

Desempenho das funções de controle de inversores inteligentes de sistemas fotovoltaicos na regulação de tensão do sistema de distribuição

Brian Jaramillo-Leon* Erik Jaramillo-Leon** W. E. Chumbi***
Sergio Zambrano-Asanza**** John F. Franco† Jonatas B. Leite‡

* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira/SP, Brasil, (e-mail: bridanj1@gmail.com).

** Instituto de Engenharia Elétrica de Moscou, Krasnokazarmennaya 14, Moscou, 111250 Rússia. (e-mail: KharamiloleonE@mpei.ru).

*** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira/SP, Brasil, (e-mail: enrique.quito@unesp.br).

**** Departamento de Planejamento, “Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.” - CENTROSUR, Cuenca, Equador, (e-mail: sergio.zambrano@centrosur.gob.ec).

† Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira/SP, Brasil, (e-mail: fredy.franco@unesp.br).

‡ Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira/SP, Brasil, (e-mail: jb.leite@unesp.br).

Abstract: Currently, there is a rapid growth in the installation of photovoltaic solar systems in power distribution systems. The functionalities of smart inverters can bring benefits in the operational performance of the network. In this work, the influence of the smart inverters control functions: fixed power factor; Volt-VAR; and Volt-Watt, is evaluated in the voltage regulation of the network, assuming various operating scenarios. For this, power flows are simulated considering quasi-static time-series that incorporate the dynamic behavior of the distribution system. The simulations and analyzes are carried out in a real distribution feeder of an Ecuadorian utility. The results show that under simulated test conditions, the inverter’s Volt-VAR control presents better results in supporting voltage regulation.

Resumo: Atualmente existe um rápido crescimento na instalação de sistemas solares fotovoltaicos nas redes de distribuição de energia elétrica. As funcionalidades dos inversores inteligentes podem trazer benefícios no desempenho operacional da rede. Neste trabalho, a influencia das funções de controle dos inversores inteligentes: fator de potência fixo; Volt-VAR; e Volt-Watt, é avaliada na regulação de tensão da rede, assumindo vários cenários de operação. Para isto, simulam-se fluxos de potência considerando séries temporais que incorporam o comportamento dinâmico do sistema de distribuição. As simulações e análises são realizadas em um alimentador de distribuição real de uma concessionária equatoriana. Os resultados mostram que nas condições de teste simuladas o controle Volt-VAR do inversor apresenta melhores resultados no suporte da regulação de tensão.

Keywords: distribution system; OpenDSS; photovoltaic systems; smart inverter; voltage regulation.

Palavras-chaves: sistema de distribuição; OpenDSS; sistemas fotovoltaicos; inversor inteligente; regulação de tensão.

1. INTRODUÇÃO

Na atualidade, devido ao progresso tecnológico, à rápida mudança climática e aos incentivos governamentais existe uma alta penetração de recursos energéticos distribuídos (RED) nas redes de distribuição de energia elétrica, principalmente sistemas fotovoltaicos (SFV) (Seguin et al., 2016). O uso da geração distribuída proveniente de fontes de energia renováveis tais como geração eólica e solar fotovoltaica, pode melhorar a eficiência energética mediante a redução das perdas técnicas de energia e é capaz de

colaborar no controle da tensão. Porém, uma alta inserção desses geradores pode impactar negativamente o desempenho do sistema de distribuição e produzir inconvenientes na operação normal da rede. Alguns desses problemas são aumento de tensão, problemas térmicos, fluxo bidirecional da energia, critérios de proteção e aumento do número de operações dos equipamentos automáticos de regulação da tensão (Walling et al., 2008). Entre esses problemas, o aumento da tensão é o principal limitante para alcançar maiores níveis de penetração de geração fotovoltaica nas redes elétricas (EPRI, 2017).

A integração dos SFVs tem evoluído consideravelmente. Atualmente, encontram-se painéis fotovoltaicos de médio e pequeno porte instalados em terrenos, telhados e fachadas, conectados diretamente no nível de distribuição (média e baixa tensão). Algumas das particularidades da geração solar fotovoltaica são a não coincidência entre o momento que os geradores fotovoltaicos produzem sua energia máxima e o instante que as cargas consomem suas demandas máximas; e a variabilidade de geração devido ao passagens de nuvens.

A tensão no ponto de conexão dos consumidores varia ao longo da rede de distribuição, diminuindo à medida que as unidades consumidoras se afastam da subestação. A quantidade de queda de tensão é determinada pela resistência e reatância das linhas, bem como pelas características da carga no circuito. Uma das principais atribuições de uma concessionária de energia elétrica é fornecer tensão aos consumidores dentro de uma faixa de valores adequada. Portanto, a regulação da tensão é uma das funções mais importantes em um alimentador de distribuição. Os métodos comuns de regulação da tensão são a aplicação de reguladores de tensão automáticos, transformadores com *On-Load Tap Changer* (OLTC) e capacitores *shunt* chaveados. A coordenação adequada desses equipamentos é conhecida como controle Volt/VAR e pode ser definida como a capacidade de controlar os níveis de tensão e potência reativa em diferentes pontos da rede de distribuição (Borlase, 2017).

