

16º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2025

Impacto dos Dispositivos FACTS na Análise de Fluxo de Potência: Um Estudo com o PSAT.

LEONARDO P. DE SOUSA¹, DANILO B. DO VALLE²

¹ Graduando em Engenharia Elétrica, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus Votuporanga, leonardo.paiva@aluno.ifsp.edu.br

² Docente do IFSP, Câmpus Votuporanga, daniilo.valle@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.00.00-7 Engenharia Elétrica

RESUMO: Os dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) são amplamente empregados para melhorar a capacidade de transmissão e a estabilidade dos sistemas elétricos de potência. Entre seus principais componentes, destacam-se o SVC (*Static Var Compensator*) e o TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*). Este artigo tem como objetivo avaliar o impacto desses dispositivos na análise do fluxo de potência em sistemas de transmissão, utilizando a ferramenta de código aberto *Power System Analysis Toolbox* (PSAT). As simulações foram realizadas em computador, com diferentes cenários de operação. Os resultados indicam que o SVC foi eficaz em manter constante o módulo da tensão na barra 8, enquanto a inserção de um TCSC, com compensação de 10% da reatância de uma única linha de transmissão, promoveu redução significativa das perdas de potência ativa no sistema. Conclui-se que a presença de dispositivos FACTS em sistemas elétricos de potência proporciona benefícios relevantes, como o controle de tensão por meio do SVC e a diminuição das perdas ativas com o uso do TCSC, evidenciados nas simulações realizadas.

PALAVRAS-CHAVE: FACTS; Fluxo de Potência; PSAT; SVC; TCSC.

Impact of FACTS Devices on Power Flow Analysis: A Study with PSAT.

ABSTRACT: FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) devices are widely employed to improve transmission capability and enhance the stability of electric power systems. Among their main components, the Static Var Compensator (SVC) and the Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC) are particularly noteworthy. This paper aims to evaluate the impact of these devices on power flow analysis in transmission systems using the open-source *Power System Analysis Toolbox* (PSAT). Simulations were carried out on a computer under different operating scenarios. The results indicate that the SVC was effective in maintaining the voltage magnitude at bus 8 constant, while the inclusion of a TCSC with 10% compensation of the reactance of a single transmission line significantly reduced the system's active power losses. It is concluded that the integration of FACTS devices into electric power systems provides relevant benefits, such as voltage control through the SVC and reduction of active power losses with the use of the TCSC, as evidenced by the simulations performed.

KEYWORDS: FACTS; Power Flow; PSAT; SVC; TCSC.

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional tem resultado em um aumento significativo da demanda por energia elétrica, o que torna necessária a melhoria contínua da infraestrutura dos sistemas elétricos de potência (De Melo, 2023). Nesse contexto, a análise de fluxo de potência constitui uma ferramenta essencial para avaliar a operação em regime permanente desses sistemas (Ahmed *et al.*, 2019).

Com o aumento das cargas nos sistemas elétricos, os dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) têm sido amplamente empregados para aprimorar a capacidade de transmissão, sustentar níveis adequados de tensão e ampliar as margens de estabilidade (Chetan *et al.*, 2024). Entre esses dispositivos, destaca-se o SVC (*Static Var Compensator*), constituído por tiristores e elementos

de compensação *shunt* (capacitores e/ou reatores) conectados em derivação ao sistema, cujo principal objetivo é regular a tensão do barramento ao qual está conectado (Boudjella *et al.*, 2013).

Outro exemplo relevante é o TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*), composto por tiristores que chaveiam capacitores e/ou indutores, permitindo o controle da impedância série de uma linha de transmissão em corrente alternada. Essa característica possibilita a redução da reatância efetiva da linha e, conseqüentemente, o aumento do fluxo de potência ativa (Meikandasivam *et al.*, 2013).

Este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto da inserção de dispositivos FACTS, especificamente SVC e TCSC, na análise do fluxo de potência em sistemas de transmissão, por meio da ferramenta de código aberto *Power System Analysis Toolbox* (PSAT).

MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado consistiu basicamente em um computador com o MATLAB e o toolbox PSAT, no qual foram realizadas simulações com o objetivo de avaliar o impacto da inserção dos dispositivos FACTS em sistemas de transmissão de energia elétrica.

