

Regulação de tensão em subestações de distribuição de energia elétrica usando lógica *Fuzzy*

Luis Fernando Silvestre Montoro

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), São João da Boa Vista, SP, Brasil

Tiago Soares Vitor, Dr.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), São João da Boa Vista, SP, Brasil

Resumo: Este projeto visa a desenvolver um sistema inteligente para lidar com as variações indesejáveis de tensão que podem ocorrer com a inserção de geradores, baseados em fontes renováveis, nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Em geral, tais recursos energéticos apresentam característica intermitente do perfil de geração que pode potencialmente afetar a tensão, causando a violação dos níveis de tensão permitidos por agências reguladoras. Tradicionalmente, a regulação de tensão é feita através do método chamado de compensação de queda na linha (LDC) que não foi projetado para lidar com a crescente penetração de geração distribuída na rede. Diante destes novos desafios, este trabalho propõe um sistema inteligente, baseado em Lógica *Fuzzy*, que atua de forma automática no transformador da subestação de distribuição visando a melhorar o perfil de tensão do sistema, mesmo diante da conexão de geradores distribuídos. Um sistema elétrico de 13 barras foi utilizado como base para simulações. Como resultado, o controlador *Fuzzy* desenvolvido foi capaz de reduzir eficientemente o número de violações de tensão numa operação diária, melhorando o perfil de tensão do sistema, mesmo com a presença de geração distribuída.

Palavras-chave: Regulação de tensão. Lógica *Fuzzy*. Geração distribuída.

Abstract: This project aims to develop an intelligent system to deal with the undesirable voltage variations that can occur with the insertion of generators, based on renewable sources, in the electrical distribution systems. In general, such energy resources present an intermittent characteristic of the generation profile that can potentially affect the voltage, causing the violation of the permitted voltage levels. Traditionally, voltage regulation is done through a method called line drop compensation (LDC) which is not designed to handle the increasing penetration of distributed generation in the grid. Faced with these new challenges, this work proposes an intelligent system, based on *Fuzzy*

Logic, that acts automatically on the distribution substation transformer in order to improve the voltage profile of the system, even when connecting distributed generators. A system with 13 buses was used as a basis for simulations. As a result, the developed *Fuzzy* controller was able to efficiently reduce the number of voltage violations in a daily operation, improving the voltage profile of the system, even with the presence of distributed generation.

Keywords: *Voltage regulation. Fuzzy Logic. Distributed generation.*

INTRODUÇÃO

A qualidade do fornecimento de energia elétrica como um produto a ser consumido é caracterizada pelo estabelecimento de parâmetros e valores de referência que avaliam fenômenos relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão (ANEEL, 2021). Para assegurar essa qualidade, as concessionárias de energia elétrica dispõem de técnicas, auxiliadas por equipamentos atuadores e instrumentos de medição, que trabalham em diferentes níveis de comunicação e processamento de informações.

Especificamente, a conformidade de tensão é o fenômeno elétrico em que as concessionárias precisam regular os níveis da tensão seguindo padrões de qualidade regulatória. Como exemplo, o padrão internacional ANSI estabelece a variação entre 0,95 e 1,05 p.u. (por unidade) para assegurar níveis aceitáveis (NEMA, 2020). Convencionalmente, as concessionárias utilizam o método chamado de compensação de queda na linha (LDC) para realizar a regulação de tensão em um determinado centro de carga, empregando controladores e medidores locais (FELBER, 2010; SARIMUTHU *et al.*, 2016). Este método apresenta bons resultados em sistemas de distribuição projetados para tal, isto é, para apenas distribuir energia elétrica.

Entretanto, com o crescente aumento do uso de geradores distribuídos (GDs) – geradores conectados às redes de distribuição – baseados em energias renováveis, novos problemas têm surgido, desafiando métodos convencionais de regulação de tensão. Tais geradores apresentam características intermitentes do perfil de produção de energia elétrica, podendo causar variações indesejáveis nos níveis de tensão permitidos e sobretensões nas regiões de conexão (SU, 2010). Esses efeitos devem ser mitigados, uma vez que equipamentos e sistemas de consumidores são projetados para trabalhar em valores de tensões nominais para que não haja queima, mal

funcionamento e redução da vida útil.

Com esta nova perspectiva, onde a GD é peça chave para a sustentabilidade e geração de energia limpa (LUCCHESI, 2018), faz-se necessário o desenvolvimento de métodos que sejam capazes de melhorar o perfil de tensão em face destes cenários em que a DG é cada vez mais presente. Também, com o processo de modernização dos sistemas elétricos, espera-se que técnicas mais avançadas de regulação de tensão sejam desenvolvidas e implementadas (VITOR *et al.*, 2020).

Neste sentido, propõe-se neste trabalho o projeto de um sistema inteligente baseado na Lógica *Fuzzy* que atue de forma automática no transformador da subestação, visando à regulação de tensão robusta e eficiente para lidar com diferentes índices de penetrações de GD, melhorando o perfil de tensão do sistema de distribuição. Este sistema inteligente é desenvolvido em um ambiente que simula a operação do sistema elétrico (isto é, fluxo de potência) em constante interação com *scripts* de programação que implementam o controlador *Fuzzy*, enviando comandos de atuação para o sistema elétrico e fazendo leituras das respostas. Os *softwares* utilizados são o OpenDSS, *software* empregado em estudos e análises de redes de distribuição, e o ambiente de desenvolvimento integrado PyCharm, em linguagem Python, sendo que a comunicação entre os sistemas é realizada pela porta COM. O sistema elétrico base utilizado é o sistema 13 barras do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), sendo os consumidores modelados por curvas de carga residenciais. Simulações são feitas para análise dos impactos da geração distribuída no perfil de tensão e validação da eficiência do controlador *Fuzzy* em comparação ao controlador convencional através de diferentes cenários de GD.

REFERENCIAL TEÓRICO

O controle inteligente baseado em lógica *Fuzzy* tem grande potencial de aplicação nos sistemas elétricos de potência devido à sua capacidade de lidar com informações vagas e imprecisas inerentes à complexidade destes sistemas (SPATTI *et al.*, 2010). As vantagens do uso da lógica *Fuzzy* incluem: linguagem simples e natural, capacidade de lidar com objetivos conflitantes, tolerância a dados imprecisos e ambiguidades e controle baseado em raciocínio aproximado (BANSAL, 2003). Várias aplicações promissoras e bem-sucedidas na solução de problemas dos sistemas elétricos já haviam sido desenvolvidas no final século 20 (BREMERMANN, 2008).