O inversor é o dispositivo eletrônico que transforma a corrente contínua em alternada e está presente em SFVs, sistemas de armazenamento de energia e geradores eólicos. Os inversores modernos são considerados “inteligentes”, já que possuem capacidades avançadas que permitem limitar a saída de potência ativa fornecida pelo gerador e também podem gerenciar a absorção/injeção de potência reativa na rede. Da mesma forma, a atualização do padrão IEEE 1547 (IEEE, 2018) sugere que o inversor inteligente pode controlar a tensão no ponto de conexão e participar ativamente na regulação de tensão da rede.

A aplicação das funcionalidades de controle dos inversores pode ser uma possível solução para mitigar alguns dos impactos negativos causados pela inserção dos SFVs, sem a necessidade de fortalecer a estrutura da rede elétrica. Dessa maneira, pode-se aumentar o nível de penetração dos geradores fotovoltaicos na rede de distribuição sem comprometer a qualidade da energia elétrica. Além disso, os inversores inteligentes podem ser integrados a um sistema de controle Volt-VAR da concessionária para ajudar a controlar a tensão e gerenciar os fluxos de potência reativa em um sistema de distribuição (EPRI, 2017).

A maioria dos novos inversores de sistemas fotovoltaicos instalados em campo utilizam as funções de controle Volt-VAR (VVC) e Volt-Watt (VWC) (Ding et al., 2020; Parajeles et al., 2017). Embora essas funcionalidades sejam cada vez mais comuns, pouco trabalho tem sido feito para abordar o desempenho e ajuste desses controles (Rylander et al., 2016). No trabalho de Rahimi et al. (2017), compara-se as funções fator de potência fixo e VVC com relação à capacidade de regulação de tensão. Considera-se uma hora de operação da rede com um passo de tempo de um segundo. Para quantificar o desempenho da regulação de tensão de cada controle, utiliza-se como métrica

o somatório dos desvios de tensão no ponto de conexão dos SFVs. No trabalho de Parajeles et al. (2017), avalia-se o desempenho das funções VWC e VVC em um alimentador de distribuição real considerando quatro cenários de penetração de geração fotovoltaica. Para cada cenário analisa-se as quantidades de: consumidores com problemas de sobretensão; redução da potência ativa injetada; e absorção de potência reativa. No trabalho de Kraiczky et al. (2018), mostra-se que a função VVC do inversor inteligente pode funcionar bem em combinação com os esquemas de regulação de tensão existentes. Padullaparti et al. (2018) propõem um procedimento para ajustar os controles do inversor inteligente agrupando os SFVs nas zonas do alimentador com subtensões. Os ajustes das funções VVC e controle dinâmico de corrente reativa (DRCC) são comparados com os pontos de ajuste desses controles recomendadas na literatura especializada. Usando como métricas de desempenho a faixa e a variabilidade de tensão.

Neste trabalho, é avaliado o desempenho das funções de controle dos inversores inteligentes na regulação de tensão em um alimentador de distribuição real de uma concessionária equatoriana de energia elétrica. Dessa forma, enfatiza-se no comportamento da tensão na rede utilizando as seguintes métricas: tensões máxima e mínima; e desvio e faixa de tensão. São consideradas três funções de controle do inversor: fator de potência fixo; Volt-VAR; e Volt-Watt. Para incluir a variação da carga e da geração solar fotovoltaica nas análises, simulam-se fluxos de potência via séries temporais ou *quasi-static time-series* (QSTS).

Este trabalho está estruturado da seguinte forma. Na seção 2, apresenta-se uma revisão das funções de controle dos inversores inteligentes e das métricas de desempenho utilizadas. A seção 3 mostra a modelagem da rede de distribuição e o framework de simulação. A seção 4 descreve o alimentador de distribuição real. Na seção 5, são mostradas as análises e resultados obtidos. Finalmente, na seção 6 são apresentadas as conclusões e possíveis trabalhos futuros.

2. FUNÇÕES DE CONTROLE DOS INVERSORES INTELIGENTES E MÉTRICAS

2.1 Função Fator de Potência Fixo

Neste controle, o fator de potência (FP) do inversor do SFV é especificado em um valor constante, independentemente do valor de tensão ou da potência ativa gerada. Embora este modo de controle não regule diretamente a tensão, ele gerencia a absorção ou injeção de potência reativa na rede a partir do nível de geração de potência ativa, proporcionando assim uma forma de suporte à regulação de tensão. O inversor inteligente é capaz de ajustar a potência reativa em resposta a variações na geração de potência ativa para manter o fator de potência no valor predefinido (EPRI, 2017).

