



OTIMIZAÇÃO DA APLICAÇÃO DE DISPOSITIVOS TCSC NO PROBLEMA DO FLUXO DE POTÊNCIA REATIVA COM ALGORITMO EVOLUCIONÁRIO

Jhenifer Aline Pereira dos Anjos*¹, Maury Meirelles Gouvêa Junior¹

¹PPGEE – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Resumo - Nos últimos anos, questões econômicas e ambientais têm mostrado a necessidade de otimização do sistema elétrico existente a fim de adiar os investimentos em expansão o máximo possível. Isso tem sido motivação para o desenvolvimento de tecnologias que permitam controlar o fluxo de potência, o que possibilita melhor exploração das instalações atuais. Uma dessas tecnologias é a Compensação de Série Controlada por Tiristor (TCSC), que permite um controle suave do fluxo de potência ao longo das linhas de transmissão. Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de um dispositivo TCSC em sistemas de potência do ponto de vista da estabilidade de tensão e da perda de potência reativa. O método proposto usa um algoritmo evolucionário para melhorar o desempenho dos sistemas de potência, ajustando a magnitude da tensão das barras controladas e do dispositivo TCSC. Os resultados mostraram que o método proposto aumentou a estabilidade da tensão e diminuiu a perda total de potência reativa dos dois sistemas IEEE padrão, no caso base e nas contingências.

Palavras-Chave – Sistema Elétrico de Potência, TCSC, Algoritmo Evolucionário, Potência Reativa.

OPTIMIZATION OF TCSC DEVICE APPLIED TO THE REACTIVE POWER FLOW PROBLEM IN POWER SYSTEMS USING EVOLUTIONARY ALGORITHM

Abstract— In recent years, economic and environmental issues have shown the need to enhance the performance of power systems in order to postpone expansion investments as much as possible. These issues have motivated research studies and technology developments to control the power flow, which allows better use of the current structure. One of these technologies is the Thyristor Controlled Series Compensation (TCSC), which permits a smooth control of the power flow throughout the transmission lines. This paper aims to analyze the performance of a TCSC device in power systems on the voltage stability and reactive power loss points of view. The proposed method uses an evolutionary algorithm to enhance the performance of power systems by adjusting the voltage magnitude of the controlled buses and the TCSC device. The results showed

that the proposed method enhanced the voltage stability and decreased the total reactive power loss of the two standard IEEE systems, in the base case and contingencies.

Keywords – Power System, TCSC, Evolutionary Algorithm, Reactive Power.

I. INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, a demanda de energia elétrica no Brasil tem aumentado consideravelmente, impulsionada pelo desenvolvimento econômico e pelo aumento da população [1]. A necessidade de garantir o fornecimento de energia elétrica de qualidade exige dos profissionais do setor elétrico alternativas que atendam às necessidades técnicas e econômicas. O sobre-dimensionamento do sistema torna-se impraticável devido ao alto custo de implementação, sendo necessário otimizar as instalações já existentes de forma a adiar investimentos em expansão do sistema elétrico [2].

Diversas tecnologias vêm sendo estudadas e desenvolvidas com objetivo de tornar o sistema mais eficiente e estável. Os dispositivos FACTS (do inglês, *Flexible AC Transmission Systems*), por exemplo, se baseiam na eletrônica de potência aplicada diretamente no controle do fluxo de potência, permitindo melhor direcionamento deste, estabilização de tensão, aumento da capacidade de transmissão, entre outras vantagens [3]. Dentre os diversos tipos de dispositivos FACTS, o Compensador Série Controlado a Tiristor (TCSC, do inglês, *Thyristor Controlled Series Compensation*) permite o controle do fluxo de potência nas linhas de transmissão, possibilitando otimização e maximização da transmissão[4].