Os dispositivos FACTS foram desenvolvidos com o objetivo principal de aumentar a capacidade de transferência dos sistemas de potência e controlar o fluxo de potência nas linhas de transmissão. Esses equipamentos têm sido cada vez mais aplicados no planejamento e na operação de sistemas de transmissão, pois contribuem para a melhoria do desempenho e permitem postergar investimentos em novas infraestruturas (Sabillón, 2014). Além disso, em muitas situações, são empregados para fornecer amortecimento adicional aos modos interárea do sistema, por meio da inclusão de controladores POD (*Power Oscillation Damping*) em suas malhas de controle (Ref) (Luz *et al.*, 2001).

O suporte oferecido pelos FACTS em regime permanente está associado, principalmente, ao controle da potência reativa injetada ou absorvida no sistema, o que possibilita maior flexibilidade no controle do fluxo de potência nas linhas de transmissão (Song; Jonhs, 1999).

Entre os dispositivos considerados neste estudo, destaca-se o SVC (*Static Var Compensator*), um compensador de potência reativa controlado por tiristores. Instalado em derivação com o sistema, o SVC é composto por capacitores e reatores chaveados eletronicamente. A quantidade de potência reativa fornecida ou absorvida depende de seu modo de operação: na faixa capacitiva, o SVC injeta potência reativa, elevando a tensão no barramento em que está conectado; na faixa indutiva, absorve potência reativa, reduzindo a tensão local (Janke *et al.*, 2010).

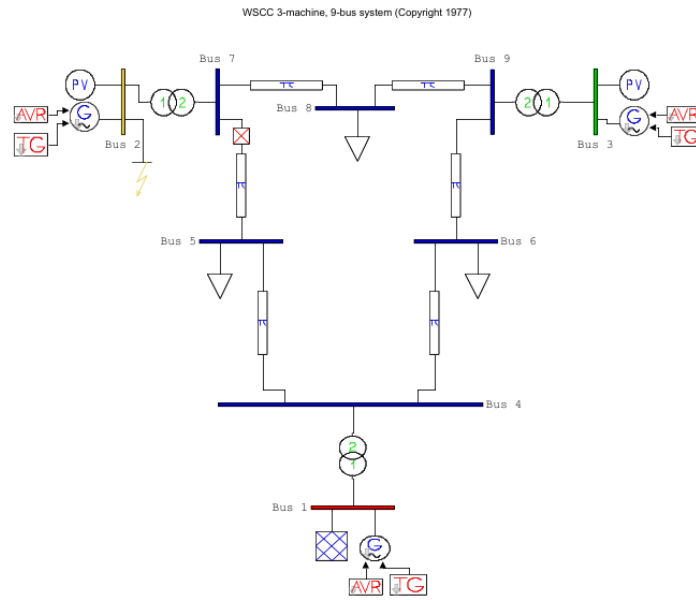
Outro dispositivo FACTS considerado neste trabalho é o TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*), que utiliza tiristores para o chaveamento de capacitores e/ou indutores, permitindo o controle da impedância série de uma linha de transmissão em corrente alternada. Esse dispositivo é capaz de alterar a impedância de forma rápida ou gradual, influenciando diretamente o fluxo de potência ativa. De acordo com Huang e Li (2002), quando devidamente parametrizado, o TCSC possibilita manter o fluxo de potência nas rotas previamente definidas.

Conforme ressaltado por Milano (2005), a avaliação do impacto dos dispositivos FACTS requer ferramentas computacionais robustas. Nesse sentido, o PSAT, amplamente utilizado em estudos de sistemas elétricos de potência, disponibiliza recursos para cálculo de fluxo de potência, análise de estabilidade de tensão e simulações dinâmicas. Por se tratar de uma ferramenta de código aberto, integrada ao ambiente MATLAB ou Octave, o PSAT possibilita a modelagem detalhada e a simulação de dispositivos FACTS, permitindo análises comparativas entre cenários com e sem sua presença.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a validação das simulações no PSAT, utilizou-se o sistema-teste *Western System Coordinating Council* (WSCC) de 9 barras, amplamente empregado em estudos de sistemas de potência. Esse sistema é apresentado na Figura 1. As simulações foram realizadas no *Power System Analysis Toolbox* (PSAT), integrado ao Simulink, no ambiente MATLAB. Adotaram-se como valores de base 100 MVA de potência e 230 kV de tensão, sendo os dados desse sistema detalhadamente descritos por Anderson e Fouad (2003).