2.2 Função Volt-VAR

Nesta função de controle, o inversor inteligente pode ser configurado para gerenciar sua própria saída de potência reativa (VAR) em função da tensão no ponto de conexão. O comportamento desta função de controle é mostrada na Figura 1. Essa curva é uma função linear por partes, cujo

eixo x é a magnitude de tensão em por unidade (p.u.) monitorada no ponto de conexão, e seu eixo y é a potência reativa disponível que pode ser fornecida pelo inversor e é definida como a capacidade livre de potência entre o valor nominal de potência aparente (kVA) do inversor e a saída de potência ativa a qualquer momento. Por convenção, valores positivos para o eixo y correspondem a fornecer potência reativa (comportamento capacitivo) e valores negativos refletem absorver VARs (comportamento indutivo). Observa-se que os pares ordenados (V_1, Q_1) , (V_2, Q_2) , (V_3, Q_3) e (V_4, Q_4) são os pontos de ajuste que determinam a configuração da função de controle. Quando a tensão é menor ou igual a V_2 o inversor fornece 100% da potência reativa disponível. Para tensões entre V_2 e V_3 , o inversor produzirá ou consumirá energia reativa entre 0% e 100% da capacidade de potência reativa disponível do inversor. Quando a tensão no ponto de conexão do sistema fotovoltaico apresenta valores maiores que V_3 o inversor consumirá o 100% de potência reativa de disponível.

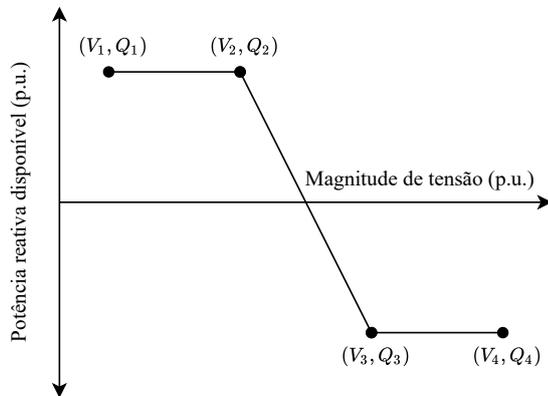


Figura 1. Curva da função de controle Volt-Var.

2.3 Função Volt-Watt

A função VWC pode limitar a potência ativa gerada pelo sistema fotovoltaico com base na tensão monitorada no ponto de conexão. Esta função de controle determina a saída de potência ativa de uma instalação fotovoltaica pelo uso de uma curva de potência ativa vs. tensão como a mostrada na Figura 2. Para valores menores a V_2 o inversor produz a máxima potência ativa disponível. Para tensões entre V_2 e V_3 a saída de potência ativa é reduzida linearmente de P_2 para P_3 . No valor de tensão V_3 e superior, a saída de potência ativa é zero. A função VWC pode ser utilizada quando existe sobretensão em certos períodos devido à alta geração, baixo consumo e falta de equipamentos de regulação de tensão na rede (Freitas, 2019).

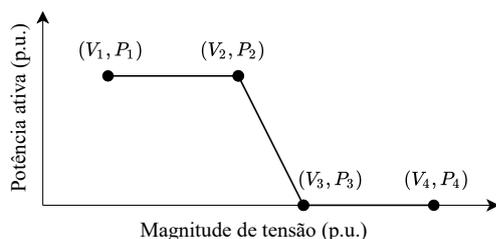


Figura 2. Curva da função de controle Volt-Watt.

2.4 Métricas de desempenho

Para avaliar e comparar o papel das funções de controle dos inversores inteligentes na regulação da tensão da rede de distribuição são escolhidas as seguintes métricas: tensões máxima (V_{max}) e mínima (V_{min}), desvio de tensão (σ) dado por (1) e a faixa de tensão (δ) calculada conforme (2).

$$\sigma = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \sum_{\phi=1}^{\Phi} |1 - V_{\phi,n,t}| \quad (1)$$

sendo $V_{\phi,n,t}$ a magnitude da tensão na fase ϕ da barra n no instante t ; T corresponde a quantidade de passos de tempo do período analisado; N é o número de barras da rede; e Φ é o número de fases da barra n .

$$\delta = V_{max} - V_{min} \quad (2)$$

sendo V_{max} e V_{min} os valores máximo e mínimo da tensão do alimentador no tempo de simulação.

No Brasil, o módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) regulamenta a faixa adequada de tensão entre 0,93 e 1,05 p.u. para tensão nominal entre 1 e 69 kV. Porém neste trabalho, utiliza-se o padrão de tensão ANSI C84.1-2016, que especifica que as tensões do sistema estejam dentro de $\pm 5\%$ do valor nominal em condições normais de operação.

3. MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Para avaliar o impacto das novas funções de controle dos inversores inteligentes foi escolhido o *software* OpenDSS (Dugan and McDermott, 2011). Esta ferramenta de simulação é de código aberto e permite analisar a integração de recursos distribuídos e a modernização e automação das redes de distribuição de energia elétrica. O OpenDSS é um *software* de análise de *Smart Grids*, em que os sistemas fotovoltaicos são modelados por meio do objeto *PVSystem*, que inclui o painel fotovoltaico e o inversor (Sunderman et al., 2014). O objeto *InvControl* é o elemento de controle que permite modelar as funcionalidades dos inversores inteligentes, incluindo as três funções de controle abordadas neste trabalho. Destaca-se que o OpenDSS modela os elementos de controle separadamente dos dispositivos elétricos. Por exemplo, o objeto *CapControl* que modela o controle do capacitor é separado do objeto que modela o capacitor.

