	1,0070	1,0007	1,0052	0,9946	0,9926
TCSC linha 31	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0210	0,9972	1,0255	1,0079	1,0021	1,0051	0,9941	0,9940
TCSC linha 32	1,0142	1,0132	1,0084	0,9997	1,0214	0,9979	1,0250	1,0069	1,0006	1,0052	0,9946	0,9926
TCSC linha 33	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9973	1,0253	1,0075	1,0016	1,0051	0,9942	0,9934
TCSC linha 34	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 35	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0077	1,0018	1,0052	0,9943	0,9936
TCSC linha 36	1,0144	1,0136	1,0085	0,9998	1,0213	0,9976	1,0255	1,0080	1,0024	1,0054	0,9945	0,9942
TCSC linha 37	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9944	0,9936
TCSC linha 38	1,0142	1,0133	1,0084	0,9997	1,0212	0,9976	1,0254	1,0077	1,0018	1,0052	0,9944	0,9936
TCSC linha 39	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 40	1,0145	1,0135	1,0087	1,0000	1,0214	0,9978	1,0255	1,0078	1,0019	1,0054	0,9946	0,9938
TCSC linha 41	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0253	1,0076	1,0017	1,0051	0,9943	0,9935

continua na próxima página ...

continuação da página anterior

Condição	Tensão nas barras											
	V19	V20	V21	V22	V23	V24	V25	V26	V27	V28	V29	V30
Sem TCSC	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 1	0,9756	0,9806	0,9836	0,9842	0,9843	0,9704	0,9713	0,9513	0,9815	1,0031	0,9609	0,9463
TCSC linha 2	0,9746	0,9796	0,9827	0,9832	0,9835	0,9695	0,9704	0,9504	0,9806	1,0023	0,9599	0,9453
TCSC linha 3	0,9747	0,9797	0,9831	0,9836	0,9841	0,9700	0,9709	0,9509	0,9810	1,0030	0,9604	0,9458
TCSC linha 4	0,9752	0,9802	0,9834	0,9839	0,9841	0,9702	0,9711	0,9511	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 5	0,9762	0,9812	0,9841	0,9846	0,9845	0,9708	0,9718	0,9518	0,9820	1,0034	0,9614	0,9468
TCSC linha 6	0,9757	0,9806	0,9834	0,9839	0,9839	0,9700	0,9709	0,9509	0,9810	1,0022	0,9604	0,9458
TCSC linha 7	0,9765	0,9814	0,9840	0,9846	0,9844	0,9706	0,9715	0,9515	0,9817	1,0027	0,9611	0,9465
TCSC linha 8	0,9760	0,9810	0,9841	0,9847	0,9848	0,9710	0,9720	0,9520	0,9822	1,0039	0,9616	0,9470
TCSC linha 9	0,9755	0,9804	0,9836	0,9841	0,9843	0,9704	0,9713	0,9513	0,9815	1,0032	0,9609	0,9463
TCSC linha 10	0,9764	0,9813	0,9845	0,9850	0,9851	0,9713	0,9725	0,9525	0,9828	1,0044	0,9622	0,9476
TCSC linha 11	0,9761	0,9808	0,9831	0,9837	0,9834	0,9694	0,9700	0,9500	0,9801	1,0034	0,9594	0,9448
TCSC linha 12	0,9795	0,9844	0,9869	0,9873	0,9853	0,9720	0,9714	0,9514	0,9807	1,0031	0,9601	0,9455
TCSC linha 13	0,9857	0,9911	0,9950	0,9953	0,9909	0,9790	0,9775	0,9576	0,9861	1,0050	0,9655	0,9510
TCSC linha 14	0,9825	0,9876	0,9909	0,9913	0,9880	0,9755	0,9742	0,9543	0,9830	1,0033	0,9624	0,9479