FIGURA 1. Sistema de 9 barras utilizando o PSAT/Simulink.



Fonte: Milano (2013).

Inicialmente, o sistema foi simulado sem a presença de dispositivos FACTS, de modo a servir como referência para as análises subsequentes. Para a simulação do fluxo de potência, adotou-se uma tolerância de 10^{-6} no método iterativo de *Newton-Raphson*. Os valores iniciais de tensão para as barras 1, 2 e 3 foram definidos em 1,04 pu, 1,025 pu e 1,025 pu, respectivamente; para as demais barras, considerou-se 1 pu. Já os ângulos iniciais de tensão foram definidos como 0° para todas as barras.

Na simulação do fluxo de potência do sistema de 9 barras utilizando o PSAT/Simulink, os números das barras, os valores convergidos de módulo (pu) e ângulo (graus) das tensões, bem como as potências ativa e reativa injetadas em cada barra, estão apresentados na Tabela 1.

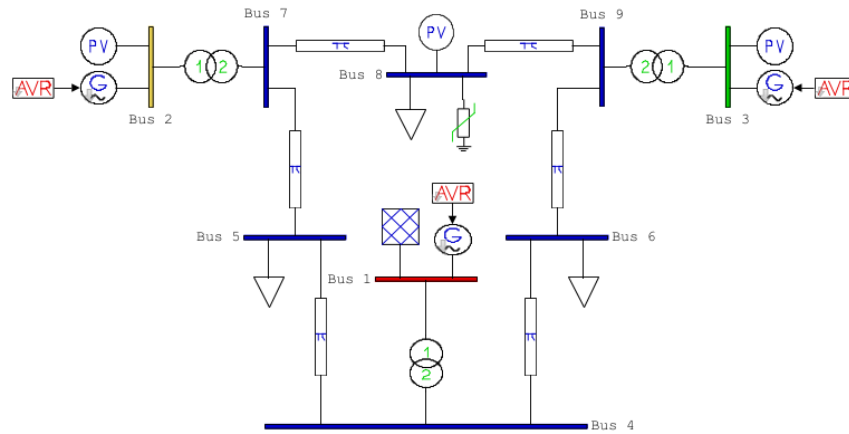
TABELA 1. Valores convergidos do fluxo de potência do sistema.

Nº da Barra	Módulo (pu)	Ângulo ($^\circ$)	P (pu)	Q (pu)
1	1,04	0	0,71641	0,27046
2	1,025	9,28	1,63	0,066537
3	1,025	4,6648	0,85	-0,1086
4	1,0258	-2,2168	0	0
5	0,99563	-3,9888	-1,25	-0,5
6	1,0127	-3,6874	-0,9	-0,3
7	1,0258	3,7197	0	0
8	1,0159	0,72754	-1	-0,35
9	1,0324	1,9667	0	0

Fonte: O autor (2025).

Utilizando o mesmo sistema de 9 barras, foi inserido um SVC em paralelo à barra 8, escolhida aleatoriamente. Esse dispositivo permite a definição de uma tensão de referência, à qual o SVC se ajusta para manter o módulo da tensão constante no barramento. O valor de referência adotado foi de 1,025 pu. Dessa forma, o SVC converte o barramento originalmente de carga (PQ) em um barramento do tipo “geração” (PV), uma vez que o dispositivo FACTS fornece a potência reativa necessária para assegurar a manutenção da tensão especificada. A configuração resultante do sistema pode ser observada na Figura 2.

FIGURA 2. Sistema de 9 barras com SVC em paralelo à barra 8 utilizando o *Simulink*.



Fonte: O autor (2025).

Para a simulação do fluxo de potência, adotou-se uma tolerância 10^{-6} no método iterativo de *Newton-Raphson*. Os valores iniciais de tensão nas barras 1, 2 e 3 foram definidos em 1,04 pu, 1,025 pu e 1,025 pu, respectivamente; para as demais barras, considerou-se 1 pu. Com a inserção do SVC, o valor de tensão inicial da barra 8 foi ajustado para 1,025 pu. Quanto aos ângulos iniciais, todas as barras foram configuradas com valor de 0° .