3.1 Criação do modelo da rede de distribuição

A fonte de dados para construir o modelo da rede é o sistema de informação geográfica (SIG). No *software* ArcGIS da concessionária “Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.” (CENTROSUR) de Equador, se dispõe informação detalhada da rede, incluindo conectividade desde o início do alimentador até o consumidor e identificação de fases. Todos esses dados são levados para o *Python*. A topologia e informações da rede de distribuição de energia elétrica podem ser representadas por meio de grafos. Um grafo é um conjunto de vértices (ou nós) que estão interligados por arestas (ou arcos). Normalmente, toda barra da rede pode ser representada por um vértice e cada ramo (linha

ou equipamento em série) é considerado como uma aresta. Já no *Python*, por meio do API *NetworkX* e a partir da informação da rede, cria-se um grafo com o intuito de aproveitar suas funcionalidades e flexibilidade. Finalmente, a partir da estrutura de grafo o processo de construção do modelo da rede é mais rápido, simples e direto.

Neste trabalho, o OpenDSS é controlado pelo *Python* por meio da interface *direct-call* DLL. O *Python* permite controlar e automatizar as simulações realizadas no OpenDSS. Uma das vantagens de usar ambas as ferramentas é que são de código aberto. O framework de simulação empregado é mostrado na Figura 3. No *Python* cria-se o modelo da rede de distribuição, lê-se os dados de entrada como os perfis de carga e geração, criam-se os estudos de caso e se realiza a análise e visualização dos resultados. O OpenDSS gera os resultados de tensão e potências a partir da simulação de fluxos de potência.



Figura 3. Framework de simulação.

3.2 Fluxo de potência via séries temporais

Os impactos de altas penetrações de instalações fotovoltaicas devem ser estudados usando uma análise variável no tempo, que captura as interações entre carga, geração e equipamentos de controle que são difíceis de prever usando uma análise em um único ponto no tempo (Seguin et al., 2016). Portanto, para avaliar o impacto dos controles dos inversores inteligentes nas redes de distribuição, é necessário realizar análises temporais que considerem os seguintes itens: as funcionalidades dos inversores inteligentes; a intermitência dos REDs; e a variabilidade das cargas. Desta forma, devem-se realizar simulações do fluxo de potência via séries temporais (Zambrano-Asanza et al., 2019).

4. REDE DE DISTRIBUIÇÃO

A rede de distribuição utilizada neste trabalho é o alimentador 0427 pertencente à concessionária CENTROSUR, que está localizada em Cuenca- Equador. Este alimentador de média tensão, mostrado na Figura 4, opera a 22 kV, tem um comprimento máximo de 25 km aproximadamente e possui uma demanda máxima de 4,5 MW. O alimentador não possui equipamentos de regulação de tensão, pois ele opera dentro de um perfil de tensão adequado. O local da usina solar fotovoltaica (Figura 4) é escolhido baseado em um mapa de decisão que permite identificar locais ideais para usinas fotovoltaicas, conforme mostrado em Zambrano-Asanza et al. (2021). No Equador há uma tendência de instalar um ou dois SFVs em alguns alimentadores de distribuição de média tensão com capacidades entre 1 e 5 MW, este tipo de usinas são conhecidas na literatura como SFVs *utility-scale*.

Na Figura 5, mostram-se os perfis reais em p.u. da demanda do alimentador e de geração de um SFV para

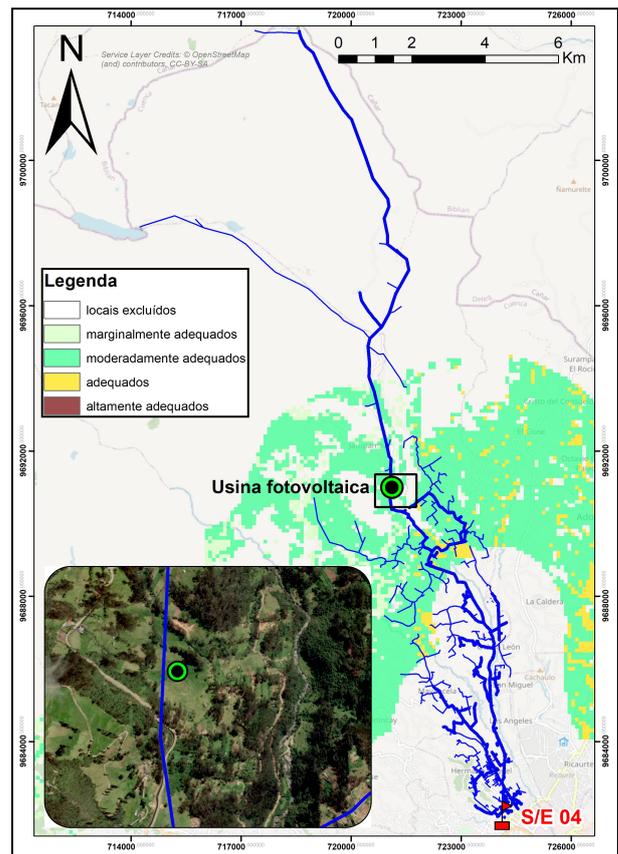


Figura 4. Topologia do alimentador 0427 e mapa de locais ideais para o SFV (Zambrano-Asanza et al., 2021).

um dia de operação com um passo de tempo de cinco minutos. O perfil de demanda é no dia em que houve máxima demanda do alimentador. Os valores de geração correspondem às medições fornecidas pela concessionária no dia de máxima potência ativa injetada por um SFV existente. Nota-se que o alimentador apresenta um perfil de demanda típico de consumidores residenciais, uma vez que o pico de carga acontece no período da noite entre as 18:00 a 20:00 horas.

