DOI: 10.48011/asba.v2i1.1252

Avaliação de Segurança de Tensão em Sistemas Elétricos de Distribuição via Regiões de Segurança Estática

Othon F. Ávila * João A. Passos Filho *

* Faculdade de Engenharia Elétrica, Departamento de Energia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)-PPEE, MG, (e-mail: othon.avila@engenharia.ufjf.br, joao.passos@ufjf.edu.br).

Abstract:

Electric Power Systems are evolving from a centralized generation model toward a complex infrastructure with distributed energy resources. The transformative changes are especially pronounced at the level of the distribution systems, with the development of new technologies that affect the customer's consumption and generation profile, the planning, and the operation environment of distribution utilities. Thus, the main objective of this work is to present a new tool for voltage security analysis of distribution systems with the presence of distributed energy resources. The proposed tool will assist in the operation, planning, and management of distribution systems, and consequently, in the improvement of the quality of the services provided by the distribution utilities. This tool is developed in Python language and uses the OpenDSS software as a power flow.

Resumo: Os Sistemas Elétricos de Potência estão evoluindo de um modelo centralizado de geração para uma complexa infraestrutura com recursos energéticos distribuídos. As mudanças transformadoras são especialmente observadas no nível dos sistemas de distribuição, com o surgimento de novas tecnologias que afetam o perfil de consumo e geração própria dos clientes, o planejamento e as operações dos serviços públicos de distribuição de energia. Assim, o principal objetivo deste trabalho é apresentar uma nova ferramenta para análise de segurança em sistemas de distribuição com presença de recursos energéticos distribuídos. A ferramenta proposta irá auxiliar na operação, planejamento e gestão dos sistemas de distribuição e, consequentemente, na melhoria da qualidade dos serviços prestados pelas concessionárias de distribuição. Esta ferramenta é desenvolvida na linguagem Python e utiliza o programa OpenDSS como ferramenta de solução de fluxo de potência.

Keywords: Distribution management; Steady-state security region; Voltage security; Electrical distribution systems; Distributed energy resources;

Palavras-chaves: Gerenciamento da distribuição; Região de segurança estática, Segurança de tensão; Sistemas elétricos de distribuição; Recurso energético distribuído

1. INTRODUÇÃO

A transformação nos sistemas elétricos de distribuição (SED) está acontecendo em diversos países. O mundo está mudando com a crescente complexidade de seus sistemas de energia e de seus clientes. Os esforços para descarbonizar o sistema de energia elétrica levaram ao crescimento de fontes renováveis de energia, particularmente recursos energéticos distribuídos (RED), como energia solar fotovoltaica, turbinas eólicas, carros elétricos, armazenamento de energia e resposta da demanda. Essas tecnologias estão transformando os clientes em prosumidores (que consomem e produzem eletricidade). Com essas transformações, novas ferramentas de gerenciamento dos SED são necessárias para uma melhoria na operação, planejamento e problemas de mercado da concessionária Xiao et al. (2012); Adefarati and Bansal (2016); Ackermann et al. (2001); Michael Henderson and Shneider (2019). Algumas das

transformações nos SED, devido a presença de RED, são discutidas a seguir:

- Fluxo bidirecional: tradicionalmente, os sistemas de energia elétrica são estruturados como um sistema unidirecional, onde a eletricidade gerada por grandes usinas é transportada através do sistema elétrico de transmissão (SET) e do SED para serem entregues aos clientes. Esse paradigma está sendo modificado pela introdução do RED, agora o fluxo de energia pode se mover em todas as direções (SET para SED ou SED para SET). Essa mudança afeta quase tudo na rede, incluindo projeto e proteção de infraestrutura, procedimentos e segurança de trabalho, operações de rede, planejamento de sistema e operações comerciais Xiao et al. (2012); Adefarati and Bansal (2016).
- Geração distribuída intermitente & menos previsíveis: nos dois níveis de SET e SED, a quantidade de energia fornecida a partir de fontes renováveis

tem aumentado constantemente, acompanhada por uma diminuição igualmente constante na energia fornecida pela geração centralizada e despachável, proveniente de gerações movidas a combustíveis fósseis. Assim, o gerenciamento da rede tradicional precisará cada vez mais de serviços auxiliares, incluindo regulação de tensão e a capacidade de aumentar e diminuir rapidamente a geração Adefarati and Bansal (2016); Vadari (2020); Dudurych et al. (2012).

- Novos modelos de mercados & negócios: com o crescimento do RED, as empresas que realizam consórcio para compra de sistemas de energia solar estão se tornando participantes ativos no mercado de energia elétrica. Essas empresas geralmente oferecem serviços aos consumidores, podem fornecer serviços às operadoras de rede e também podem querer participar de mercados de sistemas de energia a granel. Novos relacionamentos surgiram entre empresas de serviços públicos e clientes ou terceiros devido ao RED. Essas alterações podem exigir recursos operacionais adicionais para o gerenciamento do SED Michael Henderson and Shneider (2019); Vadari (2020).
- Novo perfil do cliente: o perfil atual da demanda do cliente está mudando com a presença dos RED. Tecnologias como solar fotovoltaica, carros elétricos e sistemas de armazenamento de energia estão se tornando cada vez mais populares entre os clientes. Mudanças nos sistemas de aquecimento de edifícios também estão se tornando mais frequentes. Novas tecnologias, juntamente com mudanças no comportamento da rede, afetarão todos os aspectos das operações de serviços públicos no futuro próximo. As concessionárias de energia devem assumir novas funções para garantir a qualidade de seus serviços aos clientes Haakana et al. (2019, 2018); Issicaba et al. (2012).