TCSC linha 15	0,9698	0,9753	0,9803	0,9809	0,9832	0,9683	0,9688	0,9488	0,9790	1,0034	0,9583	0,9436
TCSC linha 16	0,9845	0,9888	0,9903	0,9910	0,9961	0,9785	0,9769	0,9570	0,9854	1,0043	0,9649	0,9503
TCSC linha 17	0,9752	0,9802	0,9834	0,9840	0,9844	0,9703	0,9712	0,9512	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 18	0,9756	0,9806	0,9838	0,9844	0,9869	0,9716	0,9719	0,9519	0,9817	1,0031	0,9611	0,9465
TCSC linha 19	0,9766	0,9816	0,9846	0,9851	0,9842	0,9708	0,9715	0,9515	0,9816	1,0031	0,9610	0,9464
TCSC linha 20	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9843	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 21	0,9762	0,9812	0,9842	0,9847	0,9842	0,9706	0,9714	0,9514	0,9815	1,0030	0,9609	0,9463
TCSC linha 22	0,9745	0,9796	0,9833	0,9838	0,9844	0,9702	0,9711	0,9511	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 23	0,9752	0,9802	0,9834	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 24	0,9766	0,9806	0,9835	0,9841	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 25	0,9794	0,9842	0,9839	0,9844	0,9843	0,9705	0,9713	0,9513	0,9815	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 26	0,9753	0,9802	0,9834	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 27	0,9753	0,9803	0,9861	0,9862	0,9850	0,9716	0,9719	0,9519	0,9817	1,0030	0,9611	0,9465
TCSC linha 28	0,9753	0,9803	0,9843	0,9852	0,9846	0,9710	0,9715	0,9515	0,9815	1,0030	0,9608	0,9463
TCSC linha 29	0,9754	0,9804	0,9835	0,9839	0,9842	0,9702	0,9711	0,9511	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 30	0,9758	0,9807	0,9841	0,9847	0,9879	0,9721	0,9723	0,9523	0,9820	1,0031	0,9614	0,9468
TCSC linha 31	0,9751	0,9801	0,9830	0,9835	0,9852	0,9720	0,9721	0,9521	0,9818	1,0030	0,9611	0,9465
TCSC linha 32	0,9756	0,9806	0,9841	0,9847	0,9817	0,9721	0,9723	0,9523	0,9821	1,0031	0,9615	0,9469
TCSC linha 33	0,9753	0,9802	0,9833	0,9838	0,9840	0,9700	0,9723	0,9523	0,9822	1,0030	0,9616	0,9470
TCSC linha 34	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9713	0,9560	0,9815	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 35	0,9755	0,9804	0,9836	0,9841	0,9845	0,9707	0,9725	0,9525	0,9814	1,0029	0,9608	0,9462
TCSC linha 36	0,9757	0,9806	0,9840	0,9847	0,9860	0,9733	0,9799	0,9601	0,9935	1,0030	0,9732	0,9588
TCSC linha 37	0,9755	0,9804	0,9835	0,9841	0,9843	0,9704	0,9715	0,9515	0,9818	1,0030	0,9622	0,9472
TCSC linha 38	0,9755	0,9805	0,9836	0,9841	0,9844	0,9705	0,9718	0,9518	0,9821	1,0031	0,9624	0,9484
TCSC linha 39	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9713	0,9513	0,9815	1,0030	0,9606	0,9470
TCSC linha 40	0,9757	0,9807	0,9838	0,9844	0,9846	0,9708	0,9721	0,9521	0,9825	1,0045	0,9619	0,9473
TCSC linha 41	0,9754	0,9803	0,9834	0,9840	0,9843	0,9704	0,9718	0,9518	0,9822	1,0035	0,9616	0,9470

