



Controle de Regulação de uma Subestação

Regulation Control of a Substation

Raphael Carvalho de Oliveira

Resumo: Este trabalho 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.

Palavras-chave: Lógica Fuzzy; energia elétrica; fontes renováveis.

Abstract: This work aims to develop an intelligent system to deal with undesirable voltage variations that may occur with the insertion of generators based on renewable sources in the electricity distribution systems. In general, such energy resources have an intermittent generation profile that can potentially affect the voltage, causing the violation of the voltage levels allowed by regulatory agencies. Traditionally, voltage regulation is done through the method called line drop compensation (LDC), which was not designed to deal with 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 system voltage profile, even when connecting distributed generators. A 13-bus electrical system was used as the basis for simulations.

Keywords: Fuzzy Logic; electric energy; renewable sources.

INTRODUÇÃO

Garantir a geração e distribuição de energia para um país com grande extensão territorial como o Brasil exige um sistema eficiente e integrado. Esse sistema é conhecido como Sistema Interligado Nacional (SIN), uma estrutura essencial para conectar diferentes regiões de maneira segura e eficaz.

Criado em 1998, o SIN foi um marco para o setor elétrico brasileiro, ao lado do Mercado Livre de Energia. Sua implementação trouxe uma nova dinâmica ao mercado, permitindo que a energia fosse gerada e distribuída com maior integração entre as regiões.

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é a malha de produção e transmissão de energia elétrica que cobre as regiões Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e grande parte da região Norte do Brasil. Esse sistema permite a transferência de

energia entre subsistemas, maximizando eficiência e segurança no abastecimento elétrico.

O sistema, de diferentes proprietários, é de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte, que permitem o atendimento ao mercado com segurança, economicidade e eficiência.

Resumindo, ele é o conjunto de equipamentos e instalações conectados eletricamente para possibilitar o suprimento de energia do país e foi criado a partir da resolução 351/98 da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) em 1998.

Essa resolução permitiu que o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) pudesse coordenar e controlar, de forma centralizada, a geração e transmissão desses sistemas interligados.

Fazem parte dessa interconexão dos sistemas elétricos não somente a geração hidrelétrica, mas também outras fontes, como eólica, solar e térmica. Dessa forma, todas as empresas que produzem e transmitem energia dentro deste modelo fazem parte do SIN.

Segundo o ONS, atualmente o SIN tem uma capacidade instalada de mais de 170 mil megawatts e extensão de rede de transmissão que ultrapassa os 145 mil quilômetros.

O funcionamento do SIN baseia-se na integração de energia gerada pelos subsistemas interligados (Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte). Essa energia é redistribuída de forma equilibrada para atender à demanda de todo o país

A maior parte da energia do SIN, cerca de 60%, é gerada por usinas hidrelétricas localizadas em 16 bacias hidrográficas. Essas usinas trabalham de maneira integrada para fornecer eletricidade a residências e indústrias em todo o território nacional.

Todas as operações do SIN são controladas pelo ONS e fiscalizadas pela Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica). O ONS monitora o consumo, planeja a geração e propõe melhorias na infraestrutura para garantir a segurança operacional e evitar interrupções no abastecimento.

Maior segurança no abastecimento: A interligação entre regiões permite o redirecionamento de energia em casos de falhas ou crises localizadas.

Diversificação de fontes: O SIN integra diferentes fontes de energia, como hidrelétrica, eólica, solar e térmica, promovendo uma matriz elétrica mais resiliente.

Eficiência operacional: A utilização de uma rede interligada possibilita o aproveitamento máximo dos recursos energéticos de cada região.

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.

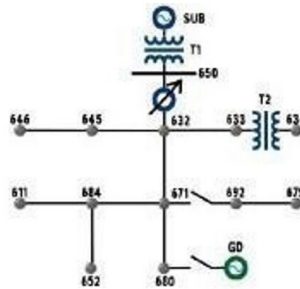
Entretanto, com o crescente aumento do uso de geradores distribuídos (GDs) – geradores conectados às redes de distribuição – baseados em energias renováveis, novos problemas têm surgido, desafiando métodos convencionais de regulação de tensão. Tais geradores apresentam características intermitentes do 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.

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.

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.



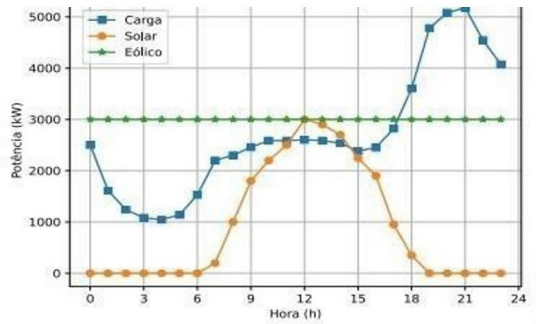
Fonte: autoria própria.

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. 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.



Fonte: autoria própria.

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 de aumento de carga para que se inicie as infrações (C_{max}), Equações 1 e 3.

Figura 3.

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

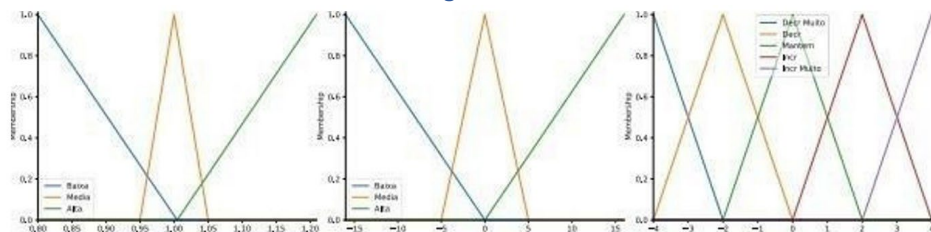
$$\Delta_{total} = \begin{cases} \sum_i^t v_i^t - v_{max}, & v_i^t > v_{max} \\ \sum_i^t v_{min} - v_i^t, & v_i^t < v_{min} \end{cases} \quad (2)$$

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

Fonte: autoria própria.