Essas transformações requerem novas ferramentas/estudos para operações e planejamento dos SED, para que assim, as concessionárias possam atender, com melhor qualidade de serviço, a esse novo mundo.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A ferramenta desenvolvida por este trabalho é aplicada para análise de segurança de tensão de SED através do conceito de regiões de segurança estática. A definição, modelagem e aplicação de regiões de segurança estática surgiu no âmbito de estudos aplicados em SET. Este trabalho visa a utilização de regiões de segurança estáticas, com modificações, em SED. Assim, a revisão da literatura será dividida em duas partes, a primeira na análise de segurança em SED e a segunda nas regiões de segurança estática em SET.

2.1 Análise de segurança em SED

A Tabela 1 mostra alguns dos principais tópicos de pesquisa da literatura sobre segurança em SED. A coluna "Método de observação" indica se os resultados de segurança do SED são expostos usando índices ou visualizações (gráficos). Os tipos de RED presentes no sistema, e se este opera como uma *microgrid*, são representados pela coluna "RED", onde: "GD" significa geração distribuída; "BESS" sistema de armazenamento de energia (baterias);

"frio, calor e eletricidade", sistemas de geração de frio, calor e eletricidade. Por fim, a coluna "Segurança" indica como a segurança do SED é avaliada, onde: "Topologia de rede" indica que foram feitas alterações na topologia do SED para avaliar sua segurança; "f&v" a segurança é avaliada pelos critérios de estabilidade de frequência e/ou tensão; "Confiabilidade" análise de confiabilidade do SED sobre vários parâmetros de carga/geração.

Tabela 1. Alguns tópicos de pesquisa sobre segurança em SED.

Trabalho	Método de observação		RED	Segurança
	Índices	Visualizações	1 RED	Segurança
Xiao et al. (2012, 2014, 2019)	×	~	x	Topologia da rede
Zu et al. (2017)	×	V	GD	Topologia da rede
Issicaba et al. (2012)	~	×	GD, microgrids	f&v, confiabilidade
Da Silva et al. (2006); Bae and Kim (2007)	~	×	GD	Confiabilidade
Peng et al. (2019)	~	~	GD, BESS, microgrids	f&v
Liu et al. (2020)	×	~	Frio, calor e eletricidade	Topologia da rede
Mashayekh and Butler-Purry (2017)	~	~	microgrids	f&cv
Nourollah and Gharehpetian (2018)				

Nos trabalhos Xiao et al. (2012, 2014, 2019), os autores propõem uma avaliação de segurança aplicada a SED com base no critério de segurança de falha "N-1" dos transformadores localizados na subestação. O modelo apresentado é baseado no princípio de perda do transformador de potência (que conecta o SET ao SED). O transformador de potência pode ser conectado a outro da mesma subestação ou a um transformador de uma subestação próxima (vizinha) por meio de alimentadores com linhas ou interruptores de interconexão. Assim, a carga pode ser transferida para transformadores dentro da mesma subestação por meio de chaves comutadoras de barramento ou transformadores em outras subestações por meio de chaves comutadoras entre alimentadores. A avaliação de segurança exposta em Xiao et al. (2012, 2014, 2019) analisa apenas a segurança do SED através de falhas no transformador de potência da subestação. Baseado no mesmo critério de segurança de falha "N-1" dos transformadores da subestação, o trabalho Zu et al. (2017) propõe uma abordagem com reconfiguração de rede, usando a perda mínima de rede como uma função objetiva e a presença da geração distribuída (GD).

A referência Issicaba et al. (2012) apresenta uma avaliação de adequação e segurança do SED com RED. A avaliação é suportada por um modelo combinado de simulação contínua e discreta que emula a operação do SED. Este modelo gera uma sequência de estados operacionais que são avaliados de uma perspectiva de estado estacionário usando o fluxo de potência. A estabilidade de frequência e tensão são avaliadas usando simulação dinâmica para verificar a viabilidade da operação quando o SED opera de forma ilhada.

Em Da Silva et al. (2006), uma distribuição de probabilidade dos índices de confiabilidade do SED é avaliada usando uma abordagem sequencial de simulação de Monte Carlo, do ponto de vista da adequação do serviço. No trabalho Bae and Kim (2007), a GD é representada em uma abordagem analítica para avaliar a confiabilidade do SED. A técnica proposta em Bae and Kim (2007) inclui as características da GD, como o modo de operação, para combinar os modos de pico e de espera, e a falha de inicialização da própria GD. O trabalho Peng et al. (2019) propõe uma avaliação probabilística da avaliação de risco de segurança de uma microgrid híbrida CA/CC, levando em consideração a falta de suporte da rede principal (rede

básica) quando essa *microgrid* híbrida opera como uma ilha elétrica, com graves flutuações no fluxo de energia, desvio de frequência e corte de carga.

Com a profunda interconexão de diversas fontes energéticas (frio, calor e eletricidade) no SED, o problema de segurança após contingências ganhou grande atenção e é explorado pelo trabalho Liu et al. (2020). A estrutura de análise de segurança desta referência é criada para obter a medição do perfil do sistema, obtendo informações de segurança, e assim controlar a geração de frio, calor e eletricidade.