5. RESULTADOS

Uma vez que o objetivo de uma análise QSTS é investigar ou avaliar a operação do sistema de distribuição durante um período de tempo, é importante que o carregamento do sistema de distribuição seja o mais realista possível (Mather, 2012). Para tal propósito, emprega-se um algoritmo de alocação de carga que é um processo iterativo capaz de atribuir valores às cargas da rede baseado nos valores de potência nominal das cargas e nas medições de potências ativa e reativa no início do alimentador de distribuição. Nesse processo de ajuste, executam-se fluxos de potência, considerando perdas tanto nas linhas quanto nos transformadores de distribuição (Zambrano et al., 2018).

5.1 Níveis de penetração de geração fotovoltaica

A fim de analisar a atuação das funções de controle do inversor inteligente são definidos três cenários que utilizam uma função de controle diferente. No primeiro, o inversor

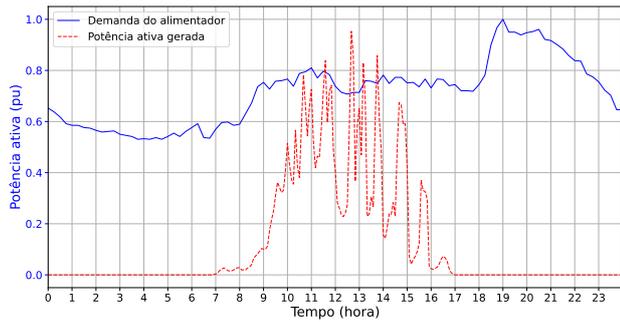


Figura 5. Perfis de demanda do alimentador e de potência ativa gerada pelo SFV.

fotovoltaico opera com um FP fixo de 0,95 adiantado. No segundo cenário, ativa-se a função de controle Volt-Var no inversor do sistema fotovoltaico. Finalmente, o cenário três apresenta a atuação do controle Volt-Watt. Em cada cenário, são avaliados 11 níveis de penetração de geração fotovoltaica e simulam-se fluxos de potência levando em conta as medições de potências no início do alimentador e injeção de potência ativa da usina fotovoltaica. O período de simulação considerado é desde as 8:00 até as 17:00 horas com uma resolução de cinco minutos, ou seja, durante nove horas de operação ($T = 108$). Escolhe-se este tempo de simulação pois é quando há maiores valores de radiação. Portanto, a geração de energia solar fotovoltaica é a máxima (veja Figura 5) provocando um aumento na magnitude de tensão nas barras. Em cada cenário, executam-se 108 fluxos, resultando em um total de 432 fluxos de potência nos três cenários. Para obter cada nível de penetração, a capacidade do SFV é variada na faixa de 2 a 7 MW com incrementos de 0,5 MW. Os ajustes das funções VVC e VWC utilizadas, são as mesmas de Sunderman et al. (2014), cujos pontos de ajuste em p.u. são $V_1 = 0,5$, $V_2 = 0,95$, $V_3 = 1,05$, $V_4 = 1,5$, $Q_1 = Q_2 = 1$ e $Q_3 = Q_4 = -1$ para a função VVC; e $V_1 = 0$, $V_2 = 1$, $V_3 = 1,1$, $V_4 = 2$, $P_1 = P_2 = 1$ e $P_3 = P_4 = 0$ para o VWC.

Na Figura 6, mostram-se os diagramas de caixa (*boxplots*) das tensões nas barras de todo o alimentador (eixo y) para cada nível de penetração de geração fotovoltaica (eixo x). Observa-se na Figura 6(a) que o valor mínimo da tensão para cada nível de penetração é aproximadamente 0,989 p.u. A partir de uma capacidade do SFV de 5 MW, a tensão supera o limite máximo permitido (1,05 p.u.). Nota-se que no ultimo nível de penetração o valor de tensão se aproxima a 1,08 p.u. Na Figura 6(b), quando o controle Volt-Var é ativado, em todos os níveis de penetração as tensões estão abaixo de 1,05 p.u. Quando o SFV possui uma capacidade de 7 MW o valor máximo de tensão é 1,032 p.u., além disso, a tensão mínima está acima de 0,99 p.u. em todos os níveis de penetração. Já no cenário três (função VWC), apresentada nos *boxplots* da Figura 6(c) as tensões estão dentro da faixa adequada e no nível de maior capacidade do SFV o valor máximo da tensão é 1,034 p.u. Dessa forma, conclui-se que as funções VVC e VWC fornecem uma melhor regulação de tensão, dado que, apresentam valores da tensão máxima abaixo do limite permitido. Verifica-se que os controles dos inversores inteligentes de SFVs permitem incrementar a capacidade