No entanto, especificamente para os sistemas elétricos de distribuição, as

demandas do século 21 (uso de fontes renováveis de energia, crescimento do consumo de energia elétrica, atenção à eficiência energética e resposta da demanda) trouxeram um grande interesse na melhoria destes sistemas com foco nas redes inteligentes (HEYDT, 2010). Conseqüentemente, a integração de unidades de GD se torna crescente, alterando os sistemas de distribuição de suas estruturas passivas, para os quais foram projetados, para ativas. Em outras palavras, o fluxo de potência do sentido subestação para carga (unidirecional) passa a ser bidirecional. Sem dúvidas, essa transição representa muitos desafios, principalmente para a regulação da tensão, acompanhados da alta penetração de fontes renováveis de energia (AZZOUZ; FARAG; EL-SAADANY, 2017).

Como exemplo, a capacidade em geração própria de GD no Brasil alcançou a marca de 14 GW em 2022 de energia limpa e renovável, a mesma potência instalada da usina de Itaipu – a maior hidrelétrica em operação no Brasil, graças ao seu crescimento acelerado nestes últimos anos (ABGD, 2022). No entanto, a GD baseada em fontes de energia renováveis (energia eólica e solar) é de natureza intermitente, podendo alterar significativamente o perfil de tensão do sistema e, assim, degradar a qualidade do seu fornecimento (SU, 2010). Portanto, é crucial manter a tensão próxima ao valor nominal em todo o sistema de potência a fim de que os equipamentos elétricos presentes na rede possam operar adequadamente e tenham uma vida útil compatível com a que foram projetados (FELBER *et al.*, 2010). Além do mais, um controle adequado da tensão poderá reduzir as perdas e aumentar a eficiência do sistema e diminuir o custo de geração de energia (PAL; NATH, 2010).

Com o objetivo de atender aos níveis adequados de tensão, equipamentos dedicados para a regulação de tensão (chamados reguladores de tensão) são usados em sistemas de distribuição. Sem dúvidas, a forma mais importante consiste no controle da tensão que é realizado no barramento de média tensão (barramento secundário) da subestação através da troca de *tap* do transformador de potência (SPATTI *et al.*, 2010). O ajuste da posição do *tap* altera fisicamente a relação do transformador (o número de voltas em um enrolamento) para efetuar a regulação de tensão (SARIMUTHU *et al.*, 2016).

O controle automático da tensão é governado pelo relé de controle de tensão (AVC), que é responsável por atuar no comutador de *tap* do regulador de tensão para que este aumente ou diminua a tensão no secundário do transformador. Convencionalmente, o AVC é ajustado para compensar a queda de tensão ao longo

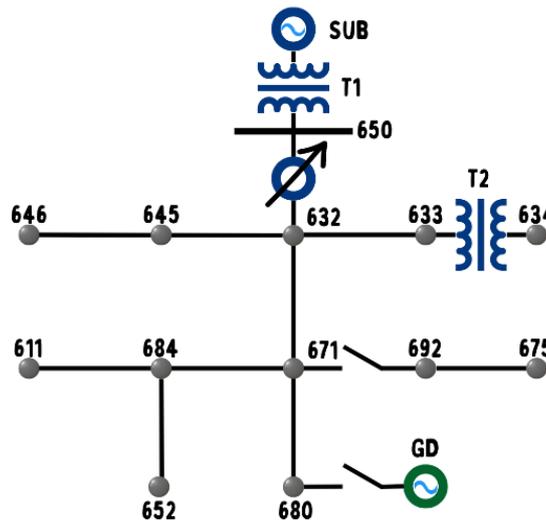
do alimentador para evitar que a tensão ultrapasse o limite de tensão inferior e não exceda o limite de tensão superior (SALMAN; WAN, 2007a). Geralmente, isso é feito através da metodologia LDC que simula a queda de tensão existente entre o terminal do transformador e o centro de carga, utilizando os parâmetros de resistência R e reatância X da linha, fazendo com que o regulador compense essa queda de tensão de tal modo a manter um nível de tensão correto no centro de carga (FELBER, 2010; SARIMUTHU *et al.*, 2016).

Alternativamente aos controladores tradicionais, controladores de tensão baseados em lógica *Fuzzy* foram reportados na literatura apresentando resultados satisfatórios e melhoria da robustez e eficiência do controlador de tensão (PAL; NATH, 2010). Predominantemente, essas aplicações implementam um controlador *Fuzzy* a partir de um sistema de inferência *Fuzzy* do tipo Mamdani, cujo modelo linguístico descreve o sistema por meio de regras linguísticas "se-então" com proposições *Fuzzy* antecedentes e consequentes (SALMAN; WAN, 2007b). Embora as entradas para o controlador *Fuzzy* não sejam uma unanimidade entre os pesquisadores, exceto a tensão que é sempre considerada, a saída do controlador pode ser atribuída como o valor de tensão do relé AVC (SALMAN; WAN, 2007a, 2007b) ou como um sinal de comando para alteração do *tap* do transformador (CHOUKRI *et al.*, 2019; SPATTI *et al.*, 2010). Além do mais, são poucos os trabalhos que levam em consideração a presença de GD (AZZOUZ; FARAG; EL-SAADANY, 2017; SALMAN; WAN, 2007a, 2007b), havendo uma lacuna quanto à capacidade do controlador *Fuzzy* em lidar com a natureza estocástica da GD baseada em fontes renováveis.

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da pesquisa, foi utilizado o sistema de distribuição IEEE 13 barras (IEEE PES, 1991) que apresenta todos os componentes presentes em sistemas de distribuição convencionais, tais como: transformadores trifásicos, regulador de tensão, banco de capacitores, linhas aéreas e subterrâneas e cargas desbalanceadas e distribuídas ao longo do alimentador. O diagrama unifilar do sistema teste pode ser visto na Fig. 1. Este sistema foi modelado no OpenDSS, um *software* capaz de simular diferentes modelos de sistemas elétricos de distribuição, possibilitando análises sobre o modelo, tal como o do fluxo de potência do sistema, juntamente com sua perda total e de cada componente, além de permitir a implementação de novos componentes no circuito.