Este trabalho tem como objetivo avaliar a utilização do dispositivo TCSC em sistemas elétricos de potência do ponto de vista do problema do fluxo de potência reativa. A solução proposta prevê o aumento da reserva de potência reativa, que possibilita um sistema mais estável do ponto de vista do perfil de tensão. O método proposto utiliza um algoritmo evolucionário como método de otimização global, baseado em populações, para ajuste das tensões das barras de controle e do dispositivo TCSC – implantado em apenas uma linha de transmissão. O método proposto é avaliado por meio de estudos de caso utilizando um sistema IEEE padrão de 14 e 118 barramentos. Nos experimentos realizados, avalia-se a solução por meio do algoritmo evolucionário com e sem o

dispositivo TCSC. Os resultados mostraram que a solução proposta melhorou a estabilidade do sistema, mesmo sem a utilização do TCSC, e ainda mais com este dispositivo.

O restante deste trabalho está organizado como segue. A Seção II apresenta estudos anteriores voltados para a aplicação de dispositivos TCSC em sistemas elétricos. A Seção III apresenta o conceito dos dispositivos FACTS. Na Seção IV, é exposto o princípio de funcionamento do TCSC e as implicações positivas quanto a sua inserção no sistema elétrico de potência. A Seção V apresenta a metodologia adotada com o algoritmo evolucionário para obtenção da solução proposta. Na Seção VI, são descritos os estudos de casos com os sistemas IEEE objetos de estudo deste trabalho. Na seção VII, são mostrados e analisados os resultados obtidos a partir dos experimentos. Finalmente, na Seção VIII, apresenta-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

A utilização de sistemas de compensação para melhoria da capacidade de transmissão e estabilidade de tensão vem sendo estudada em diferentes âmbitos, principalmente com a aplicação de algoritmos de otimização.

A instalação ótima do dispositivo TCSC a partir de um algoritmo evolucionário influencia no controle do fluxo de potência ativa com impacto no custo de operação [2].

Existem também evidências de que a influência do TCSC em sistemas de transmissão através do controle dinâmico da impedância das linhas de transmissão melhora o perfil de tensão e a estabilidade transitória do sistema [3].

A aplicação do método de otimização por enxame de partículas para determinação da localização ótima do dispositivo TCSC no sistema, com o objetivo de aumentar a capacidade de transferência de potência, também se mostra promissora [4].

A melhoria da estabilidade de tensão pode ser alcançada através da combinação dos algoritmos IGSA (do inglês, *Improved Gravitational Search Algorithm*) e FA (*Firefly Algorithm*), juntamente com o TCSC, através de sua localização e capacidade ótimas [5].

O algoritmo genético é capaz de melhorar a estabilidade de tensão e diminuir as perdas de potência e o custo de geração no sistema. São determinadas as localizações ótimas de dispositivos FACTS, como o TCSC, além do SVC (do inglês, *Static VAR Compensator*) e o UPFC (do inglês, *Unified Power Flow Controller*) [6].

A identificação da localização ótima do TCSC e a consequente melhoria no perfil de tensão podem ser alcançados também de um método de monitoramento da estabilidade baseado em FFBPN (do inglês, *Feed-forward Back Propagation Network*) [7].

De maneira geral, os trabalhos recentes têm abordado os impactos da instalação de dispositivos TCSC no sistema elétrico com foco na otimização do perfil de tensão e dos custos de operação. Esse estudo vai além, analisando a perda de potência reativa total diante de duas situações: i) otimização das tensões nos barramentos de carga; e ii) otimização nesses barramentos agregada à inserção do dispositivo TCSC na barra crítica do sistema. Considerando que os sistemas elétricos têm estado cada vez mais sobrecarregados, estudos referentes à estabilidade tornam-se

de grande relevância.

III. DISPOSITIVOS FACTS

O estudo do fluxo de potência é uma das ferramentas de análise das condições da rede elétrica que possibilita conhecer as limitações e tomar providências para a otimização constante da operação. A partir desse estudo é possível determinar o carregamento dos ativos, perdas elétricas ao longo do sistema e magnitude de grandezas como a tensão ao longo das barras, estando esta última diretamente ligada à estabilidade do sistema em geral [8].