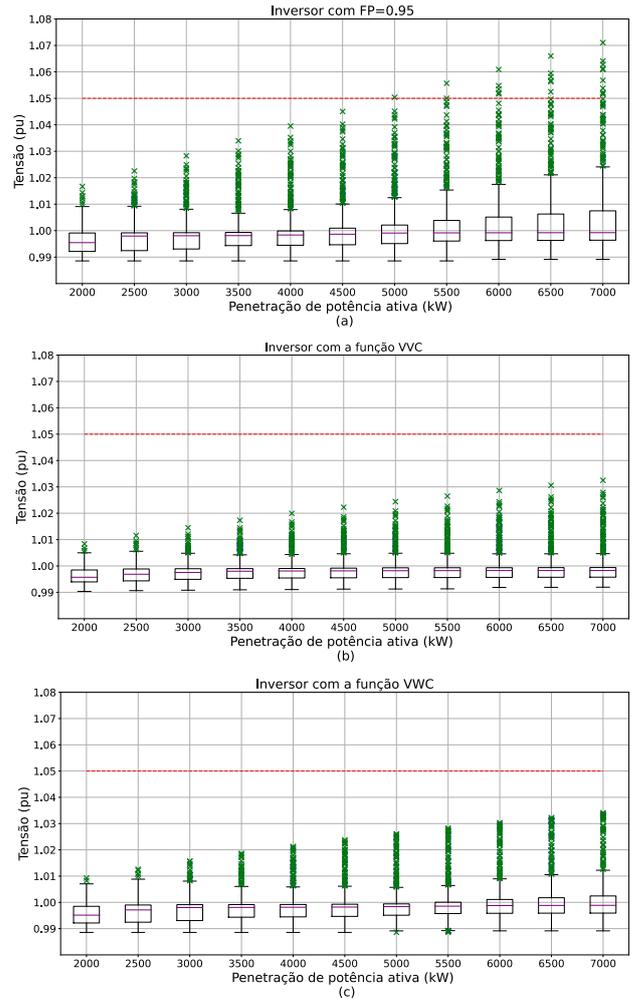


Figura 6. Diagramas de caixa das tensões: (a) cenário 1, (b) cenário 2 e (c) cenário 3.

de geração fotovoltaica em uma rede de distribuição sem superar o limites predefinidos de qualidade de energia.

5.2 Perfis de tensão

Para analisar o perfil de tensão do alimentador, simulam-se fluxos de potência na rede durante sete dias de operação com um passo de tempo de cinco minutos ($T = 216$). Consideram-se os seguintes quatro casos. No primeiro caso que é o caso base, o alimentador de distribuição opera sem a presença de SFVs. Para os três casos restantes é incorporado um gerador fotovoltaico de 5 MW na rede. O segundo caso considera que o inversor do SFV opera com um FP de 0,95 adiantado. No terceiro caso ativa-se a função VVC do inversor inteligente. Finalmente, o caso quatro apresenta a atuação da função VWC. Nesta análise, executam-se um total de $(12 \times 24 \times 7 \times 4)$ 8064 fluxos de potência. Com o intuito de avaliar e comparar a regulação de tensão do alimentador de distribuição, obtêm-se as métricas de desempenho para todos os casos.

Na Figura 7, mostram-se os perfis de tensão para cada caso. O perfil é determinado mediante os valores das tensões das fases nas barras em função da sua distância desde a subestação. Dado que são muitos valores de tensões nas barras, determina-se os valores dos quartis