Figura 1 – Diagrama unifilar do sistema IEEE 13 barras



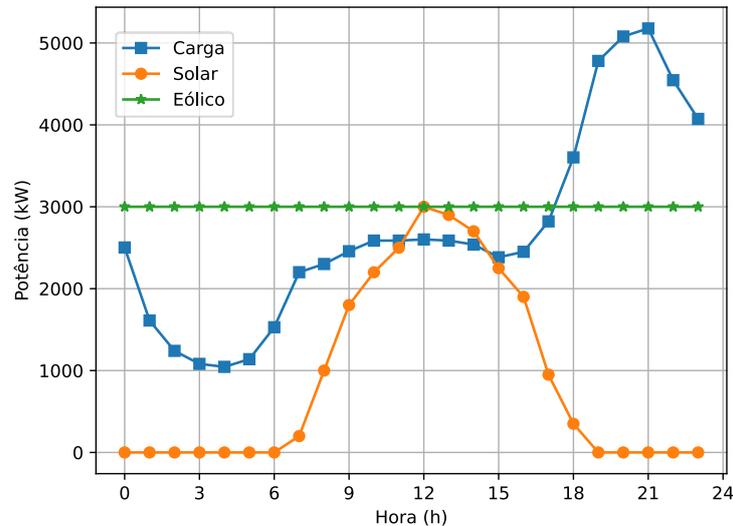
Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Na Fig. 1, as barras estão identificadas numericamente, sendo interligadas pelas linhas (aéreas e subterrâneas). A subestação está localizada na barra 650, onde um transformador de potência reduz a tensão de 115 kV para 4,16 kV. Existem cargas pontuais (em 634, 645, 646, 652, 671, 675, 692 e 611) e cargas distribuídas (entre 632 e 671). O regulador de tensão trifásico está localizado entre as barras 650 e 632. Existe um capacitor trifásico na barra 675 e um capacitor monofásico na barra 611. A chave entre as barras 671 e 692 foi considerada fechada. Entre as barras 633 e 646, existe um transformador que reduz a tensão de 4,16 kV para 0,48 kV.

Para simular a regulação de tensão do sistema, utilizou-se uma curva de carga do tipo residencial, comumente encontrada na literatura (JARDINI *et al.*, 2000). Com ela, foi possível criar um vetor com 24 valores de multiplicadores de carga (*LoadMult*), um para cada hora do dia, modelando o comportamento dos consumidores ao longo do dia.

As simulações foram feitas para o sistema de distribuição em três condições de controle diferentes: a) sem controle algum, b) com controle convencional e c) implementando o controlador *Fuzzy*. Além disso, dois cenários foram considerados: I) a presença de um gerador fotovoltaico de 3.000 kW na barra 680 e II) a presença de um gerador eólico com um regime de produção de 3.000 kW, aproximadamente constante, na barra 680. Na Fig. 2, tem-se os valores de geração ao longo do dia e a curva de carga. Assim, deseja-se verificar condições extremas em termos do perfil de geração: com extensa variação ou nenhuma variação na produção de potência ativa.

Figura 2 – Curvas de carga e geração



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Os geradores foram modelados considerando fator de potência constante, fornecendo apenas potência ativa (fator de potência 1). A potência base de 3.460 kW foi considerada para o sistema.

Foram criadas métricas para analisar em valores a eficiência de cada etapa, são eles: quantidade de violações (QV); magnitude das infrações (Δ_{total}) e limite máximo de aumento de carga para que se inicie as infrações (C_{max}), Equações 1 a 3.

$$QV = \begin{cases} \sum_i^t 1, & v_i^t > v_{max} \\ \sum_i^t 1, & v_i^t < v_{min} \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta_{total} = \begin{cases} \sum_i^t v_i^t - v_{max}, & v_i^t > v_{max} \\ \sum_i^t v_{min} - v_i^t, & v_i^t < v_{min} \end{cases} \quad (2)$$

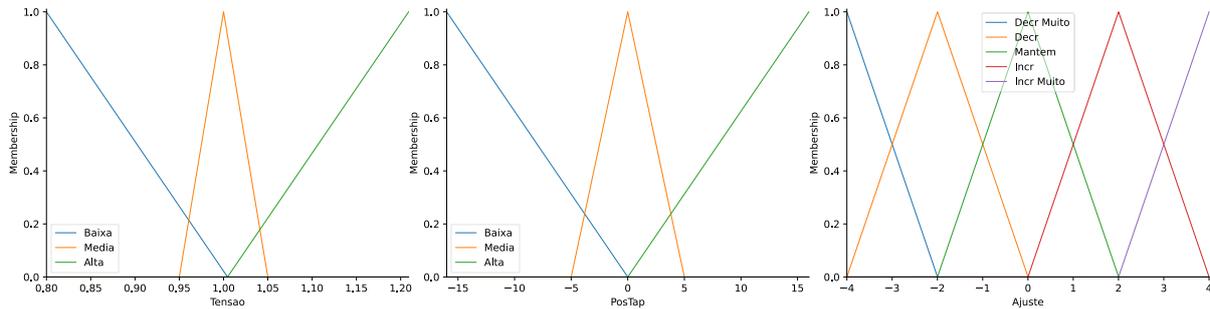
$$C_{max} = \max(\delta^t), \quad v_{min} < v_i^t < v_{max} \quad (3)$$

onde, v_i^t é a tensão no nó i no instante t , v_{min} e v_{max} são os limites permitidos, e δ é a carga no instante t .

O controlador *Fuzzy* projetado, implementado no ambiente PyCharm-Python, considera duas variáveis linguísticas de entrada (tensão e posição do *tap* do transformador) e uma de saída (nível de ajuste necessário para o *tap*). A Fig. 3 mostra os *memberships* construídos para cada variável. Os métodos de inferência e de *defuzzificação* utilizados foram o max-min e o centro de gravidade, respectivamente. As regras *Fuzzy* (Quadro 1) modelam a base de conhecimento de um especialista na

regulação de tensão. Em termos gerais, se a tensão está baixa, deve-se incrementar a posição do tap, do contrário, decrementar.

Figura 3 – Variáveis linguísticas e memberships



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

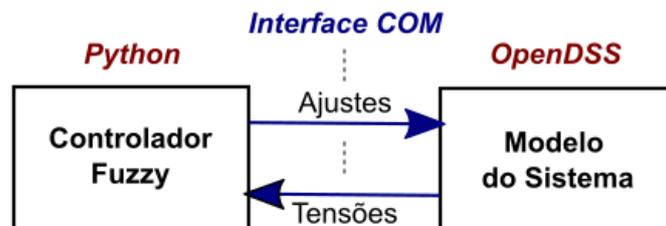
Quadro 1 – Regras do controlador Fuzzy

| REGRA | | TENSÃO | | POSTAP | | AJUSTE |
|-------|----|--------------|---|--------------|-------|-------------------------|
| 1 | Se | <i>Baixa</i> | E | <i>Baixa</i> | Então | <i>Incrementa muito</i> |
| 2 | Se | <i>Baixa</i> | E | <i>Média</i> | Então | <i>Incrementa muito</i> |
| 3 | Se | <i>Baixa</i> | E | <i>Alta</i> | Então | <i>Incrementa</i> |
| 4 | Se | <i>Média</i> | E | <i>Baixa</i> | Então | <i>Mantém</i> |
| 5 | Se | <i>Média</i> | E | <i>Média</i> | Então | <i>Mantém</i> |
| 6 | Se | <i>Média</i> | E | <i>Alta</i> | Então | <i>Mantém</i> |
| 7 | Se | <i>Alta</i> | E | <i>Baixa</i> | Então | <i>Decrementa</i> |
| 8 | Se | <i>Alta</i> | E | <i>Média</i> | Então | <i>Decrementa muito</i> |
| 9 | Se | <i>Alta</i> | E | <i>Alta</i> | Então | <i>Decrementa muito</i> |

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A Fig. 4 ilustra a integração Python-OpenDSS que permite uma arquitetura completa para o desenvolvimento da pesquisa (isto é, modelagem, simulação, análise e validação).