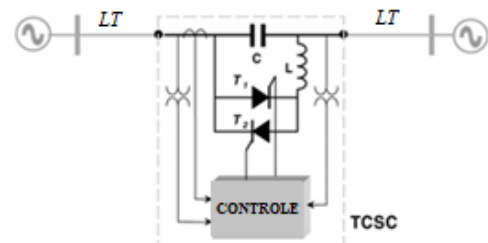
Sabe-se que para manter o sistema de energia elétrica operando em condições favoráveis, o fluxo de potência ativa e reativa deve ser controlado intermitentemente. Ao longo dos tempos isso foi feito mecanicamente, porém o controle manual de grandezas com variação instantânea (tensão e ângulo de fase entre as linhas) acaba não sendo ágil o suficiente, implicando em perda de estabilidade, fluxo de potência fluindo em linhas não desejadas, perdas elétricas, dentre outros problemas. Com o objetivo de solucionar essas questões, permitindo entrega da potência gerada a todas as cargas com controle do fluxo de potência, estão os dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) [9].

O modelo de dispositivo FACTS adequado para cada uma das muitas aplicações depende do objetivo da utilização do componente. Pode-se controlar a tensão, a corrente e a potência (ativa e reativa), de forma a tornar o sistema elétrico o mais eficiente possível. Um dos dispositivos controlados mais conhecidos é o TCSC [3].

IV. COMPENSADOR SÉRIE CONTROLADO POR TIRISTOR

O Compensador Série Controlado a Tiristor (TCSC) é composto por um banco de capacitores em paralelo com um reator controlado por tiristores, conforme ilustrado na Figura 1. O princípio de funcionamento do dispositivo se baseia na variação da reatância indutiva do reator conforme o ângulo de disparo dos tiristores. A associação em paralelo da reatância indutiva e da reatância capacitiva equivale à reatância total do TCSC [10].

Figura 1: Representação esquemática de um TCSC (IEEE, 2008)



Dentre as implicações positivas da utilização do TCSC em sistemas elétricos, estão: o controle rápido e contínuo do nível de compensação série nas linhas de transmissão e distribuição; o controle dinâmico do fluxo de potência a fim de obter-se fluxo de potência ótimo; a diminuição das oscilações de potência em determinadas áreas; e o auxílio na regulação de

tensão na linha, uma vez que gera potência reativa proporcional ao carregamento [11].

Em virtude do aumento da capacidade de transmissão de potência e do controle do fluxo, o TCSC se apresenta no sistema de transmissão com vantagens técnicas e econômicas, motivo pelo qual essa tecnologia esteja sendo aplicada em sistemas elétricos no mundo inteiro [7].

V. OTIMIZAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA COM TCSC

Esta seção apresenta a metodologia proposta para ajuste do dispositivo TCSC em sistemas elétricos de potência. Na metodologia proposta, além do ajuste do dispositivo TCSC, os módulos das tensões dos barramentos de controle também são ajustados por um algoritmo genético (AG) de modo a minimizar a perda total de potência reativa. As subseções seguintes apresentam a estrutura da metodologia proposta.

A. AG no Problema do Fluxo de Potência Reativa

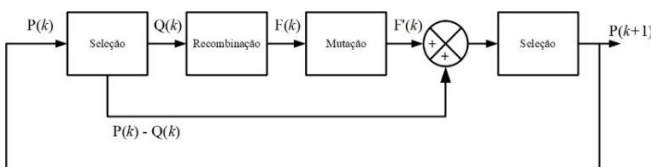
A metodologia proposta utiliza um AG para ajustar as variáveis de decisão do sistema, a saber, a reatância do dispositivo TCSC e os módulos das tensões dos barramentos de controle. Assim, busca-se minimizar a perda total de potência reativa. Um AG é um método de busca global baseado em população que utiliza como estratégia a teoria da evolução de Darwin [12].

A população de um AG é constituída de indivíduos formados pelas variáveis de decisão do problema, chamadas de genes, que determinam as soluções do problema. A solução proposta por um indivíduo é avaliada por uma função objetivo ou custo, denominada *fitness*. Assim como as populações biológicas, a população de um AG evolui após algumas gerações, por meio de operadores de variação e seleção. Portanto, um AG tende a produzir uma população com *fitness* médio melhor do que a da inicial [12].