Microgrids isoladas, sistemas que não demandam energia elétrica da rede principal, são propensas a grandes desvios de frequência e tensão, devido à capacidade limitada de geração e baixa inércia. Elas exigem métodos eficazes de gerenciamento de energia com restrição de segurança que operam o sistema de maneira ideal, atendendo às restrições de segurança. O trabalho Mashayekh and Butler-Purry (2017) apresenta um método para avaliar uma abordagem determinística e probabilística de segurança em microgrids isoladas. Para eliminar as consequências indesejadas de falhas e variações drásticas de geração nas microgrids, o trabalho Nourollah and Gharehpetian (2018) apresenta uma redução de carga para melhorar a margem de estabilidade de tensão e frequência ou impedir o colapso da tensão ou frequência.

2.2 Regiões de segurança estática em SET

O conceito de regiões de segurança estática se origina dos estudos aplicados em sistemas de alta tensão (SET). A segurança de um SET é considerada uma condição instantânea da robustez do sistema em relação a distúrbios iminentes Wu et al. (1988). A região de segurança é o conjunto de todos os pontos operacionais, considerados seguros por vários critérios de segurança, como sobrecarga de equipamentos e linhas, violações de tensão nodal e outros Yu (2002); Liu and Wu (1985); Jardim et al. (2006).

A região de segurança pode fornecer informações sistêmicas e globais sobre pontos operacionais viáveis. A construção da região pode ser realizada offline e aplicada online para determinar a segurança de um ponto operacional Wu and Kumagai (1982); Almeida et al. (2013); Netto and Borges (2020). Além disso, pode-se conhecer a localização relativa de um ponto de operação na região de segurança, o que é muito útil para os operadores do SET decidirem quantas gerações podem ser aumentadas em cada direção do espaço viável e qual direção é adequada para o controle de segurança.

No SET, pesquisas sobre regiões de segurança alcançaram conquistas importantes Almeida et al. (2013); Liu (1986); Zhu (2002); Wu and Kumagai (1982); YU et al. (1989); Wang and Yu (2011); Netto and Borges (2020). A técnica VSA (*Voltage Security Assessment*), uma aplicação de regiões de segurança estática, é usada para determinar se um SET pode satisfazer critérios de confiabilidade e segurança em regime permanente. No VSA, os resultados são apresentados através de três gráficos, que contêm margens de segurança do sistema, de acordo com os critérios de segurança previamente estabelecidos Almeida et al. (2013).

Os conceitos e implementações do VSA são bastante difundidos e também estão na forma de produtos comerciais. Em Savulescu (2009), há uma descrição de várias aplicações práticas que são bem-sucedidas em alguns países no que diz respeito ao monitoramento da segurança do SET em tempo real, bem como nas referências Franchi et al. (2003); Jardim et al. (2006); Neto et al. (2010). As duas últimas referências descrevem a aplicação de um sistema VSA atualmente adotado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) ONS (2020), no monitoramento em tempo real do Sistema Interligado Nacional (SIN). O artigo Almeida et al. (2013) apresenta em detalhes como a construção do VSA é executada para análise de segurança em SET. A aplicação de um VSA que considera a probabilidade da ocorrência de diversos pontos operativos é detalhado em Netto and Borges (2020). Nesta referência é discutido a importância da consideração de pontos operativos que considerem não apenas níveis de carga e geração, mas também o cenário de operação dos demais componentes do sistema de potência.

3. CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

As transformações nas características dos SED, devido a crescente inserção de RED, tem estimulado o desenvolvimento de novas ferramentas/metodologias que auxiliem estas redes a alcançarem este novo mundo de transformações de forma segura e confiável. Neste contexto, este trabalho apresenta uma ferramenta para análise de segurança de tensão em SED, inspirada nos estudos do VSA, nomeada de Múltiplos Cenários de Tensão em SED (MCV–SED). A MCV–SED irá avaliar a segurança de tensão em um SED perante diversos pontos operativos desta rede. Em geral, um ponto operativo é caracterizado por um nível de carga, geração e o cenário de operação dos seus componentes, tensão nas barras de geração (barras PV), definição dos taps dos transformadores, estado de chaves comutadoras, injeção de reativos e entre outros.

Durante a operação de um sistema de potência questões como "O quanto inseguro é um ponto de operação inseguro?" podem surgir durante sua operação Netto and Borges (2020). Neste contexto, a MCV–SED caracteriza a segurança de um SED não apenas em "seguro" e "inseguro", como ocorre no VSA, e assim consegue mensurar a insegurança da região insegura mediante diversos pontos operativos. Assim, a MCV–SED consegue auxiliar na operação segura de um SED com presença de RED com as seguintes informações: i) uma região 100% segura do SED que leva em consideração os principais pontos operativos que possam ocorrer nesta rede; ii) o quão inseguro é uma região insegura; iii) a existência de fluxo de energia bidirecional; e iv) as violações médias de sub e sobre tensão.