Figura 4 – Integração Python-OpenDSS



1. Recebe grandezas do sistema e status dos dispositivos de controle;
2. Executa o Controlador Fuzzy;
3. Define novos ajustes das variáveis de controle;

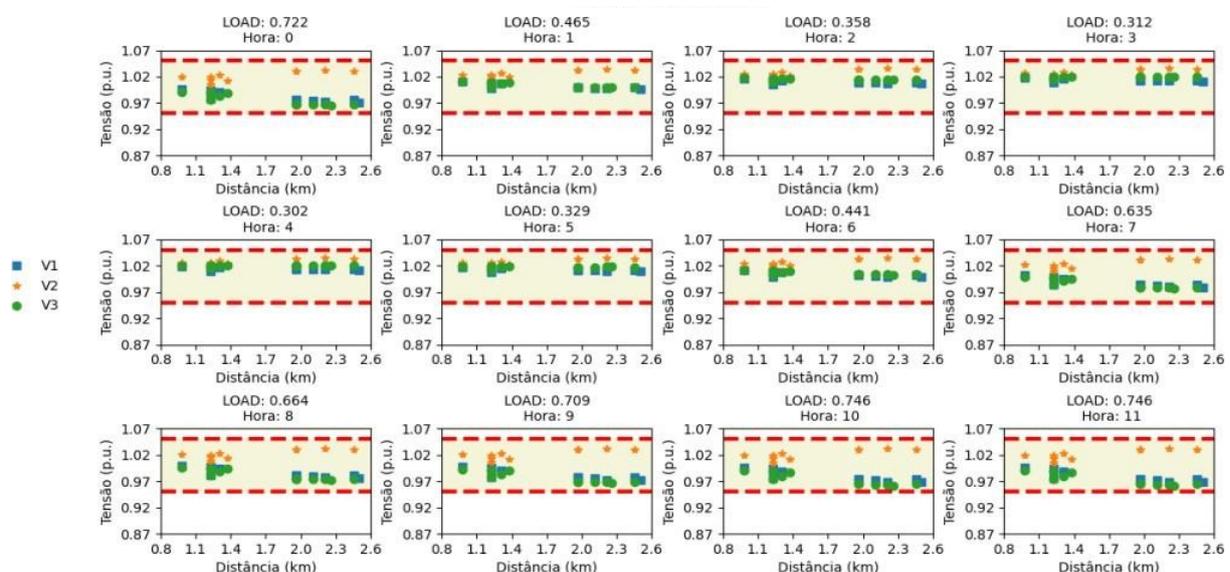
4. Recebe novos ajustes das variáveis de controle;
5. Calcula o fluxo de potência;
6. Envia grandezas do sistema e status dos dispositivos de controle.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, simulações foram feitas para a operação diária do sistema de distribuição sem a presença de GD. Os resultados abrangem as três condições de controle diferentes: sem controle (Fig. 5 e 6), controle convencional (Fig. 7 e 8) e controlador *Fuzzy* (Fig. 9 e 10). Nos gráficos das Fig. 5 a 10, os valores de tensão são apresentados em cada nó, por fase, conforme a distância em relação à subestação. As linhas tracejadas horizontais, cor vermelha, representam os valores máximo e mínimo de tensão permitida, delimitando uma faixa de valores permitidos por norma, em cor amarela. Os marcadores do tipo quadrado (azul), estrela (laranja) e círculo (verde) representam os valores resultantes de tensão nas fases 1, 2 e 3, respectivamente.

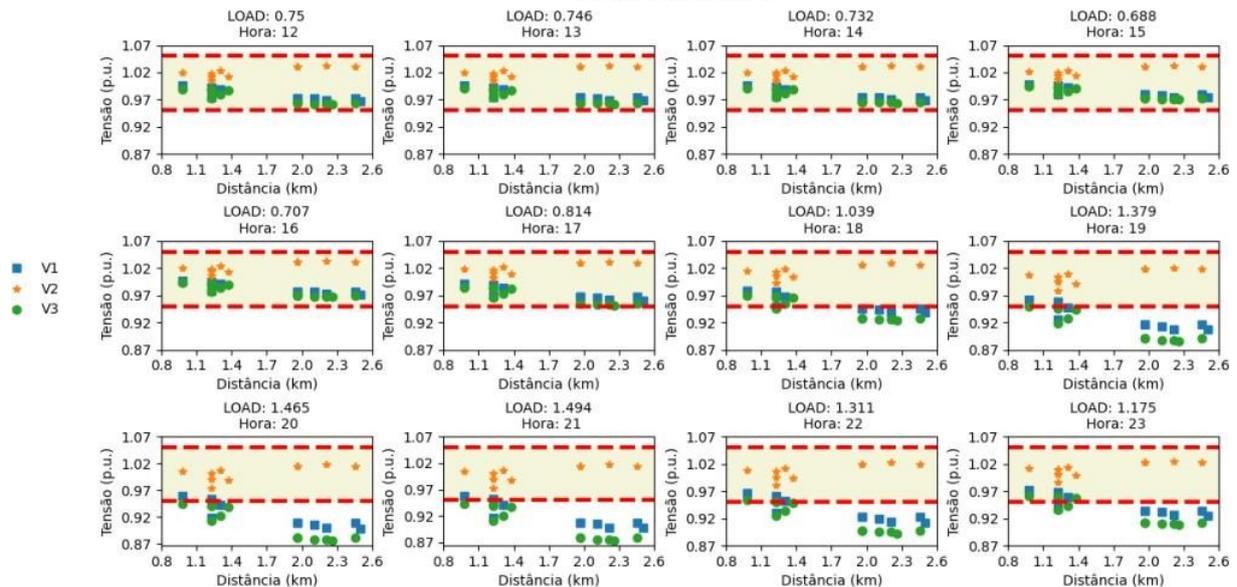
Sem nenhum tipo de controle (Fig. 5 e 6), pode-se constatar que, quando a carga total do sistema ultrapassa o valor de 1,039 p.u., tensões nas fases 1 e 3 infringem o limite inferior de 0,95 p.u., para grande parte dos nós. Logo, em 25% da operação diária (6h) haverá não conformidade da tensão do sistema (subtensão). Um aumento de 3,9% do carregamento em relação ao nominal já se torna limitante para a operação. Uma primeira tentativa de solução, que não é foco deste trabalho, seria redistribuir as cargas de maneira mais equilibrada entre as fases.