Fonte: Do autor.

Tabela 30 – Compensação de 60%. Sistema IEEE-30.

Condição	Tensão nas barras											
	V3	V4	V6	V7	V9	V10	V12	V14	V15	V16	V17	V18
Sem TCSC	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 1	1,0149	1,0137	1,0085	0,9998	1,0213	0,9977	1,0255	1,0077	1,0018	1,0053	0,9945	0,9936
TCSC linha 2	1,0093	1,0096	1,0067	0,9987	1,0201	0,9962	1,0241	1,0064	1,0004	1,0038	0,9930	0,9923
TCSC linha 3	1,0135	1,0119	1,0082	0,9996	1,0208	0,9968	1,0252	1,0076	1,0015	1,0046	0,9937	0,9936
TCSC linha 4	1,0144	1,0128	1,0084	0,9998	1,0211	0,9974	1,0253	1,0076	1,0016	1,0050	0,9942	0,9935
TCSC linha 5	1,0153	1,0143	1,0089	0,9998	1,0216	0,9982	1,0256	1,0078	1,0019	1,0057	0,9950	0,9936
TCSC linha 6	1,0138	1,0133	1,0063	0,9984	1,0203	0,9970	1,0248	1,0069	1,0010	1,0048	0,9938	0,9924
TCSC linha 7	1,0169	1,0155	1,0079	0,9995	1,0213	0,9982	1,0255	1,0076	1,0018	1,0059	0,9949	0,9932
TCSC linha 8	1,0153	1,0141	1,0100	1,0078	1,0220	0,9984	1,0258	1,0082	1,0023	1,0058	0,9951	0,9942
TCSC linha 9	1,0143	1,0133	1,0087	0,9980	1,0213	0,9976	1,0255	1,0077	1,0018	1,0053	0,9944	0,9937
TCSC linha 10	1,0159	1,0146	1,0109	1,0012	1,0225	0,9988	1,0261	1,0084	1,0026	1,0062	0,9956	0,9945
TCSC linha 11	1,0149	1,0141	1,0091	1,0002	1,0177	0,9969	1,0245	1,0064	1,0005	1,0049	0,9937	0,9914
TCSC linha 12	1,0146	1,0141	1,0083	0,9997	1,0239	1,0023	1,0256	1,0079	1,0023	1,0079	0,9983	0,9938
TCSC linha 13	1,0165	1,0155	1,0112	1,0014	1,0441	1,0132	1,0299	1,0133	1,0084	1,0145	1,0082	1,0024
TCSC linha 14	1,0146	1,0140	1,0084	0,9998	1,0179	1,0071	1,0276	1,0104	1,0051	1,0107	1,0027	0,9980
TCSC linha 15	1,0155	1,0149	1,0091	1,0002	1,0196	0,9932	1,0252	1,0080	1,0012	1,0017	0,9906	0,9950
TCSC linha 16	1,0168	1,0173	1,0099	1,0007	1,0256	1,0057	1,0464	1,0275	1,0201	1,0209	1,0049	1,0097
TCSC linha 17	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0255	1,0104	1,0019	1,0053	0,9943	0,9939
TCSC linha 18	1,0142	1,0131	1,0084	0,9998	1,0213	0,9977	1,0255	1,0086	1,0060	1,0055	0,9945	0,9978
TCSC linha 19	1,0142	1,0130	1,0085	0,9998	1,0219	0,9989	1,0245	1,0068	1,0012	1,0099	0,9969	0,9930
TCSC linha 20	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0073	1,0018	1,0052	0,9943	0,9936
TCSC linha 21	1,0142	1,0131	1,0084	0,9998	1,0217	0,9985	1,0247	1,0071	1,0013	1,0026	0,9961	0,9932
TCSC linha 22	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0210	0,9972	1,0255	1,0080	1,0021	1,0052	0,9941	0,9946
TCSC linha 23	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0254	1,0077	1,0017	1,0052	0,9943	0,9937
TCSC linha 24	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0212	0,9976	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9944	0,9935
TCSC linha 25	1,0142	1,0133	1,0084	0,9997	1,0214	0,9980	1,0253	1,0074	1,0015	1,0053	0,9947	0,9929
TCSC linha 26	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0254	1,0077	1,0018	1,0055	0,9948	0,9937
TCSC linha 27	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0255	1,0079	1,0022	1,0052	0,9943	0,9941
TCSC linha 28	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0254	1,0078	1,0020	1,0052	0,9943	0,9939
TCSC linha 29	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 30	1,0142	1,0131	1,0084	0,9998	1,0214	0,9980	1,0249	1,0069	1,0004	1,0052	0,9947	0,9924
TCSC linha 31	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0210	0,9972	1,0255	1,0079	1,0022	1,0051	0,9941	0,9941
TCSC linha 32	1,0142	1,0131	1,0084	0,9998	1,0214	0,9980	1,0249	1,0068	1,0004	1,0052	0,9946	0,9924
TCSC linha 33	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9973	1,0253	1,0075	1,0015	1,0050	0,9941	0,9934
TCSC linha 34	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 35	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0077	1,0018	1,0052	0,9943	0,9936
TCSC linha 36	1,0145	1,0137	1,0086	0,9999	1,0214	0,9976	1,0255	1,0080	1,0026	1,0054	0,9944	0,9943
TCSC linha 37	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0077	1,0017	1,0052	0,9944	0,9936
TCSC linha 38	1,0142	1,0133	1,0084	0,9997	1,0212	0,9976	1,0254	1,0077	1,0018	1,0053	0,9944	0,9936
TCSC linha 39	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 40	1,0146	1,0135	1,0089	1,0001	1,0215	0,9979	1,0256	1,0079	1,0020	1,0055	0,9947	0,9938
TCSC linha 41	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0253	1,0076	1,0017	1,0051	0,9942	0,9935

continua na próxima página ...