A Figura 2 apresenta o diagrama de blocos do processo evolucionário de um AG. Dentre os N indivíduos de uma população, $P(k)$, na geração k , seleciona-se um grupo de indivíduos, $Q(k)$, que se recombinam e geram um outro grupo de filhos, $F(k)$. Esse grupo $F(k)$, ou descendentes, são mutados, gene a gene, segundo uma probabilidade p_m , resultando $F'(k)$. Em seguida, dentre a população atual e os descendentes, $P(k)+F'(k)$, seleciona-se N indivíduos que formarão a próxima geração de indivíduos, $P(k+1)$. Esse processo evolucionário se repete até que um critério de parada seja atendido. A população adotada nos experimentos deste trabalho possui 100 indivíduos.

As próximas subseções descrevem os operadores de seleção e variação que interagem e modificam os indivíduos.

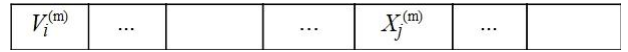
Figura 2: Diagrama de blocos de um AG



B. Codificação das Variáveis de Decisão

Nesta metodologia, um indivíduo da população que codifica o vetor das variáveis de decisão, U , é formado pela magnitude das tensões dos barramentos de controle e pela reatância ajustável do dispositivo TCSC. A Fig. 3 mostra o m -ésimo indivíduo da população. Os primeiros genes são as magnitudes das tensões, $V_i^{(m)}$, em seguida, os genes que representam as reatâncias dos dispositivos TCSC, $X_j^{(m)}$.

Figura 3: Codificação das variáveis de decisão

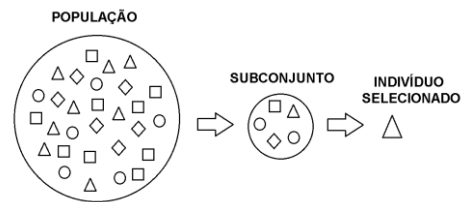


C. Operadores de Seleção

O objetivo dos operadores de seleção é selecionar um grupo de indivíduos em uma população. A seleção é feita probabilisticamente, em função do *fitness* dos indivíduos. Assim, o melhor indivíduo, do ponto de vista do *fitness*, tem maior probabilidade de ser selecionado dentre os demais indivíduos da população. Existem vários tipos de operadores de seleção, como, por exemplo, roleta e torneio [12].

Neste trabalho, conforme ilustrado na Figura 4, utiliza-se a seleção por torneio, que seleciona um grupo de $G \leq N$ indivíduos aleatoriamente. Em seguida, seleciona o indivíduo com melhor *fitness*. Quanto maior G , maior a pressão de seleção, pois a probabilidade de indivíduos com melhor *fitness* serem selecionados aumenta. Por exemplo, se $G = N$, tem-se uma seleção elitista, pressão de seleção máxima, pois o indivíduo com melhor *fitness* será necessariamente selecionado. A pressão de seleção adotada neste trabalho foi igual a 0,1.

Figura 4: Método de seleção por torneio

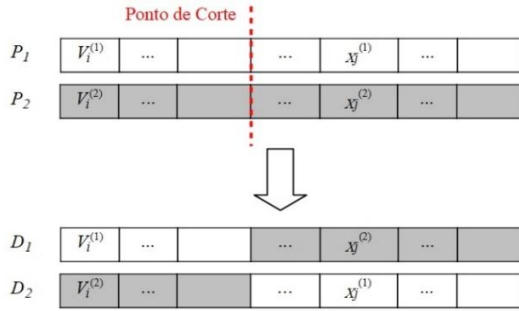


D. Operadores de Variação

Os operadores de variação são funções que modificam os descendentes gerados na população atual, $P(k)$. Os descendentes, $F(k)$, são indivíduos criados com material genético (variáveis de decisão) de dois indivíduos (pais) de $P(k)$. Depois de criados, os novos indivíduos são modificados aleatoriamente, se tornando $F'(k)$.