4. FERRAMENTA PROPOSTA MCV-SED

4.1 Considerações iniciais

A técnica de mapeamento de pontos operativos aplicada no VSA, detalhada nos trabalhos Almeida et al. (2013); Jardim et al. (2006), é adaptada para a construção da MCV–SED. As principais diferenças entre a MCV–SED e o VSA são: i) o sistema elétrico de potência simulado: MCV–SED é aplicado em SED e o VSA em SET; ii) nível

de carga: MCV–SED considera a variação no nível da carga demandada pelo SED, enquanto que o VSA é construído para um nível de carga fixa do SET; iii) definição de um ponto de operação (PO): MCV–SED considera um PO como uma combinação de carga, geração (RED) e valores de outros parâmetros da rede, enquanto que o VSA adota seu PO como carga fixa, geração e análise de contingências; iv) eixos dos gráficos: os eixos dos gráficos da MCV–SED são carga e geração provinda dos RED, enquanto que no VSA seus eixos são valores de gerações de grupos geradores; v) avaliação de segurança: a MCV–SED avalia a segurança de tensão de um PO não somente em "seguro" e "inseguro", como é realizado na VSA, mas também caracteriza o quão inseguro é uma região insegura.

4.2 Técnica de mapeamento da MCV-SED

A técnica de mapeamento dos PO da MCV–SED é realizada através de direções angulares (θ) . Uma direção angular é definida conforme equação (1), onde: " θ_{ref} " é a direção de referência, este trabalho adota $\theta_{ref}=0$ °, para o qual todas as outras direções angulares são estimadas; e "nd" é o número total de direções angulares a serem percorridas. Por exemplo, para oito direções angulares, nd=8, tem-se os seguintes valores de θ : 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315°. A Figura 1 mostra um esquemático da MCV–SED para oito direções angulares. Os pontos marcados na Figura 1 representam os PO do SED e seu respectivo nível de seguração de tensão na rede (SVR). Cada cor refere-se ao um nível de seguraça, sendo verde o nível mais seguro e vermelho o menos seguro com relação a seguraça de tensão.

$$\theta = \theta_{ref} + d \times \frac{360^{\circ}}{nd} \qquad d = 1, 2, 3, ..., nd \qquad (1)$$
* Caso Base SVR 1 SVR 2 SVR 3 SVR 4

Carga [kW]

Figura 1. Exemplo da construção da MCV–SED para oito direções angulares nd=8.

Geração do

Recurso Energético Distribuído (RED) [kW]

A variação das cargas e dos RED no mapeamento da região de segurança é realizada de acordo com o valor do passo de potência $(Passo_{pot})$, distância entre dois PO, e a direção angular (θ) em análise. A equação (2) mostra o equacionamento da variação da carga e RED.

$$\Delta Carga = Passo_{pot} \times sen(\theta) \tag{2a}$$

$$\Delta RED = Passo_{pot} \times cos\left(\theta\right) \tag{2b}$$

A MCV-SED é baseada na resolução de sucessivos problemas de fluxo de potência para diversos PO do SED. Em geral, qualquer PO de um sistema de potência pode ser descrito como uma condição de carga/geração, valor das variáveis de controle (tensão nas barras PVs, taps de transformadores) e estado operacional de seus componentes (falha de algum elemento do sistema). No estudo das possibilidades, existem tantas combinações dessas variáveis que o conceito de um bom PO é um problema em si. Este artigo considera um PO do SED como uma combinação entre carga, geração dos RED, e o estado operativo de alguns parâmetros do SED, como a tensão de operação da barra da subestação, fator de potência das cargas e o nível de injeção de reativo pelos RED, conforme equação (3). Cada ponto marcado na Figura 1 representa o conjunto dos PO que apresentam o mesmo nível de carga e RED, porém com parâmetros de redes distintos.

Para cada PO é realizada a avaliação da segurança de tensão da rede (SVR). Esse índice expressa a probabilidade de não haver problema de violação de tensão no conjunto de PO que apresentam o mesmo nível de carga e RED. Esse corresponde à porcentagem dos estados de operação em que não há violação. A equação (4) traz o cálculo do SVR, onde: " n_{seg}^{PO} " representa o número de cenários seguros de operação para um determinado nível de carga/RED; " n_{cp} " representa o número de cenários de parâmetros considerados para o nível de carga/RED especificado. Os níveis de segurança SVR são agrupados em relação à todos os PO pertencentes ao um mesmo nível de carga/RED. Para um dado nível de carga/RED é realizada a variação dos demais parâmetros da rede, e assim, é possível calcular a segurança de tensão de todos os PO que pertencem a um mesmo nível de carga/RED.

$$SVR(carga, RED, \Delta parametros) = \frac{n_{seg}^{PO}}{n_{cp}}$$
 (4)

4.3 Avaliação da segurança de tensão

Durante a operação do SED, as tensões nas barras devem operar dentro de um limite de segurança estabelecido. O comportamento variável das cargas, RED e de outros parâmetros da rede, contribuem na variação da tensão em diversos pontos do SED. A tensão em cada ponto do sistema deve ser mantida entre limites máximos e mínimos. A inequação (5) representa a monitoração da segurança de tensão em cada barra do SED, onde: "nb" é o número de barras do SED; " $V_i^{a,b,c}$ " é o valor da tensão na barra "i"; " V_{min} " e " V_{max} " são os valores mínimos e máximos, respectivamente, de segurança de tensão da rede; e "a,b,c" são as 3 fases do SED. Como os SED são naturalmente desequilibrados, a sua monitoração de tensão deve ser realizada para cada uma das três possíveis fases (a,b,c) de cada barra.

$$V_{min} \le V_i^{a,b,c} \le V_{max} \qquad i \forall nb \qquad (5)$$

O fluxograma exposto na Figura 2 detalha a construção da MCV–SED. Toda a sua explicação é realizada em 27 etapas explicadas a seguir. Sua implementação é com a linguagem de programação Python e do *software* OpenDSS.