continuação da página anterior

Condição	Tensão nas barras											
	V19	V20	V21	V22	V23	V24	V25	V26	V27	V28	V29	V30
Sem TCSC	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 1	0,9756	0,9806	0,9836	0,9842	0,9844	0,9704	0,9713	0,9513	0,9815	1,0031	0,9609	0,9463
TCSC linha 2	0,9740	0,9789	0,9821	0,9827	0,9829	0,9689	0,9698	0,9497	0,9799	1,0017	0,9593	0,9446
TCSC linha 3	0,9743	0,9794	0,9828	0,9833	0,9839	0,9698	0,9706	0,9506	0,9808	1,0029	0,9601	0,9455
TCSC linha 4	0,9752	0,9802	0,9833	0,9839	0,9841	0,9702	0,9711	0,9511	0,9813	1,0030	0,9606	0,9460
TCSC linha 5	0,9764	0,9813	0,9842	0,9847	0,9846	0,9709	0,9719	0,9519	0,9821	1,0034	0,9615	0,9469
TCSC linha 6	0,9754	0,9803	0,9829	0,9835	0,9835	0,9695	0,9703	0,9503	0,9804	1,0014	0,9598	0,9451
TCSC linha 7	0,9768	0,9816	0,9842	0,9847	0,9845	0,9707	0,9716	0,9516	0,9818	1,0026	0,9611	0,9465
TCSC linha 8	0,9762	0,9812	0,9844	0,9849	0,9849	0,9712	0,9722	0,9522	0,9825	1,0042	0,9619	0,9473
TCSC linha 9	0,9755	0,9805	0,9836	0,9841	0,9843	0,9704	0,9714	0,9514	0,9816	1,0033	0,9609	0,9463
TCSC linha 10	0,9767	0,9816	0,9848	0,9854	0,9853	0,9717	0,9729	0,9529	0,9832	1,0049	0,9626	0,9480
TCSC linha 11	0,9761	0,9807	0,9829	0,9834	0,9830	0,9691	0,9697	0,9496	0,9797	1,0035	0,9591	0,9444
TCSC linha 12	0,9809	0,9857	0,9880	0,9884	0,9856	0,9725	0,9714	0,9514	0,9805	1,0031	0,9598	0,9452
TCSC linha 13	0,9888	0,9944	0,9986	0,9988	0,9930	0,9818	0,9794	0,9596	0,9875	1,0057	0,9670	0,9525
TCSC linha 14	0,9841	0,9893	0,9926	0,9929	0,9889	0,9766	0,9749	0,9550	0,9834	1,0034	0,9628	0,9483
TCSC linha 15	0,9681	0,9738	0,9793	0,9799	0,9826	0,9675	0,9681	0,9481	0,9783	1,0035	0,9576	0,9429
TCSC linha 16	0,9869	0,9910	0,9922	0,9928	0,9993	0,9807	0,9784	0,9585	0,9865	1,0047	0,9660	0,9515
TCSC linha 17	0,9751	0,9801	0,9834	0,9839	0,9843	0,9703	0,9711	0,9511	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 18	0,9756	0,9805	0,9839	0,9845	0,9873	0,9718	0,9720	0,9520	0,9817	1,0031	0,9611	0,9465
TCSC linha 19	0,9769	0,9819	0,9848	0,9853	0,9842	0,9709	0,9716	0,9516	0,9816	1,0031	0,9610	0,9464
TCSC linha 20	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9843	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 21	0,9764	0,9813	0,9844	0,9849	0,9842	0,9707	0,9715	0,9515	0,9816	1,0030	0,9609	0,9463
TCSC linha 22	0,9743	0,9794	0,9832	0,9838	0,9844	0,9702	0,9711	0,9511	0,9813	1,0029	0,9607	0,9461
TCSC linha 23	0,9752	0,9802	0,9834	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 24	0,9768	0,9806	0,9835	0,9841	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 25	0,9800	0,9848	0,9839	0,9845	0,9842	0,9706	0,9714	0,9514	0,9815	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 26	0,9752	0,9802	0,9834	0,9839	0,9843	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0029	0,9607	0,9461
TCSC linha 27	0,9753	0,9803	0,9866	0,9866	0,9852	0,9719	0,9720	0,9521	0,9818	1,0031	0,9611	0,9465
TCSC linha 28	0,9753	0,9803	0,9845	0,9853	0,9847	0,9711	0,9715	0,9515	0,9815	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 29	0,9754	0,9804	0,9835	0,9839	0,9842	0,9702	0,9711	0,9511	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 30	0,9758	0,9808	0,9843	0,9849	0,9887	0,9725	0,9725	0,9526	0,9822	1,0031	0,9615	0,9470
TCSC linha 31	0,9750	0,9800	0,9829	0,9834	0,9854	0,9723	0,9722	0,9523	0,9818	1,0031	0,9612	0,9466
TCSC linha 32	0,9757	0,9807	0,9843	0,9849	0,9812	0,9725	0,9726	0,9526	0,9822	1,0031	0,9616	0,9470
TCSC linha 33	0,9752	0,9802	0,9832	0,9837	0,9840	0,9699	0,9725	0,9526	0,9824	1,0030	0,9618	0,9472
TCSC linha 34	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9704	0,9714	0,9570	0,9815	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 35	0,9755	0,9804	0,9836	0,9841	0,9845	0,9708	0,9727	0,9528	0,9814	1,0029	0,9608	0,9462
TCSC linha 36	0,9756	0,9806	0,9841	0,9848	0,9862	0,9738	0,9816	0,9618	0,9958	1,0031	0,9755	0,9612
TCSC linha 37	0,9755	0,9804	0,9835	0,9841	0,9843	0,9704	0,9715	0,9515	0,9818	1,0030	0,9623	0,9474
TCSC linha 38	0,9755	0,9805	0,9836	0,9842	0,9844	0,9706	0,9719	0,9519	0,9823	1,0031	0,9625	0,9483
TCSC linha 39	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9713	0,9513	0,9816	1,0030	0,9606	0,9471
TCSC linha 40	0,9758	0,9808	0,9839	0,9845	0,9847	0,9709	0,9724	0,9524	0,9829	1,0050	0,9623	0,9477
TCSC linha 41	0,9754	0,9803	0,9834	0,9840	0,9843	0,9705	0,9719	0,9519	0,9823	1,0036	0,9617	0,9471

Fonte: Do autor.

Tabela 31 – Compensação de 70%. Sistema IEEE-30.