Figura 5 – Perfil de tensão – sem controle (0h a 11h)



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

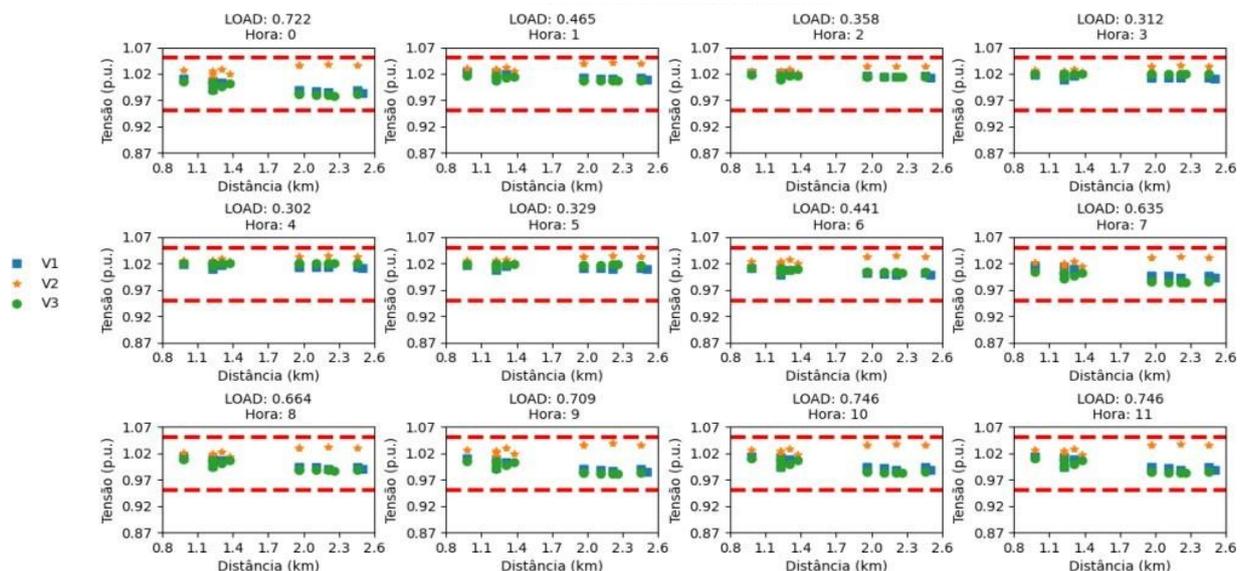
Figura 6 – Perfil de tensão – sem controle (12h a 23h)



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

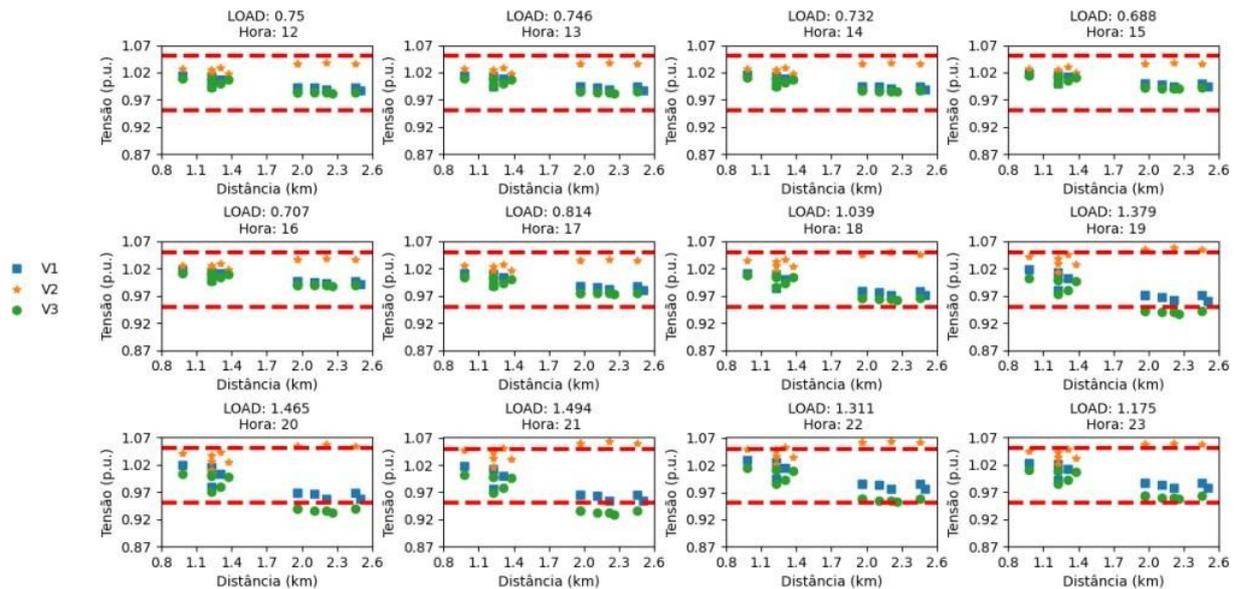
Para o controle convencional LDC (Fig. 7 e 8), note-se que, quando a carga total do sistema ultrapassa 1,379 p.u., a fase 2 começa a infringir o limite superior de 1,05 p.u. para os nós mais distantes. Isso ocorre em 21% do tempo (5h). A subtensão ocorre em alguns nós mais distantes da fase 3, nas horas 19, 20 e 21, quando o carregamento supera 37,9% de aumento. Portanto, o controle convencional apresentou uma melhoria do perfil de tensão em relação à operação do sistema sem a regulação de tensão.