As primeiras etapas na construção da MCV-SED é a definição do caso base de operação, primeiro PO, uma combinação de carga/RED (carga/geração) e de seus parâmetros de rede. Os ajustes do caso base de operação são realizados nas Etapas 1 e 2. Na Etapa 3 é desempenhado a resolução do fluxo de potência desse PO (carga, RED, parâmetros). Após a resolução do fluxo é avaliado se alguma barra do sistema apresenta violação de tensão (equação (5)) na Etapa 4. Caso o PO seja seguro em tensão, uma unidade é contabilizada na variável n_{seg}^{PO} , e se inseguro na variável n_{inseg}^{PO} . Na Etapa 5, é verificado se todos os múltiplos PO foram analisados, ou seja, se todos os possíveis parâmetros foram aplicados no nível de carga/RED desse ponto. Caso a resposta da Etapa 5 seja negativa, retorne para a Etapa 2 para alteração dos parâmetros. Após a avaliação da segurança de tensão de todos os PO pertencentes a um mesmo nível de carga/RED, na Etapa 6 é realizado a análise da segurança de tensão desse PO, conforme equação (4), para então ser marcado no gráfico da MCV-SED na Etapa 7. A mesma técnica de mapeamento através de direções angulares para construção do VSA (Voltage Security Assessmet, regiões de segurança em SET) é aplicada no MCV-SED (região de segurança em SED), conforme explicado na Figura 1. Assim, na Etapa 8 é escolhido a primeira direção angular (θ) a ser mapeada. Na Etapa 9 é definido o valor do passo de potência $(Passo_{pot})$, esse valor representa a distância entre dois PO com relação aos valores de carga e RED.

Definido o passo de potência, na Etapa 10 é realizada a variação da carga/RED, na Etapa 11 o valor dos parâmetros da rede, e assim, na Etapa 12 tem-se um novo PO. A resolução do fluxo de potência desse PO é feita pela Etapa 13, e na Etapa 14 é verificado se fluxo divergiu (sem resultado) ou o nível de carga e/ou RED são nulos. Essa Etapa 14 representa um critério de parada de mapeamento de determinada direção. Caso nenhum dos critérios de parada de mapeamento ocorra, na Etapa 15 é avaliado se o PO é seguro (n_{seg}^{PO}) ou inseguro (n_{inseg}^{PO}) com relação a tensão. Na Etapa 16 é verificado se todos os possíveis PO foram analisados para um nível de carga/RED especificado. Na Etapa 17, caso o PO não tenha mudado o seu nível de segurança em relação ao anterior, é feita a análise de seguranca de tensão na Etapa 18 e esse PO é marcado na MCV-SED, Etapa 19. Assim, na Etapa 20 um novo PO será mapeado aplicando um passo de potência $(Passo_{pot})$, retornando para Etapa 10, e as Etapas de 11 à 19 se repetem. Caso o PO apresente uma mudança no seu nível de segurança (SVR) na Etapa 17, é realizado a redução do passo de potência (Passo_{pot}), Etapa 21, até que esse passo seja menor que um valor mínimo na Etapa 22, e na Etapa 23 o valor do passo de potência da próxima iteração retorna para seu valor de referência (antes da redução na Etapa 21) e o PO é marcado no MCV-SED de acordo com sua segurança de tensão nas Etapas 24 e 25. A redução do passo de potência na Etapa 21 tem o intuito de mapear o ponto mais próximo do anterior em

que ocorreu a alteração do nível de segurança de tensão da rede (SVR). O mapeamento de uma direção angular (θ) só termina quando o fluxo de potência diverge ou o nível de carga e/ou RED são nulos, assim na Etapa 26 é verificado se todas as direções angulares (nd) foram percorridas. Caso ainda exista direções a serem mapeadas, na Etapa 27 é realizado a alteração da direção angular (θ). Quando todas as nd direções angulares forem mapeadas, tem-se o fim da construção da MCV–SED.

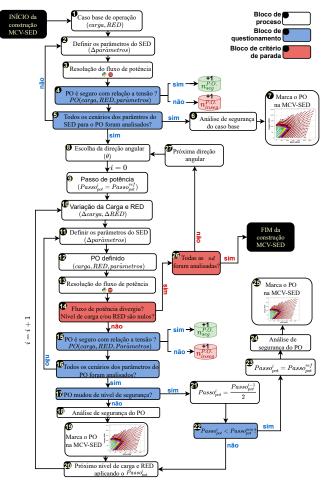


Figura 2. Fluxograma da ferramenta proposta: MCV–SED.