Condição	Tensão nas barras											
	V3	V4	V6	V7	V9	V10	V12	V14	V15	V16	V17	V18
Sem TCSC	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 1	1,0150	1,0137	1,0085	0,9998	1,0213	0,9977	1,0255	1,0077	1,0018	1,0053	0,9945	0,9936
TCSC linha 2	1,0060	1,0070	1,0054	0,9979	1,0193	0,9952	1,0232	1,0055	0,9995	1,0029	0,9921	0,9914
TCSC linha 3	1,0127	1,0104	1,0079	0,9995	1,0205	0,9964	1,0248	1,0072	1,0011	1,0041	0,9933	0,9933
TCSC linha 4	1,0144	1,0127	1,0084	0,9998	1,0211	0,9974	1,0253	1,0076	1,0016	1,0050	0,9942	0,9935
TCSC linha 5	1,0155	1,0145	1,0090	0,9997	1,0217	0,9983	1,0256	1,0078	1,0020	1,0058	0,9951	0,9936
TCSC linha 6	1,0129	1,0125	1,0046	0,9974	1,0195	0,9962	1,0243	1,0063	1,0004	1,0042	0,9930	0,9917
TCSC linha 7	1,0175	1,0160	1,0078	0,9994	1,0213	0,9983	1,0256	1,0077	1,0019	1,0060	0,9950	0,9932
TCSC linha 8	1,0156	1,0143	1,0105	1,0100	1,0222	0,9986	1,0260	1,0083	1,0024	1,0060	0,9954	0,9944
TCSC linha 9	1,0144	1,0133	1,0089	0,9975	1,0214	0,9977	1,0255	1,0078	1,0019	1,0053	0,9945	0,9938
TCSC linha 10	1,0164	1,0149	1,0115	1,0016	1,0228	0,9992	1,0263	1,0087	1,0028	1,0064	0,9959	0,9948
TCSC linha 11	1,0151	1,0143	1,0093	1,0003	1,0166	0,9965	1,0243	1,0061	1,0001	1,0047	0,9933	0,9908
TCSC linha 12	1,0147	1,0144	1,0083	0,9997	1,0247	1,0038	1,0256	1,0079	1,0024	1,0087	0,9995	0,9938
TCSC linha 13	1,0171	1,0162	1,0120	1,0019	1,0507	1,0177	1,0312	1,0149	1,0104	1,0172	1,0121	1,0050
TCSC linha 14	1,0147	1,0142	1,0084	0,9998	1,0173	1,0090	1,0280	1,0109	1,0058	1,0118	1,0043	0,9988
TCSC linha 15	1,0159	1,0156	1,0094	1,0003	1,0191	0,9920	1,0246	1,0075	1,0006	1,0004	0,9895	0,9948
TCSC linha 16	1,0174	1,0182	1,0103	1,0009	1,0266	1,0077	1,0514	1,0322	1,0245	1,0247	1,0074	1,0135
TCSC linha 17	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0256	1,0106	1,0018	1,0053	0,9943	0,9938
TCSC linha 18	1,0142	1,0130	1,0084	0,9998	1,0213	0,9977	1,0255	1,0087	1,0066	1,0056	0,9945	0,9985
TCSC linha 19	1,0141	1,0129	1,0085	0,9998	1,0221	0,9992	1,0244	1,0067	1,0011	1,0108	0,9974	0,9929
TCSC linha 20	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0073	1,0018	1,0052	0,9943	0,9937
TCSC linha 21	1,0142	1,0131	1,0084	0,9998	1,0218	0,9987	1,0246	1,0070	1,0012	1,0021	0,9964	0,9932
TCSC linha 22	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0210	0,9971	1,0256	1,0080	1,0022	1,0052	0,9941	0,9947
TCSC linha 23	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0254	1,0077	1,0018	1,0052	0,9943	0,9937
TCSC linha 24	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0212	0,9976	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9944	0,9935
TCSC linha 25	1,0143	1,0133	1,0084	0,9997	1,0214	0,9981	1,0252	1,0074	1,0015	1,0053	0,9948	0,9927
TCSC linha 26	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0254	1,0077	1,0018	1,0056	0,9948	0,9937
TCSC linha 27	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0256	1,0080	1,0023	1,0052	0,9943	0,9942
TCSC linha 28	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0212	0,9976	1,0255	1,0078	1,0020	1,0052	0,9944	0,9939
TCSC linha 29	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0211	0,9975	1,0253	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 30	1,0142	1,0131	1,0084	0,9998	1,0215	0,9981	1,0249	1,0067	1,0002	1,0052	0,9947	0,9921
TCSC linha 31	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0209	0,9971	1,0255	1,0080	1,0023	1,0050	0,9941	0,9942
TCSC linha 32	1,0142	1,0131	1,0084	0,9998	1,0214	0,9981	1,0248	1,0066	1,0002	1,0052	0,9947	0,9922
TCSC linha 33	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0210	0,9972	1,0252	1,0075	1,0015	1,0050	0,9941	0,9933
TCSC linha 34	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 35	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0077	1,0018	1,0052	0,9943	0,9937
TCSC linha 36	1,0145	1,0138	1,0086	0,9999	1,0213	0,9975	1,0255	1,0080	1,0026	1,0053	0,9944	0,9944
TCSC linha 37	1,0142	1,0133	1,0084	0,9997	1,0212	0,9976	1,0254	1,0077	1,0018	1,0052	0,9944	0,9936
TCSC linha 38	1,0142	1,0133	1,0084	0,9997	1,0212	0,9976	1,0254	1,0077	1,0018	1,0053	0,9944	0,9936
TCSC linha 39	1,0142	1,0132	1,0083	0,9997	1,0212	0,9975	1,0254	1,0076	1,0017	1,0052	0,9943	0,9935
TCSC linha 40	1,0147	1,0136	1,0090	1,0001	1,0216	0,9980	1,0256	1,0080	1,0021	1,0056	0,9948	0,9939
TCSC linha 41	1,0142	1,0133	1,0083	0,9997	1,0211	0,9974	1,0253	1,0076	1,0017	1,0051	0,9942	0,9935

continua na próxima página ...