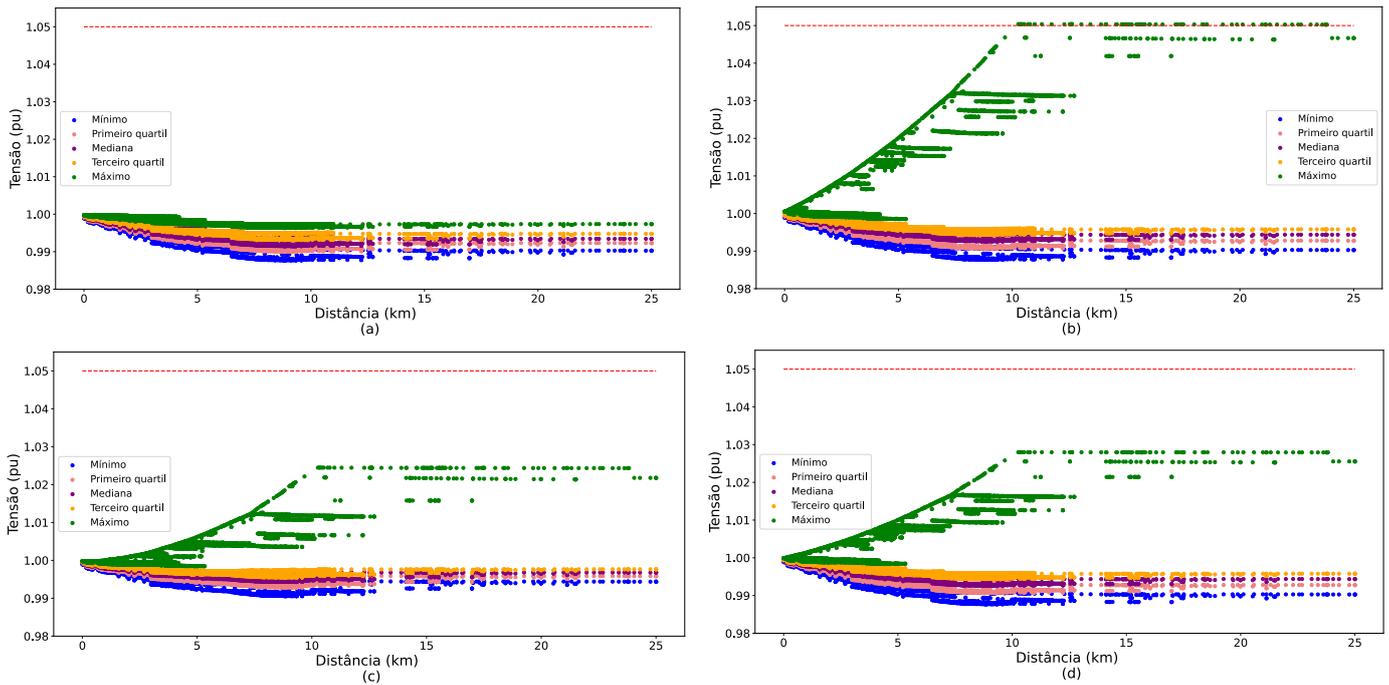


Figura 7. Perfis de tensão ao longo do alimentador: (a) caso base, (b) caso 2, (c) caso 3 e (d) caso 4.

em cada barra. Dessa forma, obtêm-se cinco valores em cada barra da rede que são: mínimo, primeiro quartil, mediana, terceiro quartil e máximo. Nota-se que na Figura 7(a), (c) e (d) o perfil de tensão está dentro dos limites permitidos, quer dizer, a rede não apresenta problemas de sobretensão nem subtensão. A Figura 7(a) mostra que o alimentador tem um perfil de tensão adequado, já que não possui problemas de subtensão. No perfil de tensão para o segundo caso (Figura 7(b)), a tensão máxima está ligeiramente por acima de 1,05 p.u., em vista disso, existem problemas de sobretensão em algumas barras que são corrigidos quando são ativadas as funções VVC e VWC do inversor. Na Figura 7(b), (c) e (d), observa-se que os valores máximos de tensão aumentam até o local do SFV que está localizado a 10,2 km aproximadamente da subestação e a partir dessa distância as tensões máximas tendem a diminuir.

A Tabela 1 mostra as métricas de cada caso. Nota-se que o primeiro caso apresenta os menores valores de tensão máxima e faixa de tensão, devido ao fato que nesse caso não tem um SFV conectado à rede. Por tanto, as tensões nas barras variam dentro de uma faixa de valores pequena. Os maiores valores de tensão máxima e faixa de tensão estão no segundo caso, já que neste caso o SFV opera com um FP constante e não existe nenhum controle direto de tensão. O terceiro caso apresenta os melhores valores na tensão mínima e no desvio da tensão, dado que o inversor ajusta a potência reativa em função da tensão no ponto de conexão. Os casos 1, 2 e 4 tem o mesmo valor da tensão mínima. Considerando apenas os casos com presença de geração fotovoltaica, a função VVC possui os melhores valores para todas as métricas avaliadas. Dessa forma, para as condições de teste descritas e as configurações de controle analisadas, conclui-se que a função VVC fornece uma melhor regulação de tensão da rede. Porém, a escolha da melhor função de controle e seus ajustes é uma tarefa

complexa que depende de muitos fatores como: capacidade (nível de penetração) e localizações dos SFVs, topologia da rede, relação X/R e a capacidade dos inversores (Smith et al., 2011; Sunderman et al., 2014; Radatz et al., 2019).

Tabela 1. Métricas obtidas em cada caso.

Caso	Controle	V_{max} (p.u.)	V_{min} (p.u.)	σ (p.u.)	δ (p.u.)
1 (base)	—	1*	0,988	419991	0,012*
2	FP=0,95	1,05	0,988	419405	0,063
3	VVC	1,024	0,991*	404430*	0,034
4	VWC	1,028	0,988	415526	0,04

* Melhores valores para cada métrica.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi avaliado o impacto de três funções de controle de inversores inteligentes: fator de potência fixo; Volt-VAR; e Volt-Watt, no suporte da regulação de tensão de uma rede de distribuição real. Nas simulações e análises realizadas, verifica-se que as funcionalidades dos inversores permitem aumentar a quantidade de geração fotovoltaica que pode ser conectada à rede. Ademais, esses controles melhoram o perfil de tensão e mitigam as sobretensões que podem existir nos períodos de maior irradiação solar e demanda leve. Os resultados mostraram que a função de controle Volt-VAR fornece melhores resultados nas condições de teste escolhidas, já que exibe valores mais adequados nas métricas de desempenho utilizadas para avaliar a regulação de tensão.