Na simulação do fluxo de potência do sistema de 9 barras, utilizando o PSAT/Simulink, os números das barras e os valores convergidos de módulo (pu) e ângulo (graus) das tensões, bem como as potências ativa e reativa injetadas em cada barra, estão apresentados na Tabela 2.

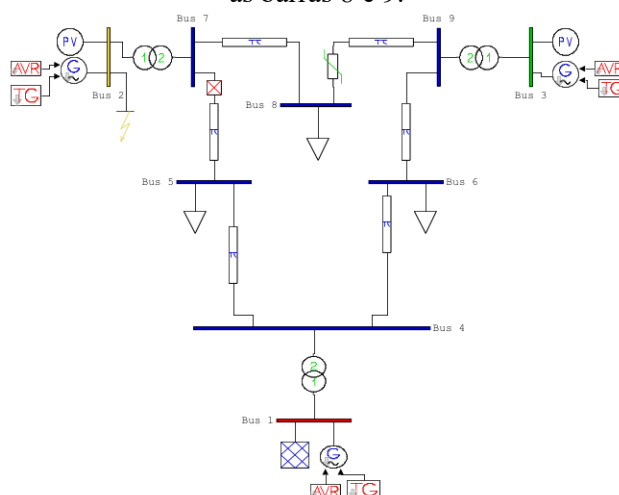
TABELA 2. Valores convergidos do fluxo de potência do sistema simulado com SVC

Nº da Barra	Módulo (pu)	Ângulo ($^\circ$)	P (pu)	Q (pu)
1	1,04	0	0,71587	0,24814
2	1,025	9,1954	1,63	0,001553
3	1,025	4,6197	0,85	-0,1635
4	1,027	-2,2125	0	0
5	0,99797	-3,9848	-1,25	-0,5
6	1,0147	-3,6841	-0,9	-0,3
7	1,0297	3,6565	0	0
8	1,025	0,66812	-1	-0,22127
9	1,0355	1,9299	0	0

Fonte: O autor (2025).

Por fim, empregou-se o mesmo sistema de 9 barras, mas com a inserção de um TCSC conectado em série à linha de transmissão entre os barramentos 8 e 9, cuja localização foi escolhida aleatoriamente. O objetivo dessa configuração é reduzir a reatância da linha de transmissão e, consequentemente, diminuir as perdas associadas ao seu trajeto. A representação do sistema descrito pode ser observada na Figura 3.

FIGURA 3. Sistema de 9 barras com TCSC inserido em série com a linha de transmissão entre as barras 8 e 9.



Fonte: O autor (2025)

A compensação de reatância da linha de transmissão, implementada pelo TCSC configurado no PSAT, foi de 10% da reatância total da linha, resultando em uma nova reatância equivalente a 90% do valor original, sem a inserção do dispositivo. Esse ajuste foi adotado para possibilitar a análise da diferença na geração de potência ativa da barra 1 (barra *slack*), com e sem a presença do TCSC, uma vez que este barramento de referência é o único em que a potência ativa é uma variável de saída.

Para o cálculo do fluxo de potência, empregou-se o método iterativo de *Newton-Raphson*, com tolerância de 10^{-6} . Os valores iniciais de tensão nas barras 1, 2 e 3 foram de 1,04 pu, 1,025 pu e 1,025 pu, respectivamente, enquanto para as demais barras foi adotado 1 pu. Quanto aos ângulos iniciais, todas as barras foram configuradas com valor de 0° .

Os resultados da simulação do sistema de 9 barras no PSAT/Simulink contendo os números das barras, os valores convergidos do módulo (pu) e ângulo (graus) das tensões, além das potências ativas e reativas em cada barra, estão apresentados na Tabela 3.

TABELA 3. Valores convergidos do fluxo de potência do sistema simulado com TCSC

Nº da Barra	Módulo (pu)	Ângulo ($^\circ$)	P (pu)	Q (pu)
1	1,04	0	0,7162	0,30635
2	1,025	9,3941	1,63	0,12629
3	1,025	4,7777	0,85	0,030931
4	1,0238	-2,2505	0	0
5	0,99286	-3,9826	-1,25	-0,5
6	1,0083	-3,6895	-0,9	-0,3
7	1,0221	3,814	0	0
8	1,0078	0,82931	-1	-0,35
9	1,0244	2,0587	0	0

Fonte: O autor (2025).