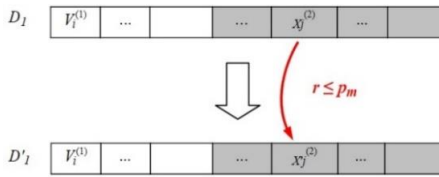
No cruzamento, há um ponto de corte aleatório nos dois pais, P_1 e P_2 , que define como os descendentes são formados, como mostra a Figura 5. Os descendentes, D_1 e D_2 , são gerados a partir das partes dos dois pais, P_1 e P_2 , de acordo com o ponto de corte. Este processo produz uma busca local no espaço de soluções, pois os novos indivíduos são criados dentro do espaço onde os pais estão contidos. Este trabalho considerou a taxa de cruzamento igual a 0,6.

Figura 5: Operador de cruzamento de 1-ponto



A mutação, executada após o cruzamento, é uma mudança aleatória dos genes dos descendentes, $F(k)$, de acordo com uma probabilidade $p_m \in [0,1]$. Na metodologia proposta, a mutação é realizada nos elementos do vetor de variáveis de decisão, \mathbf{U} , respeitando seus intervalos de operação. A Figura 6 mostra o processo de mutação na reatância $X_j^{(1)}$ do dispositivo TCSC, que é alterada para $X_j'^{(1)}$ se $r \leq p_m$, sendo $r \in [0,1]$ uma variável aleatória de distribuição uniforme. A taxa de mutação adotada nos testes a seguir foi $p_m=0,05$.

Figura 6: Mutação uniforme



VI. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Para análise das consequências da inserção do TCSC em um sistema elétrico, foram realizados experimentos utilizando o programa de fluxo de potência *Matpower*[®] [13]. Dois sistemas IEEE foram tomados como parâmetros de estudo, sendo o primeiro de pequeno porte, IEEE 14 barras, e o segundo de grande porte, IEEE 118 barras. Em ambos os casos aplicou-se o método proposto com e sem o dispositivo TCSC. Para cada experimento, comparou-se o sistema original, com todas as tensões em seus valores nominais, o sistema otimizado pelo AG utilizando como variáveis de decisão apenas as tensões dos barramentos de controle, sem o dispositivo TCSC, e, finalmente, o AG utilizando as tensões controladas e o ajuste do dispositivo TCSC. Como indicadores de desempenho, considerou-se o perfil de tensão das barras de carga e a perda total de potência reativa. Além do caso base, sistema intacto, estudou-se 3 contingências utilizando o critério $N - 1$.

A. Primeiro caso: IEEE 14

O IEEE 14 é um sistema com 14 barramentos, 5 geradores, 17 ramos, 3 transformadores e 11 barras de carga. Trata-se de um sistema de pequeno porte, mas útil para avaliar as implicações da utilização do TCSC em situações de operação ilhada.

B. Segundo caso: IEEE 118

Trata-se de um sistema composto por 118 barras, 19 geradores, 35 compensadores síncronos, 186 ramos, 9 transformadores e 91 barras de carga. Por ser bastante conectado, esse caso é importante para análise das consequências da inserção do TCSC em grandes sistemas.

VII. RESULTADOS

A partir dos experimentos, foram construídos gráficos que relacionam a perda de potência reativa total inicial e após a utilização do método proposto, que compreende o controle tensão nas barras de controle e a inserção do dispositivo TCSC. Foram observadas as condições do sistema quando operando em estado operativo normal (caso base) e para situações de contingência. Assim, pode-se observar a eficácia das ações para condições normais de operação e em caso de anormalidades as quais o sistema está sujeito.

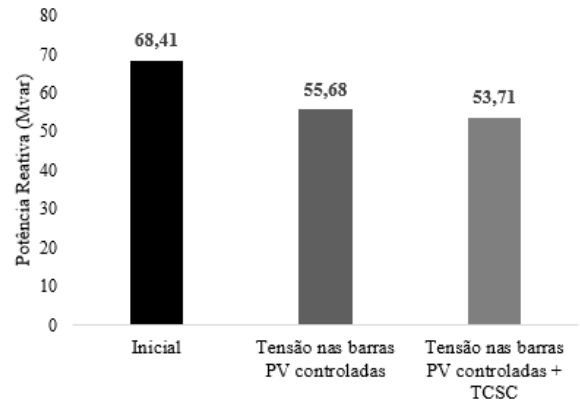
A. Sistema em Estado Operativo Normal – Caso Base

Diz-se que o sistema elétrico se encontra em estado operativo normal quando as condições de operação são ideais, i.e., em situações em que o sistema está isento de quaisquer contingências.

