

Otimização da magnitude de tensão durante contingências através da alocação e do dimensionamento de SVCs via algoritmo VNS

Cesar Eduardo Curo Carrión, Ellen Cristina Cruz de Souza,
Wandry Rodrigues Faria, Eduardo Nobuhiro Asada, Benvindo Rodrigues Pereira Junior
Universidade de São Paulo
Av. Trab. São Carlsense, 400 - São Carlos
{cesarcuro.cc, ellencruz, wandry, easada, brpjuniior }@usp.br

RESUMO

Este artigo apresenta uma abordagem de otimização para determinar a localização e dimensionamento ótimos de dispositivos SVCs (*Static Var Compensators*) em sistemas elétricos de potência, visando aprimorar o perfil de tensão e lidar com cenários de contingência. Um algoritmo VNS (*Variable Neighborhood Search*) foi desenvolvido para minimizar a severidade de tensão e o custo de instalação dos SVCs. Simulações no sistema IEEE de 14 barras validaram a eficácia do modelo. Os resultados mostram que o algoritmo VNS encontra soluções de alta qualidade, melhorando o perfil de tensão e a segurança do sistema, além de reduzir violações de tensão em operações normais e de contingência. Este estudo destaca a importância dos SVCs para a estabilidade e confiabilidade dos sistemas elétricos, preparando a rede para eventos inesperados e manutenções.

PALAVRAS CHAVE. Alocação ótima de Static Var Compensators, Algoritmo Variable Neighborhood Search, Análise de Contingências, Compensação de Potência Reativa.

Tópicos: EN&PG - Energia, Óleo e Gás, MH - Metaheurísticas.

ABSTRACT

This article presents an optimization approach to determine the optimal location and sizing of SVCs (Static Var Compensators) in power systems, aiming to improve voltage profiles and efficiently handle contingency scenarios. A VNS (Variable Neighborhood Search) algorithm was developed to minimize voltage violation under contingency scenarios and the installation cost of SVCs. Simulations on the IEEE 14-bus system validated the model's effectiveness. The results show that the VNS algorithm finds high-quality solutions, improves voltage profiles and system security, as well as reduces voltage violations during normal operations and contingencies. This study highlights the importance of SVCs for the stability and reliability of power systems, preparing the grid for unexpected events and maintenance.

KEYWORDS. Optimal allocation of Static Var Compensators, Variable Neighborhood Search Algorithm, Contingency Analysis, Reactive Power Compensation.

Paper topics: EN&PG - Energy, Oil and Gas, MH - Metaheuristics.

1. Introdução

Os sistemas elétricos modernos estão operando cada vez mais próximos de seus limites de segurança devido ao constante aumento da demanda e à integração de energias renováveis com possibilidade de participação em mercados atacadistas reestruturados [Sakthivel et al., 2011]. A quantidade de energia gerada flutua de acordo com diversos fatores, incluindo a disponibilidade de combustível, condições climáticas e o estado da economia. Simultaneamente, a demanda varia com o clima, a hora do dia e a expansão do sistema elétrico. Essas variações na carga e na geração podem comprometer a segurança do sistema, especialmente quando ele está próximo aos seus limites operacionais [Chethan e

Kuppan, 2024]. Pequenas mudanças repentinas podem causar problemas de estabilidade e, em última instância, um colapso do sistema. Muitos eventos de *blackouts* ao redor do mundo foram causados pela instabilidade do sistema elétrico resultante de variações repentinas na operação do Sistema Elétrico de Potência (SEP) [Taylor et al., 1994b; Sakthivel et al., 2011].

A análise de estabilidade de um SEP inclui avaliações de ângulo, frequência e tensão. Neste contexto, o termo estabilidade de tensão denota a capacidade do SEP em manter perfis de tensão adequados, tanto em condições normais de operação como em condições de perturbações severas. O aumento da estabilidade de tensão pode ser alcançado a partir do controle da potência reativa nas linhas de transmissão [Al-Saidi et al., 2023]. Portanto, a operação adequada dos SEPs requer o controle de reservas adequadas de potência reativa para garantir níveis estáveis de tensão, mesmo em condições críticas [Sakthivel et al., 2011; Chethan e Kuppan, 2024].

Para garantir a estabilidade da tensão nos SEPs, dispositivos Flexíveis de Transmissão em Corrente Alternada, do inglês *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS) têm sido amplamente utilizados [Dazahra et al., 2016]. Esses dispositivos oferecem benefícios significativos aos SEPs, destacando-se pela capacidade de regulação de tensão e manutenção da estabilidade do sistema [Chethan e Kuppan, 2024; Yorino et al., 2003]. No entanto, os benefícios e o desempenho dos dispositivos FACTS dependem da sua localização e capacidade [Sakthivel et al., 2011; Yorino et al., 2003; Panda e Patel, 2009]. Nesse contexto, a otimização da capacidade e do ponto de alocação desses dispositivos durante a fase de planejamento contribuem para uma gestão eficaz da potência reativa e para a mitigação de problemas futuros relacionados à estabilidade de tensão [Amaris e Alonso, 2011]. A localização destes equipamentos está intimamente relacionada ao impacto destes dispositivos na melhoria do desempenho da rede de transmissão, sendo analisada durante a fase de planejamento da rede, onde são analisados a capacidade de compensação de cada dispositivo bem como a quantidade de dispositivos a ser instalada na rede [Al-Saidi et al., 2023; Nadeem et al., 2020; Ahmad e Sirjani, 2020]. Além disso, dispositivos FACTS representam um investimento significativo nas redes elétricas, tornando essencial otimizar o dimensionamento para minimizar o custo de instalação no sistema.