5. RESULTADOS

5.1 Considerações iniciais do sistema teste de distribuição

O SED escolhido para aplicação da MCV-SED é o alimentador teste IEEE-34 barras obtido em IEEE-PES (2020). Esta rede representa um modelo real de um alimentador localizado no Arizona (EUA), com uma tensão nominal de 24,9 kV. É caracterizado por dois reguladores em linha e levemente carregados, um transformador em linha para seção curta de 4,16 kV, carga desequilibrada e capacitores de derivação. A Figura 3 mostra o representativo de um diagrama unifilar desse alimentador teste. Como esse SED não apresenta RED em sua modelagem descrita em IEEE-PES (2020), considere os seguintes três RED alocados em sua rede: RED-1) geração trifásica (sequência ABC) localizada na barra 840; RED-2) geração trifásica (sequência ABC) localizada na barra 828; e RED-3) geração trifásica

(sequência ABC) localizada na barra 842. Todos os RED encontram-se no nível de 24.9 kV. No caso base de operacão o SED encontra-se com um nível de carga de 798 kW e 525 kW de geração provinda dos RED. Os limites mínimo e máximo de tensão seguro de operação são de 0.95 p.u. e 1.05 p.u., respectivamente, para todas as barras do SED.

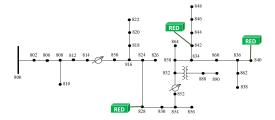


Figura 3. Diagrama unifilar do alimentador teste IEEE-34 barras IEEE-PES (2020).

5.2 Definição do ponto de operação

Cada PO a ser analisado pela MCV-SED é definido como uma combinação de seu nível de carga, RED e valor de alguns parâmetros da rede conforme equação (3). Os valores de carga e RED são definidos de acordo com a regra de mapeamento apresentado pela Figura 1. Os seguintes parâmetros de redes são adotados para definição de um PO: i) tensão de operação do barramento da subestação (barra-800): 1,0 p.u., 1,015 p.u. ou 1,03 p.u.; ii) potência reativa injetada pelos RED de acordo com seu fator de potência de operação: 1,0, 0,95 ou 0,90; iii) fator de potência das cargas: 1,0, 0,9 ou 0,8. Para cada nível de carga/RED definido, é analisado a combinação dentre estes possíveis valores de parâmetros, totalizando 27 possibilidades para cada nível de carga/RED mapeado. A escolha de tais parâmetros deve ser realizada através de um estudo que visa identificar quais são as maiores probabilidades de ocorrência em sua rede. Assim, a MCV-SED busca analisar a segurança de tensão mediante as maiores probabilidades de operação da rede.

5.3 Resultados da análise de segurança da MCV-SED

A Figura 4 mostra o resultado da análise de segurança de tensão da ferramenta MCV-SED no SED de 34 barras. A segurança de tensão da rede (SVR) é dividida em 6 níveis de segurança. Por exemplo, verde (SVR = 100%) indica que 100% dos PO pertencentes a um nível de carga/RED não apresentam violação de tensão e o amarelo (90% < SVR < 100%) entre 90% à 100% dos PO analisados para um determinado nível de carga/RED são seguros com relação a tensão. A área em verde da MCV-SED indica que o SED esta operando em uma região 100% segura com relação a violações de tensão e as outras cores indicam possíveis violações de tensão na rede. O mapeamento da região insegura em diferentes níveis, diferentes valores de SVR, ajuda o operador do SED a identificar o nível de insegurança de um PO localizado nesta região insegura (SVR < 100%).

A Figura 5 mostra o problema de violação de sobre tensão e a Figura 6 o problema de violação de sub tensão durante a construção da MCV-SED. Para todos os PO pertencentes a um mesmo nível de carga/RED é calculado a média

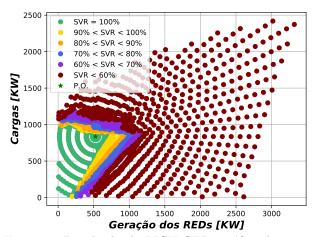


Figura 4. Resultado da MCV-SED: gráfico da segurança de tensão da rede (SVR).

de suas violações de tensões (MVV) como na equação (6), onde: "Ω" é o conjunto de barras que apresentaram violação de sobre tensão; " Ψ " é o conjunto de barras que apresentaram violação de subtensão; " $n_{eventos}^{\Omega}$ " e " $n_{eventos}^{\Psi}$ ", " é o número de vezes que ocorreu a violação de sobre e sub tensão respectivamente.

$$MVV^{sobreV} = \frac{\sum_{\omega \in \Omega} (V_{\omega} - V_{\omega}^{max})}{n_{countoe}^{\Omega}}$$
 (6a)

$$MVV^{sobreV} = \frac{\sum_{\omega \in \Omega} (V_{\omega} - V_{\omega}^{max})}{n_{eventos}^{\Omega}}$$
(6a)
$$MVV_{subV} = \frac{\sum_{\psi \in \Psi} (V_{\psi}^{min} - V_{\psi})}{n_{eventos}^{\Psi}}$$
(6b)

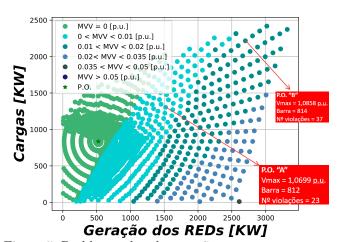


Figura 5. Problemas de sobre tensões.

De acordo com a Figura 5 é possível observar que a maioria dos problemas de sobre tensão $(V_{\omega} > 1.05p.u.)$ ocorrem quando o SED opera com altos níveis de geração dos RED em comparação aos níveis de carga. Em contra partida, a maioria dos problemas de sub tensão $(V_{\psi} < 0.95p.u.)$, Figura 6, ocorrem quando o SED opera em altos níveis de carga. Os dois P.O em destaque na Fig.