Figura 7 – Perfil de tensão – controle convencional (0h a 11h)



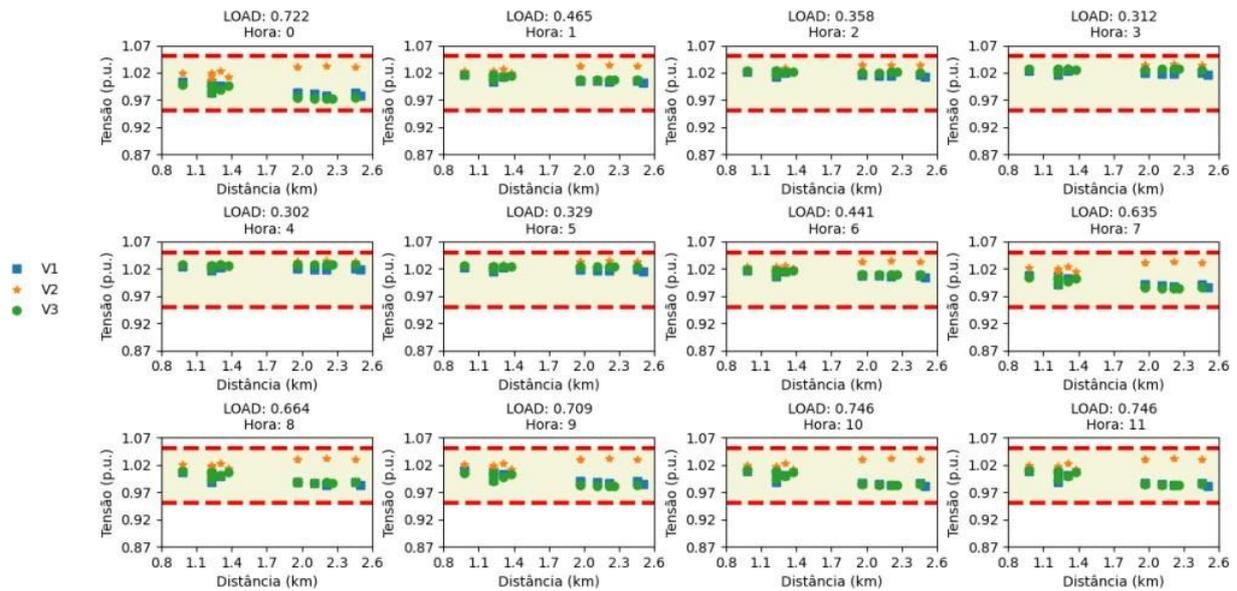
Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Figura 8 – Perfil de tensão – controle convencional (12h a 23h)



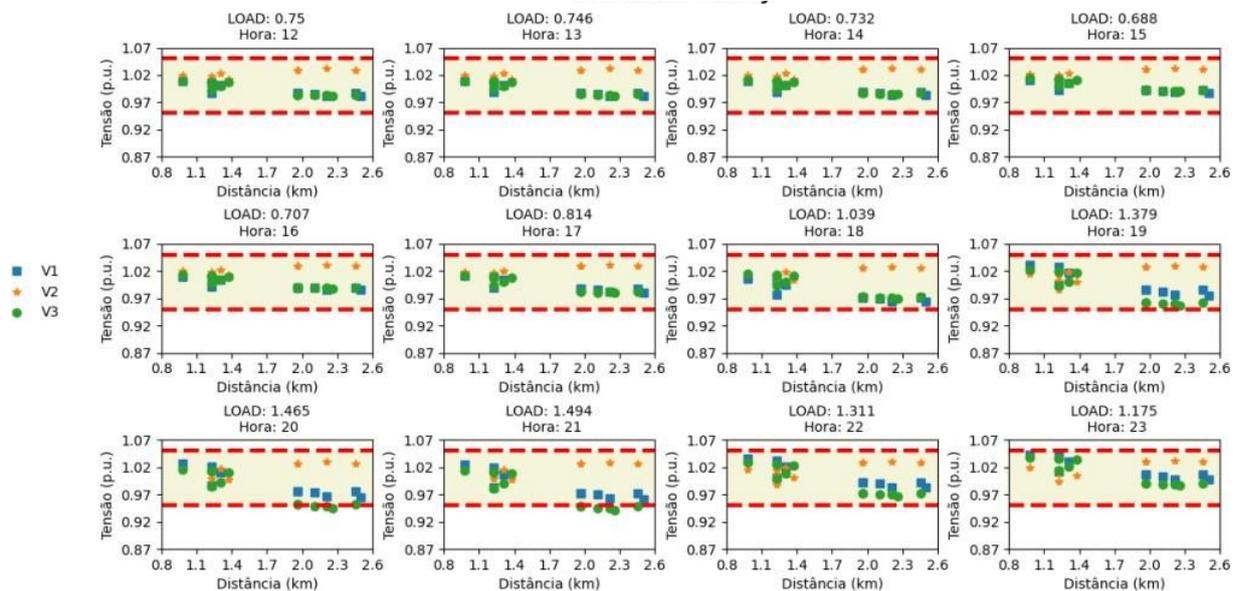
Analisando os resultados para o controlador *Fuzzy*, Fig. 9 e 10, note-se que infrações ocorreram em apenas 8% do tempo (2h). Quando a carga total do sistema ultrapassa o valor de 1,465 p.u. (46,5% de aumento), alguns poucos nós da fase 3 infringem o limite inferior de tensão permitido. Portanto, o controlador *Fuzzy* projetado apresentou desempenho superior em relação aos outros métodos, melhorando o perfil de tensão ao longo do alimentador durante o dia de operação e apresentando mais robustez para lidar com um aumento de carga. Logo, o uso de sistemas inteligentes foi capaz de atuar eficientemente na regulação de tensão.

Figura 9 – Perfil de tensão - controle *Fuzzy* (0h a 1h)



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Figura 10 – Perfil de tensão – controle *Fuzzy* (12h a 23h)



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A Tabela 1 apresenta os resultados das métricas (Equações 1 a 3), criadas para facilitar a comparação entre os métodos de controle. Note-se que o controlador *Fuzzy* foi, de fato, capaz de melhorar o perfil de tensão, pois diminuiu consideravelmente a quantidade de violações de tensão, reduziu a magnitude dessas infrações e apresentou maior robustez em lidar com aumento de carga.

Tabela 1 – Resultado das métricas para operação sem DG

| | Quantidade de violações (QV); | Magnitude das infrações (Δ_{total}) | Limite máximo de aumento de carga (C_{max}) |
|-----------------------|---|--|---|
| Sem controle | 105 | 3,524 p.u. | 3,9% |
| Controle Convencional | 40 | 0,419 p.u. | 37,9% |
| Controle <i>Fuzzy</i> | 9 | 0,037 p.u. | 46,5% |

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A partir de agora, a presença da DG no sistema de distribuição é considerada nos estudos. Os resultados das métricas estão presentes na Tabela 2, considerando as três condições de controle em face do tipo de geração.