Entre os dispositivos FACTS mais utilizados para controlar o fluxo de potência reativa e manter níveis adequados de tensão, o Compensador Estático de Reativos, do inglês *Static Var Compensator* (SVC) se destaca devido ao seu custo mais acessível e à sua facilidade de instalação [Al-Saidi et al., 2023]. Além disso, os SVCs são particularmente preferidos quando o objetivo principal é garantir a estabilidade da tensão [Nadeem et al., 2020]. Vários métodos foram propostos para otimizar a capacidade e a localização dos dispositivos SVC em sistemas de transmissão. O trabalho de Ghahremani e Kamwa [2012] propõe um Algoritmo Genético para a otimização da alocação de dispositivos FACTS. Dazahra et al. [2016] apresentam um novo método, baseado na meta-heurística Otimização de Enxame de Partículas, do inglês *Particle Swarm Optimization* (PSO), para determinar a quantidade, a localização e a capacidade dos SVCs para a maximização da estabilidade de tensão. O algoritmo PSO também foi utilizado por Cherkaoui et al. [2019] e Al-Saidi et al. [2023]. No primeiro caso, os autores otimizam a alocação e a injeção de potência reativa dos SVCs e das usinas eólicas, com o objetivo de reduzir perdas e melhorar os índices de estabilidade. Enquanto os autores do segundo trabalho buscam a melhoria do perfil de tensão e o fortalecimento da estabilidade do sistema interconectado de Omã a partir da alocação e dimensionamento otimizados de SVCs. Nadeem et al. [2020]

A partir da revisão da literatura apresentada no parágrafo anterior, é possível observar a disseminação do uso de meta-heurísticas em problemas associados à alocação e operação de SVCs. Além disso, nota-se que os autores se dedicam à análise da operação dos SEPs em condições normais de operação. No entanto, os SVCs também podem ser alocados visando a melhoria da estabilidade do SEP diante de um evento de contingência. Tal abordagem é apresentada por Sakthivel et al. [2011], que empregam o algoritmo PSO para alocar e dimensionar SVCs visando melhorar a estabilidade de tensão sob cenários

de contingência. Carrión et al. [2021] propõem a alocação de SVCs em pontos críticos, definidos como aqueles com mais impactos positivos na operação sob contingências e alterações na topologia do SEP.

O trabalho apresentado neste artigo se alinha às abordagens de Sakthivel et al. [2011] e Carrión et al. [2021] no sentido de avaliar a performance do sistema em condições normais e de contingência. Cabe destacar, no entanto, que nesta abordagem empregamos uma estratégia baseada no algoritmo de Busca de Vizinhaça Variável, do inglês *Variable Neighborhood Search* (VNS) para a alocação e o dimensionamento de SVCs com o objetivo de reduzir as violações dos limites de tensão nodal tanto durante a operação normal quanto durante eventos de contingência. Além disso, esta abordagem considera o dimensionamento do ângulo de inclinação da curva de operação V-Q do SVC, desconsiderado nas demais abordagens, e permite que o usuário determine o conjunto de cenários a serem considerados como contingências.

2. Metodologia Proposta

2.1. Modelo de operação do SVC

O SVC é um dispositivo FACTS capaz de chavear bancos de capacitores e reatores ajustando, portanto, a injeção ou absorção de potência reativa do sistema. Desta forma, o SVC é capaz de controlar a magnitude da tensão em uma barra ou região do sistema de forma similar ao que faz um compensador síncrono, porém sem os desgastes e as perdas mecânicas causadas pelas partes rotativas dos compensadores síncronos [Eremia et al., 2016].

Os SVCs são tipicamente conectados em derivação e a injeção potência reativa do dispositivo pode variar continuamente entre os limites indutivos e capacitivos do equipamento [Antúnez, 2014]. No limite capacitivo, o SVC funciona como um capacitor em derivação e no limite indutivo, o SVC funciona como um reator em derivação. Em regime permanente, o comportamento de um SVC para regular a tensão segue uma curva característica V-Q. A susceptância, a corrente e a potência reativa variam para regular a tensão em função da inclinação da curva de operação mostrada na Figura 1. O ângulo de inclinação é determinado por vários fatores, incluindo a regulação de tensão desejada, a distribuição da produção de potência reativa entre várias fontes e outras necessidades específicas do sistema [Taylor et al., 1994a].

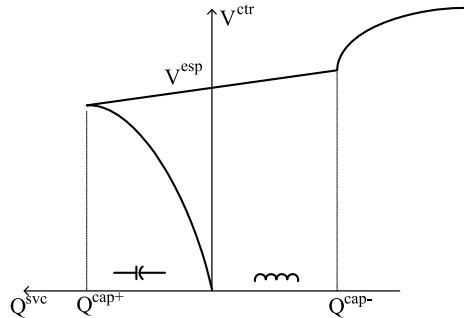


Figura 1: Curva de Operação SVC. Fonte: [CEPEL, 2023]

Considerando que o SVC opere no modo de regulação de tensão, a injeção de potência reativa em regime permanente dos compensadores estáticos (Q_k^{svc}) e a tensão na barra controlada (V_m^{ctr}) dependem do valor desejado para a magnitude de tensão (V_m^{esp}) e da inclinação (r_k^{svc}), conforme apresentado em (1) [CEPEL, 2023].

$$r_k^{svc} Q_k^{svc} + V_m^{ctr} - V_m^{esp} = 0 \quad \forall k \in \Omega, \forall m \in \Omega \quad (1)$$

sendo Ω o conjunto de todas as barras do sistema.