Os P.O "A" e "B", em destaque na Figura 5, e os "C" e "D", em destaque na Figura 6, apresentam outras informações que são obtidas durante a construção da MCV-SED para cada nível de carga/RED analisado, como: i) a máxima

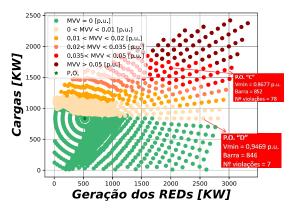


Figura 6. Problemas de sub tensões.

(Vmax)ou mínima (Vmin) violação de tensão que ocorre no SED; ii) a barra do SED que apresenta a máxima ou mínima violação de tensão; e iii) o número de violações de tensão que ocorre no SED considerando todos os possíveis valores de parâmetros do P.O, este trabalho considerou 27 possíveis cenários de operação para cada nível de carga/RED. O número máximo de violações é o número de barras do SED vezes o número de cenários dos demais parâmetros da rede (34 barras \times 27 valores de parâmetros = 918) em cada nível de carga/RED analisado.

Com a presença dos RED nos SED a possibilidade da ocorrência de fluxo de energia bidirecional torna-se um parâmetro importante de ser avaliado para segurança dessa rede. Neste contexto, a Figura 7 e Figura 8 mostram o comportamento do fluxo de energia na barra da subestação durante a construção da MCV-SED. A Figura 7 traz a informação do fluxo bidirecional de energia ativa (kW), onde "P" indica o percentual de PO pertencentes ao um mesmo nível de carga/RED que ocorrem fluxo reverso de energia ativa. Percebe-se que para níveis de RED acima do nível de energia demandada (cargas mais perdas elétricas), a ocorrência do fluxo reverso de energia ativa ocorre em quase todos os PO (P>80%). A Figura 8 mostra o percentual de PO pertencentes a um mesmo nível de carga/RED no qual acontece fluxo reverso de energia reativa (kVAr). Em quase todos os PO (Q>80%) há ocorrência de fluxo reverso de energia reativa. Esse fato ocorre devido a presenca de dois capacitores no SED nas barras 844 e 848 de capacidade de 300 kVAr e 450 kVAr respectivamente.

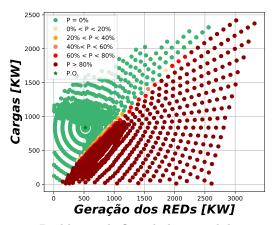


Figura 7. Problemas de fluxo bidirecional de energia ativa.

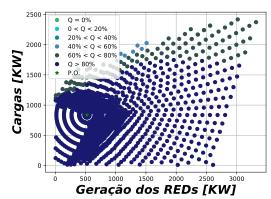


Figura 8. Problemas de fluxo bidirecional de energia reativa.

6. CONCLUSÃO

Com as crescentes evoluções dos SED devido a presença de RED, ferramentas que auxiliem no planejamento, operação e controle dos SED tornam-se essenciais para sua gestão em um futuro prospero. Neste caminho, esse trabalho apresenta uma metodologia para análise de segurança de tensão em um SED denominada Múltiplos Cenários de Tensão em SED (MCV–SED). Essa metodologia é inspirada na técnica VSA (Voltage Security Assessment) que é amplamente utilizada em todo o mundo na análise de segurança de SET. O processo de construção da tecnologia VSA é aplicada em SED por esse trabalho. As principais diferenças entra a MCV–SED e a VSA são destacadas.

A MCV-SED avalia a segurança de tensão de um SED perante diversos cenários operativos da rede. Um ponto de operação é definido como uma combinação de carga. geração dos RED e valores de alguns parâmetros da rede (tensão da subestação, fator de potência das cargas e RED). Seus resultados são expostos em formato de níveis de segurança de tensão, assim é possível mensurar o quão inseguro é uma região insegura e oferecer uma maior gama de informações ao operador da rede de distribuição. A MCV-SED oferece informações não só apenas da segurança de um SED, mas também os níveis médios de desvio de tensão e informações sobre fluxo de energia bidirecional. A construção da MCV-SED pode ser feita em ambiente offline e aplicada em atividades online. Assim, a MCV-SED pode ser utilizada em, por exemplo, centros de operação da rede de distribuição, similar ao VSA em salas de operação da transmissão, assistindo o operador na gestão do SED.

A aplicação de análise probabilística na ocorrência de cada ponto de operação pode ser inserida, como sugestão para trabalhos futuros, na MCV–SED apresentada por esse trabalho. A utilização de técnicas de amostragem de cenários, como simulação de Monte Carlo, podem ser aplicadas na MCV–SED a transformando em uma região que considera a probabilidade da ocorrência de seus cenários operativos, e assim, avalia a chance da ocorrência de cada ponto operativo de forma não determinística.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da CAPES, do CNPq, do INERGE, da FAPEMIG e da UFJF/PPEE.