CONCLUSÕES

Com relação ao SVC inserido na barra 8 do sistema, pode-se afirmar através de simulação, que tal dispositivo foi capaz de manter o valor constante de 1,025 do módulo da tensão do barramento definido previamente. Deste modo, o SVC transforma o barramento originalmente de carga (PQ) em um barramento do tipo “geração” (PV), sendo que o SVC fornece a potência reativa necessária para assegurar o módulo da tensão especificada, o que é bem relevante em situações nas quais barramentos de carga necessitam manter um valor fixo de módulo de tensão.

Em comparação com a potência ativa gerada sem a presença do TCSC, observa-se uma redução de 0,00021 pu, considerando a potência de base do sistema de 100 MVA, essa diferença corresponde a 0,021 MW, ou seja, 21 kW adicionais de perdas no sistema sem o TCSC. Dessa forma, pode-se afirmar que a inserção de um TCSC, com compensação de apenas 10% da reatância em uma única linha de transmissão, proporciona uma redução relevante de perdas no sistema como um todo. Com uma

compensação maior de reatância e um maior número de TCSCs, sendo cada um deles conectados em série à uma linha de transmissão, a tendência é que haja uma redução do número de perdas quando comparado com o sistema apresentado anteriormente. O que pode fazer com que tal sistema se torne mais eficiente, diminuindo custos tanto na parte de geração quanto de transmissão de energia elétrica.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

D.B.V. contribuiu na concepção do tema e orientação. L.P.S. atuou na redação, pesquisa, desenvolvimento e estudo do programa. Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo pela oportunidade, por meio do programa PIBIFSP; ao Grupo de Pesquisa em Automação e Inovação (GPAI) pelo apoio técnico.

REFERÊNCIAS

AHMED, Arif; MCFADDEN, Fiona J. Stevens; RAYUDU, Ramesh. Weather-dependent power flow algorithm for accurate power system analysis under variable weather conditions. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 34, n. 4, p. 2719-2729, 2019.

ANDERSON, Paul M.; FOUAD, Aziz A. Power system control and stability. 2. ed. Hoboken: IEEE Press; Wiley-Interscience, 2003.

BOUDJELLA, Houari *et al.* Performance analysis of Static Var Compensators (SVC), on Congestion Management and Voltage Profile in Power System by MATLAB/PSAT. *Acta Electrotehnica*, v. 54, n. 1, p. 1-8, 2013.

CHETHAN, Muddu; KUPPAN, Ravi. A review of FACTS device implementation in power systems using optimization techniques. *Journal of Engineering and Applied Science*, v. 71, n. 1, p. 18, 2024.

DE MELO, Igor Delgado. Fluxo de potência: teoria e implementação de códigos computacionais. São Paulo: Blucher, 2023.

HUANG, Garng M.; LI, Yishan. Impact of thyristor controlled series capacitor on bulk power system reliability. In: IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. IEEE, 2002. p. 975-980.

JANKE, Alwyn et al. SVC operation & reliability experiences. In: IEEE PES General Meeting. IEEE, 2010. p. 1-8.

LUZ, G. S.; MACEDO, N. J. P.; OLIVEIRA, V. R. Análise do desempenho do TCSC de Serra da Mesa no Programa de Estabilidade Eletromecânica Anatem. In: XVI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Campinas: CIGRÉ-Brasil, 2001.

MEIKANDASIVAM, S.; NEMA, Rajesh Kumar; JAIN, Shailendra Kumar. Fine power flow control by split TCSC. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 45, n. 1, p. 519-529, 2013.

MILANO, Federico. An open source power system analysis toolbox. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 3, p. 1199-1206, 2005.

MILANO, Federico. Dr. Federico Milano webpage. 2013. Disponível em: <http://faraday1.ucd.ie/psat.html>. Acesso em: 10 jun. 2025.

SABILLÓN ANTÚNEZ, Carlos Francisco. Alocação ótima de equipamentos SVC e TCSC na rede de transmissão de energia elétrica. 2014.

SONG, Y. H.; JONHS, A. T. Flexible AC transmission systems – FACTS. London: The Institution of Electrical Engineers, 1999.