Para determinar o melhor controle dos inversores, devem-se realizar estudos de interconexão que avaliem e quantifiquem os impactos da inserção de usinas fotovoltaicas no sistema de distribuição. Uma pesquisa complementar

seria encontrar os melhores pontos de ajuste da função de controle para determinar a configuração (curva) ideal mediante uma técnica de otimização. Um trabalho futuro é incorporar e coordenar as funcionalidades do inversor inteligente no controle Volt/VAR do alimentador de distribuição, considerando dispositivos tradicionais de controle de tensão e as novas tecnologias de *Smart Grid*.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com suporte financeiro através dos processos nº 2015/21972-6 e 2019/07436-5 concedido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), e com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001. Os autores agradecem à CENTROSUR, concessionária de distribuição elétrica do Equador, pelas informações fornecidas e pelo apoio colaborativo.

REFERÊNCIAS

- Borlase, S. (2017). *Smart grids: Advanced technologies and solutions*. CRC press.
- Ding, F., Zhang, Y., Simpson, J., Bernstein, A., and Vardari, S. (2020). Optimal energy dispatch of distributed pvs for the next generation of distribution management systems. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, 7, 287–295.
- Dugan, R.C. and McDermott, T.E. (2011). An open source platform for collaborating on smart grid research. In *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1–7. doi:10.1109/PES.2011.6039829.
- EPRI (2017). Voltage regulation support from smart inverters. Technical report, Electric Power Research Institute.
- Freitas, P.R.R.d. (2019). *Impacto de funções inteligentes de inversores de sistemas fotovoltaicos na operação de redes de distribuição de energia elétrica*. Master's thesis, Universidade de São Paulo.
- IEEE (2018). IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces. *IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003)*, 1–138. doi:10.1109/IEEESTD.2018.8332112.
- Kraczy, M., York, B., Bello, M., Montenegro, D., Akagi, S., and Braun, M. (2018). Coordinating smart inverters with advanced distribution voltage control strategies. In *2018 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*, 1–5. doi:10.1109/PESGM.2018.8586333.
- Mather, B.A. (2012). Quasi-static time-series test feeder for pv integration analysis on distribution systems. In *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1–8. doi:10.1109/PESGM.2012.6345414.
- Padullaparti, H.V., Ganta, N., and Santoso, S. (2018). Voltage regulation at grid edge: Tuning of pv smart inverter control. In *2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T D)*, 1–5. doi:10.1109/TDC.2018.8440335.
- Parajeles, M., Quirós-Tortós, J., and Valverde, G. (2017). Assessing the performance of smart inverters in large-scale distribution networks with pv systems. In *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, 1–6. doi:10.1109/ISGT-LA.2017.8126752.
- Radatz, P., Rocha, C., Rylander, M., Smith, J., and Kagan, N. (2019). Distribution impacts using a mix of smart inverter functions on a high penetration pv feeder. In *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, 1–6. doi:10.1109/ISGT-LA.2019.8895286.
- Rahimi, K., Tbaileh, A., Broadwater, R., Woyak, J., and Dilek, M. (2017). Voltage regulation performance of smart inverters: Power factor versus volt-var control. In *2017 North American Power Symposium (NAPS)*, 1–6. doi:10.1109/NAPS.2017.8107407.
- Rylander, M., Reno, M.J., Quiroz, J.E., Ding, F., Li, H., Broderick, R.J., Mather, B., and Smith, J. (2016). Methods to determine recommended feeder-wide advanced inverter settings for improving distribution system performance. In *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 1393–1398. doi:10.1109/PVSC.2016.7749843.
- Seguin, R., Woyak, J., Costyk, D., Hambrick, J., and Mather, B. (2016). High-penetration pv integration handbook for distribution engineers. Technical report, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Smith, J.W., Sunderman, W., Dugan, R., and Seal, B. (2011). Smart inverter volt/var control functions for high penetration of pv on distribution systems. In *2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, 1–6. doi:10.1109/PSCE.2011.5772598.
- Sunderman, W., Dugan, R.C., and Smith, J. (2014). Open source modeling of advanced inverter functions for solar photovoltaic installations. In *2014 IEEE PES T D Conference and Exposition*, 1–5. doi:10.1109/TDC.2014.6863399.
- Walling, R.A., Saint, R., Dugan, R.C., Burke, J., and Kojovic, L.A. (2008). Summary of distributed resources impact on power delivery systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(3), 1636–1644. doi:10.1109/TPWRD.2007.909115.
- Zambrano, S., Jaramillo, B., Cárdenas, J., Mejía, M., Padilha-Feltrin, A., and Melo, J. (2018). Análisis espacio temporal del impacto al sistema de distribución de nuevos tipos de carga con alto consumo de energía: Caso de estudio en centrosur con la cocina de inducción. *Revista Técnica “energía”*, 14(1), 101–109.
- Zambrano-Asanza, S., Quiros-Tortos, J., and Franco, J.F. (2021). Optimal site selection for photovoltaic power plants using a gis-based multi-criteria decision making and spatial overlay with electric load. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110853.
- Zambrano-Asanza, S., Zalamea-León, E.F., Barragán-Escandón, E.A., and Parra-González, A. (2019). Urban photovoltaic potential estimation based on architectural conditions, production-demand matching, storage and the incorporation of new eco-efficient loads. *Renewable Energy*, 142, 224–238.