Quando a comparação é feita entre os tipos de geradores utilizados (fotovoltaico ou eólico) a partir da Tabela 2, observa-se que a presença de geração eólica permite contribuir para a melhoria do perfil de tensão em relação à geração fotovoltaica. Esta observação pode ser comprovada ao se analisar a melhoria das métricas com a presença do gerador eólico. Enquanto o número de violações de tensão diminui, juntamente com a magnitude destas, o carregamento máximo suportado pelo sistema de regulação de tensão aumenta. Como a barra de conexão está afastada da subestação, a geração eólica permite garantir uma boa disponibilidade de energia próximo aos consumidores ao longo do dia, melhorando o perfil de tensão e facilitando a atuação dos controladores.

Tabela 2 – Resultado das métricas para operação com DG

| Tipo de Geração | Condição de Controle | Quantidade de violações (QV); | Magnitude das infrações (Δ_{total}) | Limite máximo de aumento de carga (C_{max}) |
|------------------------|-----------------------------|---|--|---|
| | Sem controle | 102 | 3,468 [p.u.] | 3,9 [%] |
| Fotovoltaico | Controle Convencional | 40 | 0,419 [p.u.] | 37,9 [%] |
| | Controle <i>Fuzzy</i> | 9 | 0,037 [p.u.] | 46,5 [%] |
| | Sem controle | 61 | 1,064 [p.u.] | 37,9 [%] |
| Eólico | Controle Convencional | 15 | 0,030 [p.u.] | 46,5 [%] |
| | Controle <i>Fuzzy</i> | 0 | 0,000 [p.u.] | Não apresenta |

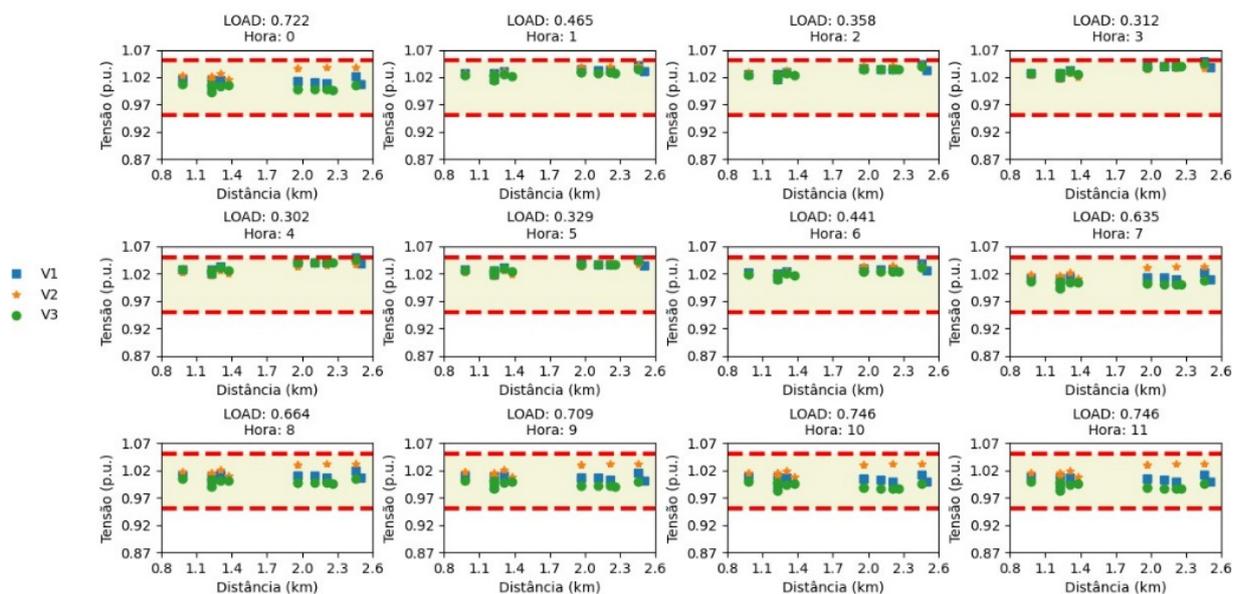
Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Note-se que, no cenário da presença do gerador fotovoltaico (Tabela 2), as métricas praticamente não sofrem alteração quando comparadas àquelas da Tabela

1, isto é, quando não há GD. Isso ocorre porque o horário em que o gerador injeta potência coincide com o horário em que a curva de carga apresenta poucas variações em torno de um valor médio, conforme pode ser visto na Fig. 2. Nos horários de maior variação de carga (noite e madrugada), não há geração fotovoltaica e, portanto, não há necessidade de ajustes de *tap* distintas daquelas apresentadas quando não há GD. Isso significa que um sistema de regulação de tensão projetado para atuar em uma rede de distribuição tradicional (sem a presença de DG) poderá desempenhar bem o seu papel diante da conexão de GD do tipo fotovoltaica, caso o perfil de curva de carga seja semelhante ao considerado neste trabalho, do tipo residencial.

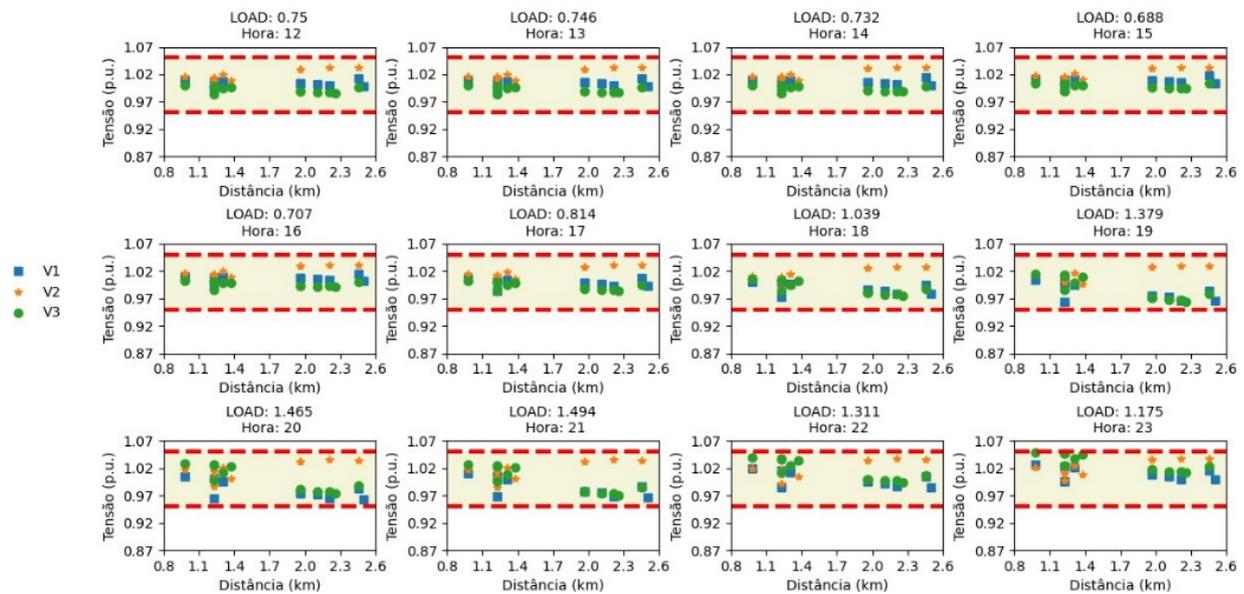
A fim de elucidar a eficiência e robustez do controlador *Fuzzy* desenvolvido em cenários com a presença de GD, as Fig. 11 e 12 mostram os gráficos das tensões do sistema em cada fase ao longo do dia de operação, diante da conexão de geração eólica. Observa-se um perfil de tensão bem-comportado dentro dos níveis regulatórios, demonstrando que o controlador *Fuzzy* é uma alternativa viável em relação ao controlador convencional.