1) Primeiro caso: IEEE 14

Na análise do sistema IEEE 14 ficou evidente a redução da perda de potência reativa total no sistema após a otimização das tensões nas barras de controle e a inserção do TCSC, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7: Perda total de potência reativa no sistema IEEE 14 no caso base



A Tabela 1 mostra a dispersão de tensão nas barras do sistema em relação à tensão nominal (1 pu) a partir do cálculo de desvio padrão. Pode-se perceber que conforme houve otimização do IEEE 14, as tensões nas barras ficaram mais próximas do valor base.

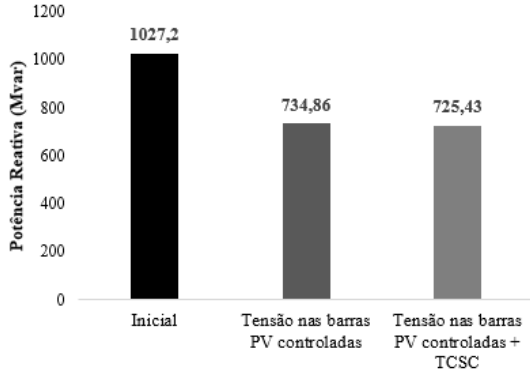
Tabela 1: Desvio padrão de tensão nas barras do sistema IEEE 14

Sistema Inicial	Tensão nas barras PV controladas	Tensão nas barras PV controladas + TCSC
0,0096	0,0033	0,0031

2) Segundo caso: IEEE 118

Com relação ao IEEE 118, por se tratar de um sistema de grande porte, apenas o ajuste das tensões nas barras de controle representou redução de aproximadamente 30% da perda total de potência reativa. A inserção do dispositivo TCSC implicou em outros 10 Mvar de potência reativa adicionados à reserva do sistema, como mostra a Figura 8.

Figura 8: Perda total de potência reativa no sistema IEEE 118 no caso base



No que diz respeito às tensões nas barras do sistema, a tabela abaixo permite visualizar a dispersão em relação ao valor padrão (1 pu). Apesar da dispersão das tensões em relação ao valor base ter aumentado com a inserção do TCSC, os valores ainda foram pequenos se comparados ao limite máximo estabelecido pelo processo de otimização, que foi de $\pm 5\%$. Esse aumento se dá devido ao fato de o dispositivo estar sendo ajustado pelo AG para minimizar a perda de potência reativa, o que pode ocasionar variações nas tensões em cada barra.

Tabela 2: Desvio padrão de tensão nas barras do sistema IEEE 118

Sistema Inicial	Tensão nas barras PV controladas	Tensão nas barras PV controladas + TCSC
0,0047	0,0011	0,0021

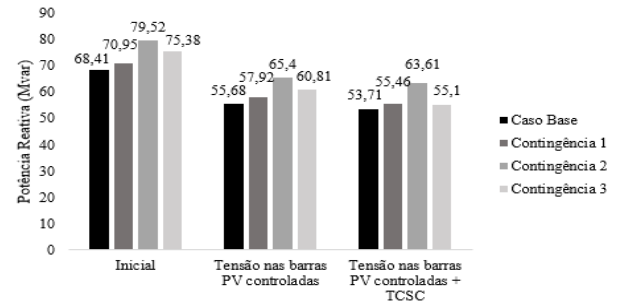
B. Análise de Contingências

Devido à importância do sistema elétrico, medidas que elevem sua confiabilidade e disponibilidade são fundamentais. O sistema brasileiro opera na configuração $N - 1$, i.e., a estabilidade do sistema deve ser mantida em caso de perda de um componente do sistema, independente de qual componente seja. Os dados a seguir mostram o comportamento da perda total de potência reativa para três situações de contingência estudadas.