2.2. Análise de Contingência

A análise de contingência é uma ferramenta indispensável para o planejamento e a operação de sistemas de transmissão, pois contribui para a preservação da confiabilidade e da estabilidade do

sistema elétrico. Esse processo não se limita a avaliar o sistema em seu estado normal de operação, mas busca antecipar e prevenir problemas que possam ocorrer em situações de emergência. Uma das principais motivações para realizar análise de contingências é a aleatoriedade das falhas do sistema de transmissão. Uma linha de transmissão pode ser afetada por condições climáticas adversas, defeitos de equipamentos ou outros eventos inesperados. Essas falhas podem sobrecarregar outras partes do sistema, causar instabilidades e, em casos extremos, causar interrupções de energia. Portanto, é essencial identificar essas contingências críticas com antecedência para garantir que o sistema possa resistir a esses distúrbios e continuar a fornecer eletricidade de forma segura e confiável.

Há vários métodos disponíveis para os operadores do sistema realizarem a análise de contingência. Esses métodos podem ser determinísticos, probabilísticos, estáticos ou dinâmicos. Neste trabalho, empregamos o *software* ANAREDE[®] que realiza a análise de contingência de forma sequencial, identificando casos críticos de operação do sistema. Para cada cenário de contingência, é executada uma rotina de fluxo de potência para determinar o estado operativo da rede. As variáveis monitoradas incluem magnitude das tensões nodais, fluxo de potência nas linhas e injeção de potência reativa nas barras de geração e de referência.

2.3. Violação de Magnitude de Tensão

Um evento causa uma violação de magnitude de tensão quando o módulo da tensão calculada por meio de uma simulação de fluxo de potência excede os limites especificados para uma barra do sistema. Uma violação pode ser uma sobretensão, quando o valor calculado excede o limite superior ($\bar{V}$), ou uma subtensão, quando o módulo da tensão é menor que o limite inferior ($\underline{V}$). Para cada cenário de contingência i , o valor absoluto da magnitude da violação de tensão ($VV_{k,i}$) em uma barra k é calculado segundo (2).

$$VV_{k,i} = \max\{0, V_{k,i} - \bar{V}, \underline{V} - V_{k,i}\} \quad \forall i \in \Omega_C, \forall k \in \Omega_{N_i} \quad (2)$$

onde Ω_C é o conjunto de cenários de contingência, Ω_{N_i} é o conjunto de barras cuja magnitude de tensão viola os limites estabelecidos no cenário de contingência i . Por fim, $V_{k,i}$ é o módulo da tensão na barra k calculado para o cenário de contingência i .

2.4. Índice de Severidade

O objetivo neste artigo é alocar e dimensionar dispositivos SVC, de modo a minimizar o impacto de um conjunto de contingências em um SEP. Em outras palavras, o SVC selecionado deve ser posicionado em uma barra de forma a minimizar o impacto dos eventos de contingência na magnitude de tensão do sistema. Para isso, o índice total de severidade é calculado a partir dos valores de violação de magnitude tensão em cada cenário de contingência, calculados segundo (2). O índice de severidade é dado pela soma das violações de magnitude de tensão para todas as barras e cenários, conforme apresentado em (3).

$$ST = \sum_{i \in \Omega_C} \sum_{k \in \Omega_{N_i}} (VV_{k,i})^2 \quad (3)$$

2.5. Modelo De Otimização

A instalação de SVCs, apesar de contribuir para a mitigação da severidade das violações de tensão, também implica em custos de aquisição, manutenção e instalação. Neste sentido, dado que o dimensionamento dos SVCs é parte do escopo deste trabalho, é desejável que a capacidade dos SVCs instalados seja minimizada de forma a reduzir custos. Assim, os custos de aquisição (proporcionais à capacidade do dispositivo) são integrados à função objetivo. A função objetivo do modelo proposto para a minimização da severidade das violações para os cenários de contingência N-1 é apresentada em (4), onde o primeiro termo penaliza a severidade das restrições através do parâmetro K^{sev} e o segundo termo considera os custos de aquisição dos SVCs (K^{svc}) como uma função linear das capacidades instaladas (Q_k^{cap-} e Q_k^{cap+}).

$$\min K^{sev}ST + K^{svc} \sum_{k \in \Omega} (Q_k^{cap-} + Q_k^{cap+}) \quad (4)$$

s.a:

$$\text{Restrições (1)–(3)} \quad (4.a)$$

$$\underline{r}^{svc} \leq r_k^{svc} \leq \bar{r}^{svc} \quad (4.b)$$

$$0 \leq Q_k^{cap-} \leq \bar{Q}^{svc} x_k^{svc} \quad (4.c)$$

$$0 \leq Q_k^{cap+} \leq \bar{Q}^{svc} x_k^{svc} \quad (4.d)$$

$$-Q_k^{cap-} \leq Q_{k,i}^{svc} \leq Q_k^{cap+} \quad (4.e)$$

$$\sum_{k \in \Omega} x_k^{svc} \leq \bar{N}^{svc} \quad (4.f)$$

$$P_{k,i} - V_{k,i} \sum_{m \in \Omega_k} V_{m,i} (G_{km} \cos(\theta_{km,i}) + B_{km} \sin(\theta_{km,i})) = 0 \quad (4.g)$$

$$Q_{k,i} + Q_{k,i}^{svc} - V_{k,i} \sum_{m \in \Omega_k} V_{m,i} (G_{km} \sin(\theta_{km,i}) - B_{km} \cos(\theta_{km,i})) = 0 \quad (4.h)$$

$$x_k^{svc} \in \{0,1\} \quad (4.i)$$

$$P_{k,i}, Q_{k,i}, Q_{k,i}^{svc}, V_{k,i}, \theta_{km,i} \in \mathbb{R} \quad (4.i)$$