Figura 11 – Perfil de tensão – controle *Fuzzy* – gerador eólico (0h a 11h)



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Figura 12 – Perfil de tensão – controle *Fuzzy* – gerador eólico (12h a 23h)



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando os resultados apresentados, conclui-se que o controlador *Fuzzy* desenvolvido foi capaz de melhorar a eficiência e robustez da regulação de tensão, garantindo a operação do sistema dentro das faixas de tensão exigidas por normas regulatórias. Sua performance foi superior a de controladores que usam técnicas convencionais, como o LDC, e permitiu uma regulação de tensão efetiva diante da presença de GD.

Portanto, a lógica *Fuzzy* se confirma como uma técnica promissora na solução de problemas dos sistemas elétricos inteligentes. Este trabalho apropria-se da presença de ferramentas modernas de infraestrutura que contemplem equipamentos microprocessados, sistemas de comunicação e de medição em tempo real.

Por fim, estudos futuros podem ser conduzidos para diferentes perfis de curva de carga, considerando regiões industriais e comerciais com GD, de forma a verificar a capacidade do controlador *Fuzzy* de atuar nestes cenários.

REFERÊNCIAS

ABGD. **Geração própria de energia elétrica alcança 14 GW de capacidade e iguala usina de Itaipu.** In: Associação Brasileira de Geração Distribuída (Ed.). Portal. ABGD, 2022. Disponível em: <https://www.abgd.com.br/portal/geracao-propria-de-energia-eletrica-alcanca-14-gw-de-capacidade-e-igual-a-usina-de-itaipu/>. Acesso em: 20 nov.

2022.

ANEEL. **Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica**. In: Agência Nacional de Energia Elétrica (Ed.). PRODIST. ANEEL, 2021. Revisão 12.

AZZOUZ, M. A.; FARAG, H. E.; EL-SAADANY, E. F. Real-Time fuzzy voltage regulation for distribution networks incorporating high penetration of renewable sources. **IEEE Systems Journal**, v. 11, n. 3, p. 1702-1711, set. 2017.

BANSAL, R. C. Bibliography on the fuzzy set theory applications in power systems (1994–2001). **IEEE Transactions On Power Systems**, v. 18, n. 4, p. 1291-1299, nov. 2003.

BREMERMANN, L. E. **Controle fuzzy volt/var em sistemas de distribuição**. 2008, p. 106. Dissertação (Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica) — Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2008. Disponível em: <https://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/2989>. Acesso em: 20 set. 2022.

CHOUKRI, L. *et al.* On-load tap-changer control by a fuzzy logic controller. **2019 4th World Conference on Complex Systems (WCCS)**, p. 1-6, 2019.

FELBER, L. A. **Regulação de tensão em subestações de distribuição de energia elétrica**. 2010. 123 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2010. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/1522?locale-attribute=en>. Acesso em: 20 out. 2022.

FELBER, L. A.; ARANGO, H.; BONATTO, B. D.; GOUVEA, M. R. Voltage regulation in electric energy distribution substations. **2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition**, p. 846-852, 2010.

HEYDT, G. T. The next generation of power distribution systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 1, n. 3, p. 225-235, 2010.

JARDINI, J. A.; TAHAN, C. M. V.; GOUVEA, M. R.; AHN, S. U.; FIGUEIREDO, F. M. Daily load profiles for residential, commercial and industrial low voltage consumers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 15, n. 1, p. 375-380, 2000.

LUCCHESI, F. C.; ANSELMINI, F.; MARTINS, C. C.; SPERANDIO, M. Análise do impacto da geração distribuída fotovoltaica na rede elétrica da Universidade Federal de Santa Maria. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7, 2018, Gramado. **Anais** [...] Gramado: Anais CBENS, 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/73>. Acesso em: 20 nov. 2022.

NEMA. American National Standard for Electric Power Systems and Equipment—Voltage Ratings (60 Hz). In: National Electrical Manufacturers Association (Ed.). **ANSI C84.1-2020**. NEMA, 2020.

PAL, S.; NATH, S. An intelligent on-line voltage regulation in power distribution system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER, CONTROL AND EMBEDDED SYSTEMS, 2010, [S. l.]. **Anais** [...] [S. l.], 2010, p. 1-5.

SALMAN, S. K.; WAN, Z. G. Fuzzy logic-based AVC relay for voltage control of distribution network with and without distributed/embedded generation. **2007 IEEE Lausanne Power Tech**, p. 2128-2132, 2007a.

SALMAN, S. K.; WAN, Z. G. Voltage control of distribution network with distributed/embedded generation using fuzzy logic-based AVC relay. **2007 42nd International Universities Power Engineering Conference**, p. 576-579, 2007b.

SARIMUTHU, C. R. *et al.* A review on voltage control methods using on-load tap changer transformers for networks with renewable energy sources. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 1154-1161, 2016.

SPATTI, D. H. *et al.* Real-time voltage regulation in power distribution system using fuzzy control. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n. 2, p. 1112-1123, 2010.

SU, C. L. Stochastic evaluation of voltages in distribution networks with distributed generation using detailed distribution operation models. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 25, n. 2, p. 786-795, 2010.

VITOR, T. S.; ASADA, E. N.; VIEIRA, J. C. de M. Optimal Volt/Var control applied to modern distribution systems. In: RESENER, M. *et al.* **Handbook of Optimization in Electric Power Distribution Systems**: Springer, Cham, Feb 2020, (Energy Systems). p. 1-56. ISBN 978-3-030-36115-0.