continuação da página anterior

Condição	Tensão nas barras											
	V19	V20	V21	V22	V23	V24	V25	V26	V27	V28	V29	V30
Sem TCSC	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 1	0,9757	0,9806	0,9837	0,9842	0,9844	0,9705	0,9714	0,9514	0,9815	1,0031	0,9609	0,9463
TCSC linha 2	0,9730	0,9780	0,9812	0,9817	0,9820	0,9680	0,9688	0,9487	0,9789	1,0007	0,9582	0,9436
TCSC linha 3	0,9737	0,9788	0,9823	0,9829	0,9835	0,9694	0,9702	0,9502	0,9804	1,0026	0,9597	0,9451
TCSC linha 4	0,9752	0,9801	0,9833	0,9839	0,9841	0,9702	0,9711	0,9511	0,9813	1,0030	0,9606	0,9460
TCSC linha 5	0,9766	0,9815	0,9843	0,9848	0,9847	0,9709	0,9720	0,9520	0,9822	1,0035	0,9616	0,9470
TCSC linha 6	0,9748	0,9796	0,9821	0,9826	0,9828	0,9687	0,9693	0,9493	0,9793	1,0001	0,9586	0,9440
TCSC linha 7	0,9770	0,9818	0,9843	0,9848	0,9845	0,9708	0,9717	0,9517	0,9818	1,0025	0,9612	0,9466
TCSC linha 8	0,9764	0,9814	0,9846	0,9851	0,9851	0,9714	0,9725	0,9525	0,9828	1,0046	0,9622	0,9476
TCSC linha 9	0,9755	0,9805	0,9837	0,9842	0,9844	0,9705	0,9714	0,9514	0,9816	1,0034	0,9610	0,9464
TCSC linha 10	0,9770	0,9820	0,9852	0,9857	0,9856	0,9720	0,9733	0,9533	0,9837	1,0054	0,9631	0,9485
TCSC linha 11	0,9760	0,9806	0,9825	0,9830	0,9826	0,9686	0,9692	0,9492	0,9793	1,0037	0,9586	0,9440
TCSC linha 12	0,9826	0,9873	0,9893	0,9897	0,9859	0,9731	0,9714	0,9514	0,9800	1,0032	0,9594	0,9447
TCSC linha 13	0,9927	0,9984	1,0029	1,0030	0,9955	0,9850	0,9818	0,9620	0,9893	1,0064	0,9688	0,9544
TCSC linha 14	0,9857	0,9910	0,9944	0,9947	0,9898	0,9779	0,9756	0,9557	0,9838	1,0035	0,9632	0,9487
TCSC linha 15	0,9662	0,9720	0,9781	0,9788	0,9819	0,9666	0,9672	0,9472	0,9775	1,0037	0,9568	0,9421
TCSC linha 16	0,9896	0,9936	0,9943	0,9949	1,0029	0,9832	0,9801	0,9603	0,9877	1,0051	0,9672	0,9527
TCSC linha 17	0,9750	0,9801	0,9834	0,9839	0,9843	0,9703	0,9711	0,9511	0,9813	1,0030	0,9606	0,9460
TCSC linha 18	0,9755	0,9805	0,9839	0,9845	0,9877	0,9719	0,9720	0,9521	0,9817	1,0031	0,9611	0,9465
TCSC linha 19	0,9772	0,9822	0,9850	0,9855	0,9842	0,9710	0,9717	0,9517	0,9817	1,0031	0,9611	0,9465
TCSC linha 20	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9843	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 21	0,9765	0,9815	0,9846	0,9851	0,9842	0,9708	0,9715	0,9515	0,9816	1,0031	0,9610	0,9464
TCSC linha 22	0,9740	0,9792	0,9832	0,9837	0,9844	0,9702	0,9711	0,9511	0,9813	1,0029	0,9607	0,9461
TCSC linha 23	0,9752	0,9802	0,9834	0,9839	0,9842	0,9702	0,9712	0,9512	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 24	0,9771	0,9806	0,9836	0,9841	0,9842	0,9704	0,9712	0,9512	0,9814	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 25	0,9807	0,9854	0,9840	0,9846	0,9842	0,9706	0,9714	0,9514	0,9815	1,0030	0,9609	0,9463
TCSC linha 26	0,9752	0,9802	0,9834	0,9839	0,9843	0,9703	0,9712	0,9512	0,9814	1,0029	0,9607	0,9461
TCSC linha 27	0,9753	0,9803	0,9871	0,9870	0,9853	0,9721	0,9722	0,9522	0,9818	1,0031	0,9612	0,9466
TCSC linha 28	0,9753	0,9803	0,9845	0,9854	0,9847	0,9711	0,9715	0,9515	0,9814	1,0030	0,9608	0,9462
TCSC linha 29	0,9754	0,9804	0,9835	0,9839	0,9842	0,9702	0,9711	0,9511	0,9813	1,0030	0,9607	0,9461
TCSC linha 30	0,9759	0,9809	0,9844	0,9850	0,9895	0,9729	0,9728	0,9528	0,9823	1,0032	0,9617	0,9471
TCSC linha 31	0,9750	0,9799	0,9829	0,9833	0,9856	0,9726	0,9724	0,9524	0,9819	1,0031	0,9613	0,9467
TCSC linha 32	0,9757	0,9808	0,9844	0,9851	0,9806	0,9729	0,9728	0,9529	0,9824	1,0031	0,9618	0,9472
TCSC linha 33	0,9752	0,9801	0,9832	0,9837	0,9839	0,9698	0,9729	0,9529	0,9827	1,0031	0,9621	0,9475
TCSC linha 34	0,9755	0,9804	0,9835	0,9840	0,9843	0,9704	0,9714	0,9580	0,9815	1,0030	0,9609	0,9463
TCSC linha 35	0,9755	0,9804	0,9836	0,9842	0,9846	0,9709	0,9730	0,9530	0,9815	1,0029	0,9609	0,9463
TCSC linha 36	0,9756	0,9805	0,9840	0,9848	0,9865	0,9743	0,9831	0,9633	0,9980	1,0031	0,9778	0,9635
TCSC linha 37	0,9755	0,9804	0,9836	0,9841	0,9843	0,9705	0,9716	0,9516	0,9819	1,0030	0,9623	0,9474
TCSC linha 38	0,9756	0,9805	0,9837	0,9842	0,9844	0,9707	0,9720	0,9521	0,9825	1,0031	0,9624	0,9479
TCSC linha 39	0,9754	0,9804	0,9835	0,9840	0,9842	0,9704	0,9713	0,9514	0,9816	1,0030	0,9607	0,9472
TCSC linha 40	0,9759	0,9809	0,9841	0,9846	0,9848	0,9711	0,9727	0,9528	0,9833	1,0056	0,9627	0,9482
TCSC linha 41	0,9754	0,9803	0,9834	0,9840	0,9843	0,9705	0,9720	0,9520	0,9825	1,0036	0,9619	0,9473