$$\forall k \in \Omega, \forall km \in \Omega_L, \forall i \in \Omega_C$$

sendo Ω_k o conjunto de barras adjacentes à barra k e Ω_L o conjunto de todas as linhas do sistema. Note que o controle da tensão através de um SVC, definido em (1) e representado em (4.a), depende da inclinação e capacidade do dispositivo, as quais são limitadas em (4.b) e (4.c)–(4.d), respectivamente. Observe ainda que as capacidades Q_k^{cap-} e Q_k^{cap+} são limitadas pela variável binária x_k^{svc} e o parâmetro $\bar{Q}^{svc}$, que representa a capacidade máxima de um SVC disponível para instalação. A restrição (4.e) impõe limites à instalação de SVCs, que não deve ultrapassar a quantidade máxima de SVCs disponíveis ($\bar{N}^{svc}$). As restrições (4.g) e (4.h) representam as equações de fluxo de potência necessárias para determinar o ponto de operação do sistema elétrico. Essas equações dependem dos parâmetros G_{km} e B_{km} , que representam, respectivamente, a condutância e susceptância equivalentes entre as barras k e m , P_k e Q_k , que denotam, respectivamente, as potências ativas e reativas líquidas para cada barra k , e θ_{km} , que modela a diferença angular entre as barras k e m em um cenário de contingência i .

O modelo tem como finalidade minimizar o impacto dos eventos de contingência nas magnitudes de tensão do sistema. Para atingir tal fim, é possível alocar SVCs em pontos estratégicos definindo suas capacidades, inclinações de operação e barras controladas, conforme ilustrado na Figura 1. Por fim, cabe salientar que, para calcular o índice de severidade total do sistema, deve-se obter o ponto de operação do sistema em cada cenário de contingência. Assim, as (4.g) e (4.h) são resolvidas por meio de um *software* especializado em fluxo de carga, do qual são extraídos os resultados do ponto de operação para cada cenário de contingência i . Este processo é referido neste artigo como uma rotina de fluxo de potência. É importante mencionar que este *software* é capaz de determinar o ponto de operação dos SVCs em cada cenário de operação a partir dos valores Q_k^{cap-} , Q_k^{cap+} , r_k^{svc} e V_m^{esp} , os quais são calculados (conforme será apresentado na seção seguinte) e inseridos como dados de entrada da rotina de fluxo de potência.

3. Algoritmo de Otimização VNS

O algoritmo VNS é uma meta-heurística baseada em busca local que explora sistematicamente a ideia de mudança de vizinhança, tanto para explorar o espaço de busca e escapar de mínimos locais [Hansen e Mladenovic, 2003]. Proposto inicialmente em por Mladenović e Hansen [1997], a VNS

demonstrou ser eficaz em uma ampla gama de problemas de pesquisa operacional. O processo é originado a partir de uma solução inicial que se torna a solução atual e, a partir desta solução, geram-se as soluções vizinhas, definidas como soluções cuja codificação contém pequenas modificações em relação à codificação da solução corrente, utilizando estruturas de vizinhança pré-determinadas. A estratégia de codificação empregada no algoritmo de busca é baseada em uma estrutura em que cada solução é representada por um vetor $\hat{X}$, conforme (5).

$$\hat{X} = [b_L; b_C; r_{b_L}; Q_{b_L}^{cap-}; Q_{b_L}^{cap+}] \quad \forall b_L \in \Omega_{PQ}, b_C \in \Omega_{PQ} \quad (5)$$

Este vetor é composto pelos elementos que são ajustados durante a transição entre diferentes estrutura de vizinhança. O vetor contém a barra à qual o SVC está conectado (b_L), a barra cuja tensão é controlada pela operação do SVC (b_C), a inclinação em termos percentuais (r_{b_L}) e, finalmente, as capacidades do equipamento em MVA ($Q_{b_L}^{cap-}$ e $Q_{b_L}^{cap+}$). Note que as barras consideradas em $\hat{X}$ são as barras PQ do sistema (Ω_{PQ}). Uma vez definido o vetor solução, estabelece-se a sequência que o algoritmo VNS irá a explorar soluções vizinhas. Cabe salientar que o algoritmo não é capaz de expandir indefinidamente o o tamanho da vizinhança, pois isso resultaria em uma busca exaustiva de todo o espaço de busca [Toledo et al., 2021]. Portanto, são propostas as seguintes estruturas de vizinhança:

1. A primeira vizinhança consiste em alterar a capacidade do SVC. A capacidade do SVC é definida mediante um sorteio aleatório com valores inteiros dentro das faixas viáveis de potência máxima e mínima definidas em (4.c)–(4.d). É importante ressaltar que a potência reativa efetivamente injetada pelo SVC ($Q_{k,i}^{svc}$) é determinada pela rotina de fluxo de potência que resolve as (4.g)–(4.h).
2. A segunda vizinhança corresponde ao valor da inclinação do SVC. A inclinação é importante para encontrar a curva de operação do SVC e determinar a potência reativa necessária para manter a tensão controlada nos valores desejados. O valor da inclinação (r_k^{svc}) é gerado por valores aleatórios dentro dos limites estabelecidos na restrição (4.b).
3. Na terceira vizinhança proposta, altera-se a barra controlada pelo SVC. É importante destacar que apenas as barras PQ do sistema (Ω_{PQ}) podem ser selecionadas para serem controladas pelo SVC, pois, ao tentar controlar uma barra PV ou de referência, o SVC entra em conflito com o gerador que controla essa barra na rotina de fluxo de potência.
4. Por fim, a quarta vizinhança determina a barra à qual o SVC deve ser conectado e é definido sob os mesmos princípios da terceira vizinhança.