1) Primeiro caso: IEEE 14

A presença de uma contingência aumentou, em todos os casos, a perda de potência reativa no IEEE 14, como pode ser visto na Figura 9. As ações de controle das tensões nas barras PV e inserção do TCSC implicaram em redução de perdas com comportamento aproximadamente linear, de maneira que nota-se no gráfico um perfil parecido para os três grupos de potência.

Figura 9: Perda total de potência reativa no sistema IEEE 14 no caso base e com a presença de uma contingência



A primeira contingência, perda da LT entre as barras 6 e 13, resultou em um aumento de aproximadamente 2 Mvar de perda de potência reativa, tanto para a situação de sistema intacto quanto após as ações de otimização. Por sua vez, a segunda contingência, que se trata da perda da LT entre as barras 4 e 7, foi a anormalidade mais drástica para o sistema dentre as analisadas, implicando em aumento em torno de 10Mvar nas três condições analisadas. Para a terceira contingência, perda do gerador 3, pode-se notar que enquanto houve elevação de 7 Mvar na perda de reativo do sistema intacto, com o controle de tensão nas barras PV e a inserção do TCSC o aumento das perdas foi de menos de 2 Mvar.

O controle de tensão nas barras e a inserção do TCSC no sistema IEEE 14 permitiram manter a magnitude da tensão próxima do valor base. O aumento da dispersão na Contingência 3 é justificado pelo ajuste do TCSC, que procura minimizar as perdas de potência reativa.

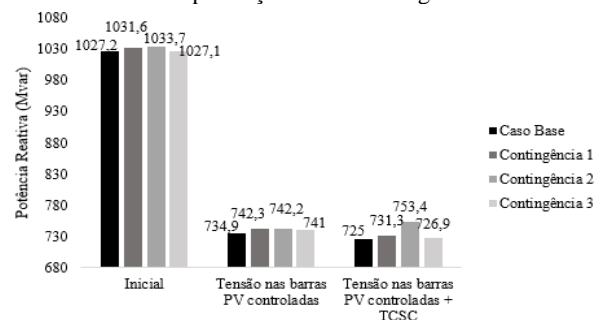
Tabela 3: Desvio padrão de tensão nas barras do sistema IEEE 14

	Tensão nas barras PV controladas	Tensão nas barras PV controladas + TCSC
Contingência 1	0,0055	0,0040
Contingência 2	0,0017	0,0016
Contingência 3	0,0018	0,0021

2) Segundo caso: IEEE 118

O IEEE 118 compreende um sistema superior em robustez e flexibilidade operativa, o que implica em uma maior resistência a anormalidades. Por esse motivo, a existência de uma contingência não representou grande aumento da perda total de potência reativa no sistema, conforme apresentado na Figura 10. Ao ser aplicado o método proposto, a perda total de potência reativa foi reduzida em torno de 30%, assim como no caso base.

Figura 10: Perda de potência reativa no IEEE 118 no caso base e com a presença de uma contingência



Para esse caso, a primeira contingência compreendeu a perda da LT entre as barras 2 e 12 e resultou em um aumento pouco significativo da perda de potência reativa nas três situações quando comparado aos valores iniciais, ficando em torno de 5 Mvar. Na segunda contingência, perda da LT entre as barras 25 e 26, nota-se um caso atípico, que é o aumento da perda de potência reativa no sistema com a inserção do TCSC em relação ao sistema apenas com controle de tensão nas barras. Essa é uma situação possível, tendo em vista que de acordo com o tipo de contingência e o local do sistema onde ela ocorre, os efeitos podem ser diversos. Por fim, a perda do gerador na barra 46 não representou aumento significativo da perda de reativo do sistema.

Tabela 4: Desvio padrão de tensão nas barras do sistema IEEE 118

	Tensão nas barras PV controladas	Tensão nas barras PV controladas + TCSC
Contingência 1	0,00058	0,0014
Contingência 2	0,00014	0,0017
Contingência 3	0,00081	0,0024

No IEEE 118, houve elevação da dispersão das tensões em todas as contingências ao serem comparados o sistema com o dispositivo TCSC e o sistema somente com controle de tensão. Isso significa que o ajuste para obter a perda mínima de potência reativa durante as contingências implicou em mudança nas magnitudes de tensão.