REFERÊNCIAS

- Ackermann, T., Andersson, G., and Söder, L. (2001). Distributed generation: a definition. *Electric power systems research*, 57(3), 195–204.
- Adefarati, T. and Bansal, R. (2016). Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review. *IET Renewable Power Generation*, 10(7), 873–884.
- Almeida, F.C., Passos Filho, J.A., Pereira, J.L., Henriques, R.M., and Marcato, A.L. (2013). Assessment of load modeling in power system security analysis based on static security regions. *Journal of Control, Automation* and *Electrical Systems*, 24(1-2), 148–161.
- Bae, I.S. and Kim, J.O. (2007). Reliability evaluation of distributed generation based on operation mode. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(2), 785–790.
- Da Silva, A.M.L., Cassula, A.M., Nascimento, L.C., Freire, J.C., Sacramento, C.E., and Guimarães, A.C.R. (2006). Chronological monte carlo-based assessment of distribution system reliability. In 2006 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 1–7. IEEE.
- Dudurych, I.M., Rogers, A., Aherne, R., Wang, L., Howell, F., and Lin, X. (2012). Safety in numbers: Online security analysis of power grids with high wind pentration. *IEEE Power and energy Magazine*, 10(2), 62–70.
- Franchi, L., Gambelunghe, A., Salvati, R., and Sforna, M. (2003). Online dynamic security assessment at the italian independent system operator. In 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings,, volume 3, 8-pp. IEEE.
- Haakana, J., Haapaniemi, J., Lassila, J., Partanen, J., Härmä, R., and Ryhänen, M. (2019). Electricity demand profile for residential customer 2030.
- Haakana, J., Haapaniemi, J., Lassila, J., Partanen, J., Niska, H., and Rautiainen, A. (2018). Effects of electric vehicles and heat pumps on long-term electricity consumption scenarios for rural areas in the nordic environment. In 2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM), 1–5. IEEE.
- IEEE-PES (2020). Power & energy society. URL http://sites.ieee.org/pes-testfeeders/resources/.
- Issicaba, D., Lopes, J.A.P., and da Rosa, M.A. (2012). Adequacy and security evaluation of distribution systems with distributed generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(3), 1681–1689.
- Jardim, J., Neto, C., and Dos Santos, M.G. (2006). Brazilian system operator online security assessment system. In 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 7–12. IEEE.
- Liu, C.C. (1986). A new method for the construction of maximal steady-state security regions of power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1(4), 19–26.
- Liu, C.c. and Wu, F.F. (1985). Steady-state voltage stability regions of power systems. Systems & control letters, 6(1), 23–31.
- Liu, L., Wang, D., Hou, K., Jia, H.j., and Li, S.y. (2020). Region model and application of regional integrated energy system security analysis. Applied Energy, 260, 114268.
- Mashayekh, S. and Butler-Purry, K.L. (2017). A novel deterministic and probabilistic dynamic security assessment approach for isolated microgrids. In 2017 19th

- International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP), 1–6. IEEE.
- Michael Henderson, Mani Vadari, R.M. and Shneider, K. (2019). Distribution management its changing world. *IEEE Power and Energy Magazine*, 18(1), 4–25.
- Neto, C.S., Quadros, M.A., Santos, M.G., and Jardim, J. (2010). Brazilian system operator online security assessment system. In *IEEE PES General Meeting*, 1–7. IEEE.
- Netto, N.A. and Borges, C.L. (2020). Enhancing the situational awareness of voltage security region via probabilistic reliability evaluation. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 30(1), e12150.
- Nourollah, S. and Gharehpetian, G.B. (2018). Coordinated load shedding strategy to restore voltage and frequency of microgrid to secure region. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(4), 4360–4368.
- ONS (2020). Operador nacional do sistema elétrico. URL http://ons.org.br/.
- Peng, H., Su, M., Li, S., and Li, C. (2019). Static security risk assessment for islanded hybrid ac/dc microgrid. *IEEE Access*.
- Savulescu, S.C. (2009). Real-time stability assessment in modern power system control centers, volume 42. John Wiley & Sons.
- Vadari, S. (2020). Electric system operations: evolving to the modern grid. Artech House.
- Wang, F. and Yu, Y. (2011). Power system thermal security region based on wide area measurement systems. *Proceedings of the CSEE*, 31(10), 33–38.
- Wu, F. and Kumagai, S. (1982). Steady-state security regions of power systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 29(11), 703–711.
- Wu, F.F., Tsai, Y.K., and Yu, Y.X. (1988). Probabilistic steady-state and dynamic security assessment. *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(1), 1–9.
- Xiao, J., Gu, W., Wang, C., and Li, F. (2012). Distribution system security region: definition, model and security assessment. *IET generation, transmission & distribution*, 6(10), 1029–1035.
- Xiao, J., Zhang, B., and Luo, F. (2019). Distribution network security situation awareness method based on security distance. *IEEE Access*, 7, 37855–37864.
- Xiao, J., Zu, G.q., Gong, X.x., and Wang, C.s. (2014). Model and topological characteristics of power distribution system security region. *Journal of Applied Mathematics*, 2014.
- YU, Y.X., HUANG, C.H., and FENG, F. (1989). A study on reactive power steady-state security regions. *Electric Machines and Power Systems*, 17(3), 155–166.
- Yu, Y. (2002). Security region of bulk power system. In *Proceedings. International Conference on Power System Technology*, volume 1, 13–17. IEEE.
- Zhu, J. (2002). Optimal power system steady-state security regions with fuzzy constraints. In 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 02CH37309), volume 2, 1095–1099. IEEE.
- Zu, G., Xiao, J., and Sun, K. (2017). Distribution network reconfiguration comprehensively considering n- 1 security and network loss. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 12(8), 1721–1728.