A determinação da função objetivo de cada solução explorada demanda a execução de uma rotina de fluxo de potência para cada situação de contingência considerada. Além disso, é importante destacar que esse método considera apenas o modo de controle por corrente injetada do SVC. A solução inicial é determinada como um conjunto de valores factíveis, porém sorteados aleatoriamente, para $\hat{X}$. O critério de parada adotado é a execução um número máximo de iterações pré-definido. O número da iteração é alterado quando o algoritmo percorre todas as estruturas de vizinhança definidas sem encontrar uma solução de melhor qualidade que a solução corrente, conforme apresentado no Algoritmo 1. Note que x é a solução atual, $\mathcal{N}^k(x)$ é a função responsável por gerar soluções vizinhas da solução x de forma aleatória segundo as definições da estrutura de vizinhança k (definidas nos parágrafos anteriores), P é a quantidade de vizinhos que compõem a vizinhança da solução corrente, N^k é o conjunto de soluções vizinhas considerando a k -ésima estrutura de vizinhança, $f(x)$ é o valor da função objetivo da solução x , x' é a solução vizinha, considerando a k -ésima estrutura de vizinhança, com a melhor função objetivo.

4. Resultados e Discussão

O algoritmo desenvolvido foi testado no sistema IEEE de 14 barras. Dada a quantidade de barras do sistema teste, considerou-se a possibilidade de alocação de um único SVC ($N^{svc} = 1$). O conjunto de contingências proposto para analisar a severidade dos eventos de violação da magnitude da tensão é

Algoritmo 1: Pseudocódigo da estratégia VNS desenvolvida

Require: $x_0, k_{max}, it_{max}, f(x_0), P$

```

1:  $x \leftarrow x_0$ 
2:  $f(x) \leftarrow f(x_0)$ 
3: for  $i=1$  to  $it_{max}$  do
4:    $k \leftarrow 1$ 
5:   while  $k \leq k_{max}$  do
6:     for  $p=1$  to  $P$  do
7:        $N_p = \mathcal{N}^k(x)$ 
8:     end for
9:      $N^k \leftarrow N_p$ 
10:     $x' \leftarrow \min\{f(y) | y \in N^k\}$ 
11:    if  $f(x') < f(x)$  then
12:       $x \leftarrow x'$ 
13:       $k \leftarrow 1$ 
14:    else
15:       $k \leftarrow k+1$ 
16:    end if
17:  end while
18: end for
19: return  $x$ 
  
```

composto por todas as possíveis contingências N-1. O valor da inclinação do SVC estão dentro da faixa de 1 até 5% [Taylor et al., 1994a], e a capacidade máxima do SVC considerada para este sistema foi de 60 MVAR ($\overline{Q}^{svc} = 60$). Além disso, considera-se que a tensão da barra controlada pelo SVC deve ser mantida em 1 p.u., i.e. $V^{esp} = 1$. Os limites de tensão estão dentro da faixa $\pm 5\%$ p.u., i.e. $\underline{V} = 0,95$ e $\overline{V} = 1,05$, enquanto os parâmetros K^{sev} e K^{svc} são, respectivamente, 10^4 e $0,5$. O algoritmo VNS foi desenvolvido em Python, e as rotinas de fluxo de potência necessárias para analisar os cenários de contingência N-1 propostos foram executadas no *software* ANAREDE[®]. Todos os resultados foram obtidos em um computador pessoal com um processador Intel[®] Core i7-10700 com clock de 2.90 GHz e 32GB de memória RAM.

4.1. Análise de convergência do algoritmo de VNS

Neste trabalho, a eficiência do algoritmo de VNS é avaliada a partir de sua capacidade de fuga de ótimos locais e convergência para uma solução única considerando, inclusive, a alteração da solução inicial do algoritmo. Dez soluções iniciais são consideradas e, para cada uma destas soluções iniciais, executa-se o algoritmo desenvolvido 10 vezes. Sobre os parâmetros definidos para o algoritmo de VNS cabe destacar que o critério de parada é definido como a execução de 30 iterações e cada estrutura de vizinhança é composta por quatro soluções vizinhas da solução corrente ($P = 4$). Um boxplot dos valores das funções objetivo obtidos a partir de 10 execuções para cada solução inicial é apresentado na Figura 2.

Observe na Figura 2 que a solução cuja função objetivo é 90,60 é encontrada, pelo menos uma vez em 10 execuções, independentemente da solução inicial, o que atesta a robustez do algoritmo proposto à variação do ponto de início da busca e sua capacidade de exploração do espaço de busca. Além disso, note que nenhuma mediana dos boxplots ilustrados ultrapassa 90,75, o que indica que, mesmo quando o algoritmo é incapaz de convergir para a melhor solução (dentre as que o algoritmo foi capaz de identificar nas 100 execuções), uma solução com função objetivo bastante semelhante é encontrada.

Para além da capacidade de convergência, é necessário verificar se o limite de iterações definido como critério de parada é suficiente para evitar a finalização prematura da exploração do espaço de busca. O gráfico de evolução da função objetivo da solução corrente, apresentado na Figura 3, evidencia a suficiência de 30 iterações. Note que não existe alteração da solução corrente (vide a estagnação da função objetivo) após a iteração 10. Evidentemente, nem toda execução demanda 10 iterações para convergir, em alguns casos a convergência ocorre depois da terceira iteração, enquanto outros casos a função objetivo é alterada até

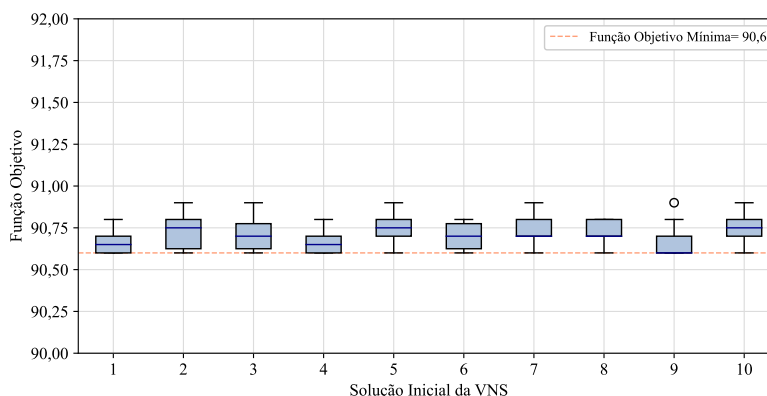


Figura 2: Boxplot das funções objetivo obtidas pela VNS em 10 execuções.

a iteração 20. É importante salientar que, para o caso ilustrado na Figura 3, 536 soluções foram exploradas ao longo das 30 iterações, sendo que 216 delas (40,30% do total) são investigadas nas 10 primeiras iterações.