VIII. CONCLUSÕES

A utilização de tecnologias que possibilitem explorar ao máximo os sistemas elétricos existentes é um assunto amplamente discutido, uma vez que investimentos no setor elétrico implicam em alto custo e requerem uma análise rigorosa de custo-benefício. Nesse contexto, os dispositivos TCSC se mostram uma importante opção, pois permitem controlar o fluxo de potência no sistema de forma a aumentar a capacidade de transmissão, proporcionando um ganho de estabilidade.

Como pôde ser observado neste estudo, a instalação do TCSC em uma linha de transmissão, independente do porte, proporciona redução da perda de potência reativa, elevando a reserva disponível. A aplicação de dispositivos TCSC nos sistemas de potência, no entanto, encontra desafios técnicos e econômicos que devem ser considerados.

Em suma, a decisão da aplicação do TCSC no sistema elétrico depende de diversos aspectos para ser de viável implementação, e não somente o cumprimento efetivo da sua função, i.e., o aumento da capacidade de transmissão e a consequente melhoria da estabilidade de tensão. A análise, para ser válida, deve abordar questões técnicas e econômicas, de modo a verificar a eficácia dessa alternativa em todos os âmbitos cabíveis.

REFERÊNCIAS

[1] Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília (2020). *Atlas da Eficiência Energética – Brasil | 2020*. Acedido em 15 de novembro de 2021, em: <http://aneel.gov.br>.

[2] C. H. B. Apribowo, M. H. Ibrahim e FX. R. Wicaksono, “Optimal Power Flow with Optimal Placemen TCSC Device on 500 kV Java-Bali Electrical Power System Using Genetic Algorithm-Taguchi Method”, in *Proc. of 3rd International Conference on Industrial, Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering (ICIMECE)*, vol. 1931, 030014 (2018).

[3] S. Bruno, G. de Carne e M. La Scala, “Transmission Grid Control Through TCSC Dynamic Series Compensation”, *IEEE Transactionson Power Systems*, vol. 31, no. 4, pp. 3202-3211, Jul. 2016.

[4] N. K .Yadav e A. Bala, “Self-adaptiveness in particle swarm optimisation to enhance available transfer capability using thyristor-controlled series compensation (TCSC)”, *Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences*, vol. 43, 152 (2018).

[5] S. Mahapatra, N. Malik, A. N. Jha e B. K. Panigrahi, “Voltage Stability Enhancement by IGSA-FA Hybrid Technique Implementation for Optimal Location of TCSC”, *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 12, no. 9, pp. 2360-2373, Set. 2017.

[6] R. Kalaivani e S. K. Dheebika, “Enhancement of Voltage Stability and Reduction of Power Loss Using Genetic Algorithm Through Optimal Location of SVC, TCSC and UPF”, *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 11, no. 10, pp. 1470-1486, 2016.

[7] V. Jayasankar, N. Kamaraj e N. Vanaja, “Estimation of voltage stability index for power system employing artificial neural network technique and TCSC placement”, *Neurocomputing*, vol. 73, pp. 3005-3011, 2010.

[8] HAFNER, Sérgio. Introdução ao estudo do fluxo de carga (Análise de Sistemas de Potência), Out, 2009.

[9] N. G.Hingorani, “High power electronics and flexible ac transmission systems”, *IEEE Power Engineering Review*, vol. 8, no. 7, p. 3-4, Jul. 1988.

[10] C. Sain, *Power Flow Control and Stability Analysis using TCSC FACTS Controller*, Lambert Academic Publishing, 2020.

[11] R. M. Mathur e R. K. Varma, *Thyristor-based facts controllers for electrical transmission systems*, John Wiley& Sons, Nova York, 2002.

[12] R. Linden, *Algoritmos genéticos*, Editora Moderna, 3ª Edição, Rio de Janeiro, 2008.

[13] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. Thomas, “MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 12-19, Feb. 2011.