Fonte: Do autor.

ANEXO A – Sistema 6 Barras

A.1 Dados das Barras

Tabela 32 – Dados das barras do sistema 6 Barras.

Barra	Tipo	Pg (pu)	Pd(pu)	Qg(pu)	Qd(pu)	Vmax(pu)	Vmin(pu)
1	V θ	1,1	0	0	0	1,05	0,95
2	PV	0,5	0	0	0	1,05	0,95
3	PV	0,5	0	0	0	1,05	0,95
4	PQ	0	1	0	0,15	1,05	0,95
5	PQ	0	1	0	0,15	1,05	0,95
6	PQ	0	1	0	0,15	1,05	0,95

Fonte: (WOOD; WOLLENBERG, 1996).

A.2 Dados das Linhas

Tabela 33 – Dados das linhas do sistema 6 Barras.

Linha	Barra k	Barra m	R (pu)	X (pu)
1	1	2	0,1	0,2
2	1	4	0,05	0,2
3	1	5	0,08	0,3
4	2	3	0,05	0,25
5	2	4	0,05	0,1
6	2	5	0,1	0,3
7	2	6	0,07	0,2
8	3	5	0,12	0,26
9	3	6	0,02	0,1
10	4	5	0,2	0,4
11	5	6	0,1	0,3

Fonte: (WOOD; WOLLENBERG, 1996).

ANEXO B – Sistema IEEE-14

B.1 Dados das Barras

Tabela 34 – Dados das barras do sistema IEEE-14.

Barra	Tipo	Pg (pu)	Pd (pu)	Qg (pu)	Qd (pu)	Vmax (pu)	Vmin(pu)
1	Vo	2,324	0	-0,169	0	1,06	0,95
2	PV	0,4	0,217	0,424	0,127	1,045	0,95
3	PV	0	0,942	0,234	0,019	1,01	0,95
4	PQ	0	0,478	0	-0,039	1,05	0,95
5	PQ	0	0,076	0	0,016	1,05	0,95
6	PV	0	0,112	0,122	0,075	1,05	0,95
7	PQ	0	0	0	0	1,05	0,95
8	PQ	0	0	0,174	0	1,06	0,95
9	PQ	0	0,295	0	0,166	1,05	0,95
10	PQ	0	0,09	0	0,058	1,05	0,95
11	PQ	0	0,035	0	0,018	1,05	0,95
12	PQ	0	0,061	0	0,016	1,05	0,95
13	PQ	0	0,135	0	0,058	1,05	0,95
14	PQ	0	0,149	0	0,05	1,05	0,95

B.2 Dados das Linhas

Tabela 35 – Dados das linhas do sistema IEEE-14.