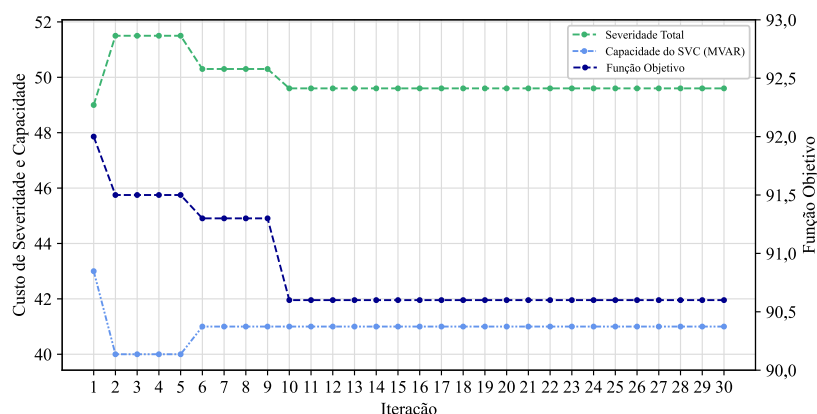


Figura 3: Evolução da função objetivo ao longo das iterações.

Quanto às características que diferenciam as soluções atuais obtidas nas iterações 2, 6 e 10, tem-se que a capacidade instalada do SVC reduz de 43 MVAR para 40 MVAR na segunda iteração, o que causa a redução da função objetivo às custas de um aumento (menor) na severidade das violações de tensão. Já na iteração 6, a capacidade do SVC é aumentada para 41 MVAR, o que causa uma redução de severidade das violações de tensão maior que 1. Por fim, na iteração 10, o ajuste da inclinação da curva de atuação do SVC causa a redução da severidade das violações de tensão sem qualquer alteração no custo de instalação do SVC, o que beneficia de forma significativa a função objetivo.

4.2. Análise Operacional do Sistema com SVC

Para o estudo de caso da comparação da performance do sistema antes e depois da instalação do SVC, considera-se a melhor solução encontrada pela VNS cuja codificação é $\hat{X}=[7; 10; 1,01; 41; 41]$ e a função objetivo, considerando os pesos descritos no início desta seção, é 90,60. Segundo o modelo de codificação empregado neste trabalho, $\hat{X}$ indica a instalação de um SVC com capacidade $Q^{cap-} = Q^{cap+} = 41$ MVAR e curva de operação com inclinação 1,01% instalado na barra 7 para controlar a tensão na barra 10, mantendo-a em 1,00 p.u., conforme ilustrado na Figura 4. Uma comparação entre as severidades de violações de magnitude de tensão considerando o sistema operando com e sem a alocação do SVC indicado por $\hat{X}$ é apresentada na Tabela 1.

Note que a instalação do SVC com parâmetros construtivos e operativos determinados por $\hat{X}$ causou a redução do índice total de severidade de 416,9 para 49,6 (redução de 88,10%) e o número total de

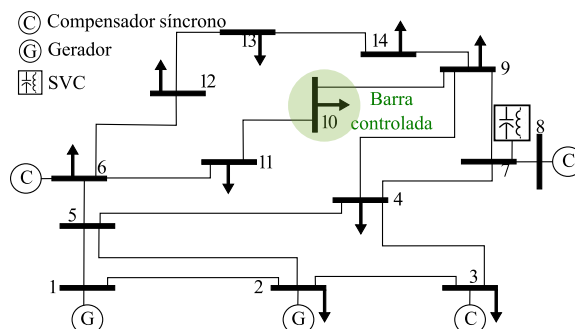


Figura 4: Ilustração do sistema teste após a alocação do SVC.

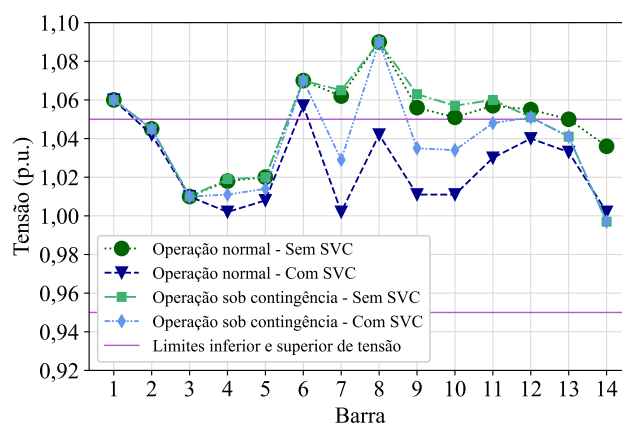
Tabela 1: Análise das Severidades de Violação de Magnitude de Tensão.

Evento de Contingência	Com SVC		Sem SVC	
	Severidade*	Número de Violações	Severidade*	Número de Violações
Linha 10–11	6,9	4	24,1	7
Linha 6–11	5,3	4	21,8	5
Linha 2–3	5	2	21,3	6
Linha 13–14	4,3	4	22,9	8
Linha 1–2	3,4	5	0	0
Linha 7–9	3	2	24	5
Linha 5–6	2,6	2	17,1	3
Linha 6–13	2,6	2	21,6	5
Linha 4–5	2,5	2	21,8	6
Linha 9–10	1,8	2	25,5	7
Linha 4–7	1,7	2	25	7
Linha 6–12	1,6	2	22,9	7
Linha 12–13	1,6	2	23,9	8
Linha 4–9	1,3	2	22,7	7
Linha 9–14	1	2	26,9	8
Linha 3–4	1	2	24,1	9
Linha 7–8	1	2	5,1	3
Linha 2–5	1	1	22,6	8
Linha 2–4	1	1	21,8	7
Linha 1–5	1	1	21,8	7
Total	49,6	46	416,9	123

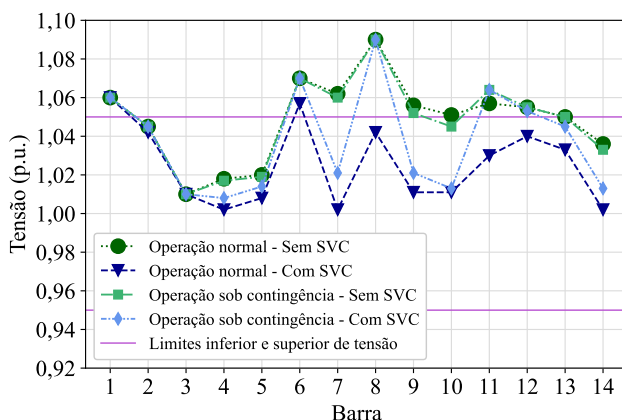
* A severidade é dada por $K^{sev}ST$, conforme calculado em (2)–(4).

violações de 123 para 43 (redução de 65,04%). Além disso, considerando os cenários de críticos de contingência, tanto do ponto de vista do indicador de severidade quanto da quantidade de violações, a operação com SVC apresenta performance superior, e.g., redução de 74,35% no valor da maior severidade registrada (observadas para contingências nas linhas 10–11 e 9–14 para os casos com e sem SVC, respectivamente) e de 44,44% na quantidade de restrições violadas para uma única contingência (contingências nas linhas 1–2 e 3–4 para os casos com e sem SVC, respectivamente). Cabe salientar que, caso nenhuma ação fosse feita, i.e. $\hat{X}=[*; *; *; 0; 0]$, a função objetivo seria 416,9, que é 4,60 vezes superior ao valor encontrado pela VNS.

É importante mencionar que a magnitude de algumas barras com tensão controlada do sistema base, i.e. barras com geradores ou compensadores síncronos, possuem *setpoint* tensão superior a 1,05 p.u., o que pode não representar um problema para a operação do gerador/compensador. No entanto, definir tais *setpoints* afeta a magnitude da tensão em barras sem controle de tensão, i.e., barras de carga, mesmo durante a operação normal do sistema. Ao alocar um SVC, uma das barras de carga passa a dispor de um meio para controle de tensão, o que causa a redução da magnitude, evitando violações de tensão em barras do tipo PQ, como pode ser observado na Figura 5.



(a) Operação normal e contingência na linha 9–14 (evento crítico antes da alocação do SVC).



(b) Operação normal e contingência na linha 10–11 (evento crítico após a alocação do SVC).

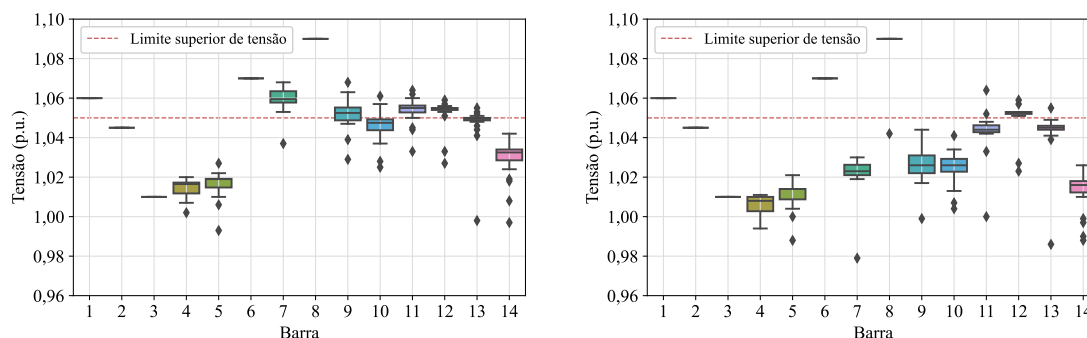
Figura 5: Perfil de tensão do sistema.

Por fim, um boxplot das magnitudes das tensões nodais calculadas para cada cenário de contingência considerando e desconsiderando a instalação do SVC é apresentado na Figura 6. Observe que as tensões nas barras 1, 2, 3, 6 e 8 são constantes para todos os cenários de contingência mesmo após a instalação do SVC, visto que estas são barras com tensão controlada por geradores e compensadores síncronos. Por outro lado, os valores máximos, mínimos e a mediana da magnitude da tensão em todas as barras do tipo PQ são reduzidos após a instalação do SVC. Note que, enquanto praticamente todos os cenários de contingência causavam eventos de sobretensão nas barras 7, 9, 11 e 12 antes da alocação do SVC, apenas a barra 12 apresenta violações consistentes de magnitude de tensão após a instalação do dispositivo.

5. Conclusões

Os resultados obtidos demonstram que o algoritmo de VNS é uma abordagem eficaz para a alocação e dimensionamento de SVCs em SEPs. O algoritmo proposto foi validado para o sistema IEEE de 14 barras e proporcionou melhoria significativa no perfil de tensão e na segurança do sistema, reduzindo a severidade total de tensão e o número de violações durante operações normais e em cenários de contingência.