Linha	Barra k	Barra m	R (pu)	X (pu)
1	1	2	0,01938	0,05917
2	1	5	0,05403	0,22304
3	2	3	0,04699	0,19797
4	2	4	0,05811	0,17632
5	2	5	0,05695	0,17388
6	3	4	0,06701	0,17103
7	4	5	0,01335	0,04211
8	4	7	0	0,20912
9	4	9	0	0,55618
10	5	6	0	0,25202
11	6	11	0,09498	0,1989
12	6	12	0,12291	0,25581
13	6	13	0,06615	0,13027
14	7	8	0	0,17615
15	7	9	0	0,11001
16	9	10	0,03181	0,0845
17	9	14	0,12711	0,27038
18	10	11	0,08205	0,19207
19	12	13	0,22092	0,19988
20	13	14	0,17093	0,34802

ANEXO C – Sistema IEEE-30

C.1 Dados dos Barras

Tabela 36 – Dados dos barras do sistema IEEE-30.

Barra	Tipo	Pg (pu)	Pd (pu)	Qg (pu)	Qd (pu)	Vmax (pu)	Vmin (pu)
1	V θ	2,60	0	-0,161	0	1,06	0,95
2	PV	0,4	0,217	0,5	0,127	1,045	0,95
3	PQ	0	0,024	0	0,012	1,05	0,95
4	PQ	0	0,076	0	0,016	1,05	0,95
5	PV	0	0,942	0,37	0,19	1,01	0,95
6	PQ	0	0	0	0	1,05	0,95
7	PQ	0	0,228	0	0,109	1,05	0,95
8	PV	0	0,3	0,373	0,3	1,01	0,95
9	PQ	0	0	0	0	1,05	0,95
10	PQ	0	0,058	0	0,02	1,05	0,95
11	PV	0	0	0,162	0	1,082	0,95
12	PQ	0	0,112	0	0,075	1,05	0,95
13	PV	0	0	0,106	0	1,071	0,95
14	PQ	0	0,062	0	0,016	1,05	0,95
15	PQ	0	0,082	0	0,025	1,05	0,95
16	PQ	0	0,035	0	0,018	1,05	0,95
17	PQ	0	0,09	0	0,058	1,05	0,95
18	PQ	0	0,032	0	0,0009	1,05	0,95
19	PQ	0	0,095	0	0,034	1,05	0,95
20	PQ	0	0,022	0	0,0007	1,05	0,95
21	PQ	0	0,175	0	0,112	1,05	0,95
22	PQ	0	0	0	0	1,05	0,95
23	PQ	0	0,032	0	0,016	1,05	0,95
24	PQ	0	0,087	0	0,067	1,05	0,95
25	PQ	0	0	0	0	1,05	0,95
26	PQ	0	0,035	0	0,023	1,05	0,95
27	PQ	0	0	0	0	1,05	0,95
28	PQ	0	0	0	0	1,05	0,95
29	PQ	0	0,024	0	0,0009	1,05	0,95
30	PQ	0	0,106	0	0,019	1,05	0,95

C.2 Dados das Linhas

Tabela 37 – Dados das linhas do sistema IEEE-30.

Linha	Barra k	Barra m	R (pu)	X (pu)
1	1	2	0,0192	0,0575
2	1	3	0,0452	0,1652
3	2	4	0,0570	0,1737
4	3	4	0,0132	0,0379
5	2	5	0,0472	0,1938
6	2	6	0,0581	0,1763
7	3	6	0,0119	0,0414
8	5	7	0,0460	0,1160
9	6	7	0,0267	0,0820
10	6	8	0,0120	0,0420
11	6	9	0	0,2080
12	6	10	0	0,5560
13	9	11	0	0,2080
14	9	10	0	0,1100
15	4	12	0	0,2560
16	12	13	0	0,1400
17	12	14	0,1231	0,2559
18	12	15	0,0662	0,1304
19	12	16	0,0945	0,1987
20	14	15	0,2210	0,1997
21	16	17	0,0524	0,1923
22	15	18	0,1073	0,2185
23	18	19	0,6390	0,1292
24	19	20	0,0340	0,0680
25	10	20	0,0936	0,2090
26	10	17	0,0324	0,0845
27	10	21	0,0348	0,0749
28	10	22	0,0727	0,1499
29	21	22	0,0116	0,0236
30	15	23	0,1000	0,2020
31	22	24	0,1150	0,1790
32	23	24	0,1320	0,2700
33	24	25	0,1885	0,3292
34	25	26	0,2544	0,3800
35	25	27	0,1093	0,2087
36	28	27	0,0000	0,3960
37	27	29	0,2198	0,4153
38	27	30	0,3202	0,6027
39	29	30	0,2399	0,4533
40	8	28	0,0636	0,2000
41	6	28	0,0169	0,0599



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Alocação Heurística de TCSCs em Linhas de Transmissão para Melhoria de Perfil de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 31 de janeiro de 2022.



Santiago Machado Pereira