A instalação do SVC na barra 7 para controlar a tensão na barra 10 provou ser a solução mais eficaz dentre as investigadas pela VNS, proporcionando uma redução de 88,10% na severidade das violações



(a) Caso desconsiderando a instalação do SVC.

(b) Caso considerando a instalação do SVC.

Figura 6: Boxplot de magnitude das tensões nodais considerando todos os cenários de contingência.

e 65,04% na quantidade de eventos de violação durante cenários de contingência em comparação com o caso base. Além disso, os efeitos dos casos de cenários de contingência críticos na magnitude das tensões foram mitigados significativamente. Esses resultados destacam a importância da alocação estratégica e do dimensionamento adequado de dispositivos SVC para garantir a estabilidade e confiabilidade dos SEPs, especialmente em situações de contingência. Por fim, os resultados evidenciam que o algoritmo de VNS pode ser uma ferramenta valiosa para operadores e planejadores de sistemas elétricos empenhados em garantir a robustez da rede mediante eventos inesperados.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado em parte pela Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), código de financiamento 001, e em parte pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) sob o processo 408464/2023-2. Agradecemos também o apoio do RCGI – Research Centre for Greenhouse Gas Innovation (23.1.8493.1.9), sediado pela Universidade de São Paulo (USP), patrocinado pela FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (2020/15230-5) e patrocinado pela TotalEnergies, e a importância estratégica do apoio dado pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) por meio da regulamentação da taxa de P&DI. Também reconhecemos o apoio à pesquisa e desenvolvimento da TotalEnergies EP Brasil por meio do financiamento do projeto “Mitigação da limitação da geração renovável por meio da alocação ótima de recursos energéticos e dispositivos FACTS no Sistema Interligado Nacional” (código ANP 23655-4)

Referências

- Ahmad, A. A. e Sirjani, R. (2020). Optimal placement and sizing of multi-type FACTS devices in power systems using metaheuristic optimisation techniques: An updated review. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(3):611–628.
- Al-Saidi, M., Al-Badi, A., Onen, A., e Elhaffar, A. (2023). Optimal location and size of static VAR compensators (SVC) to enhance the voltage profile on the main interconnected system in Oman. *Energies*, 16(19):6802.
- Amaris, H. e Alonso, M. (2011). Coordinated reactive power management in power networks with wind turbines and FACTS devices. *Energy Conversion and Management*, 52(7):2575–2586.
- Antúnez, C. F. S. (2014). Alocação Ótima de equipamentos SVC e TCSC na rede de transmissão de energia elétrica. Dissertação, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira.
- Carrión, D., García, E., Jaramillo, M., e González, J. W. (2021). A novel methodology for optimal SVC location considering n-1 contingencies and reactive power flows reconfiguration. *Energies*, 14(20):6652.

- CEPEL. *ANAREDE: Programa de Análise de Redes – Manual do Usuário*. Rio de Janeiro, 2023. URL <http://www.anarede.cepel.br/>. Versão do manual: V11.07.00, Janeiro de 2023.
- Cherkaoui, N., Belfqih, A., El Mariami, F., Boukherouaa, J., e Berdai, A. (2019). Optimal location and reactive power injection of wind farms and SVC's units using voltage indices and PSO. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 9(5):3407–3414.
- Chethan, M. e Kuppan, R. (2024). A review of FACTS device implementation in power systems using optimization techniques. *Journal of Engineering and Applied Science*, 71(1):18.
- Dazahra, M., Elmariami, F., Belfqih, A., e Boukherouaa, J. (2016). Optimal location of SVC using particle swarm optimization and voltage stability indexes. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 6(6):2581–2588.
- Eremia, M., Gole, A., e Toma, L. (2016). Static VAr compensator (SVC). *Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence*, p. 271–338.
- Ghahremani, E. e Kamwa, I. (2012). Optimal placement of multiple-type FACTS devices to maximize power system loadability using a generic graphical user interface. *IEEE transactions on power systems*, 28(2):764–778.
- Hansen, P. e Mladenovic, N. (2003). A tutorial on variable neighborhood search. *Les Cahiers du GERAD ISSN*, 711:2440.
- Mladenović, N. e Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers & operations research*, 24(11):1097–1100.
- Nadeem, M., Imran, K., Khattak, A., Ulasyar, A., Pal, A., Zeb, M., e Padhee, M. (2020). Optimal placement, sizing and coordination of FACTS devices in transmission network using whale optimization algorithm. *energies*, 13, 753.
- Panda, S. e Patel, R. (2009). Optimal location of shunt FACTS devices in long transmission lines to improve transient stability. *International Journal of Electrical Engineering Education*, 46(2):150–163.
- Sakthivel, S., Mary, D., Vetrivel, R., e Kannan, V. S. (2011). Optimal location of SVC for voltage stability enhancement under contingency condition through pso algorithm. *International Journal of Computer Applications*, 20(1):30–36.
- Taylor, C. W., Scott, G., e Hammad, A. (1994a). Static VAr compensator models for power flow and dynamic performance simulation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(1):229–240.
- Taylor, C., on Large High Voltage Electric Systems Study Committee Power System Analysis, I. C., Force, T. W. G. T., e on Large High Voltage Electric Systems. Study Committee 38. Task Force 38.02.10, I. C. (1994b). *Modelling of Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena: Prepared by Task Force 38.02.10*. Brochures thématiques: International Conference on Large High Voltage Electric Systems. CIGRE.
- Toledo, Y. M. d., Faria, W. R., e Pereira Junior, B. R. (2021). Restoration method for active distribution networks considering black start. In *Anais do Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2021, João Pessoa*.
- Yorino, N., El-Araby, E., Sasaki, H., e Harada, S. (2003). A new formulation for FACTS allocation for security enhancement against voltage collapse. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(1):3–10.