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 maxmin 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 4.



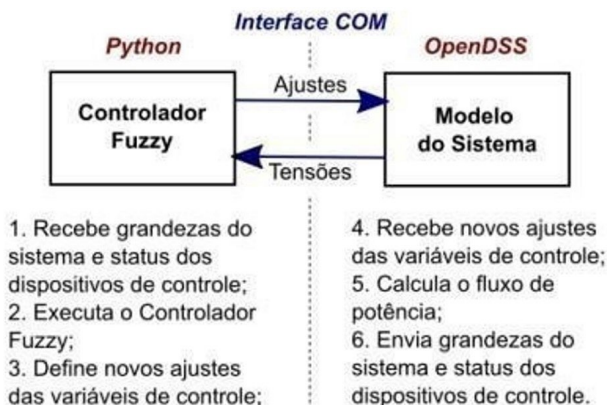
Fonte: autoria própria.

Quadro 1.

REGRA		TENSÃO		POSTAP		AJUSTE
1	Se	Baixa	E	Baixa	Então	Incrementa muito
2	Se	Baixa	E	Média	Então	Incrementa muito
3	Se	Baixa	E	Alta	Então	Incrementa
4	Se	Média	E	Baixa	Então	Mantém
5	Se	Média	E	Média	Então	Mantém
6	Se	Média	E	Alta	Então	Mantém
7	Se	Alta	E	Baixa	Então	Decrementa
8	Se	Alta	E	Média	Então	Decrementa muito
9	Se	Alta	E	Alta	Então	Decrementa muito

A fig. 5 ilustra a integração Python-OpenDSS que permite uma arquitetura completa para o desenvolvimento da pesquisa (isto é, modelagem, simulação, análise e validação).

Figura 5 - Python com Open DSS.



Fonte: autoria própria.

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). Consequentemente, a integração de unidades de GD se torna crescente, alterando os sistemas de distribuição de suas estruturas passivas, para os quais foram projetados, para ativos. Em outras palavras, o fluxo de potência do sentido subestação para carga (uni- direcional) 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).

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 . 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).

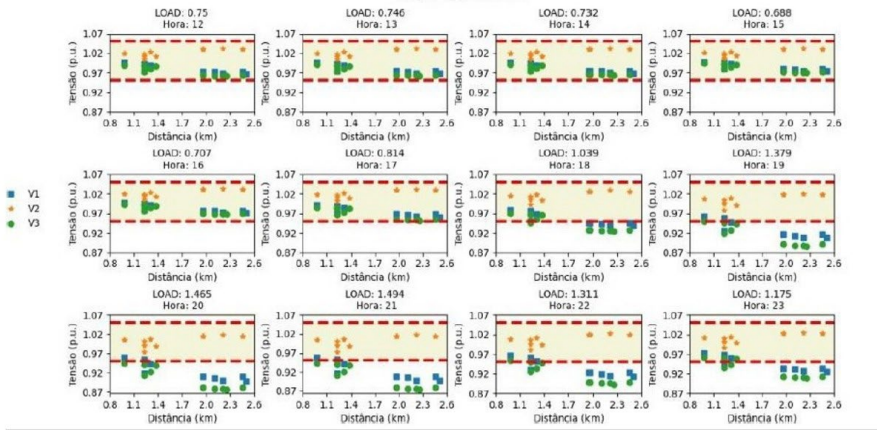
Alternativamente aos controladores tradicionais, controladores de tensão baseados em lógica Fuzzy foram reportados na literatura apresentando resultados satisfatórios e melhoria da robustez e eficiência do controlador de tensão (Pal; Nath, 2010).

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.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

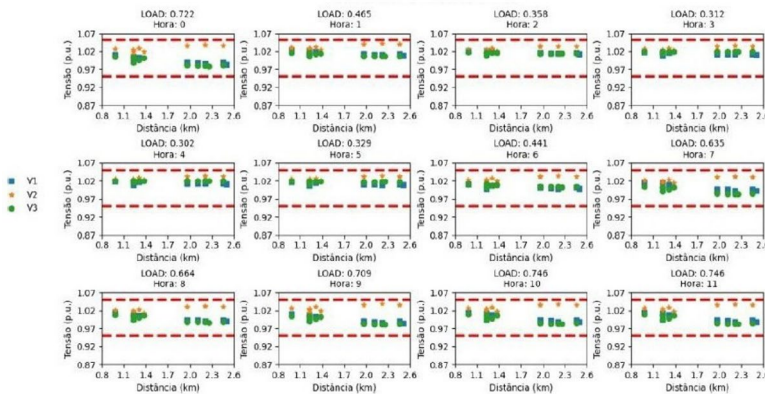
As simulações foram feitas para a operação diária do sistema de distribuição sem a presença de GD. Os resultados abrangem as três condições de controle diferentes: sem controle (fig. 5 e 6), controle convencional (fig. 7 e 8) e controlador Fuzzy (fig. 9 e 10). Nos gráficos das fig. 5 a 10, os valores 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 6.



Fonte: autoria própria.

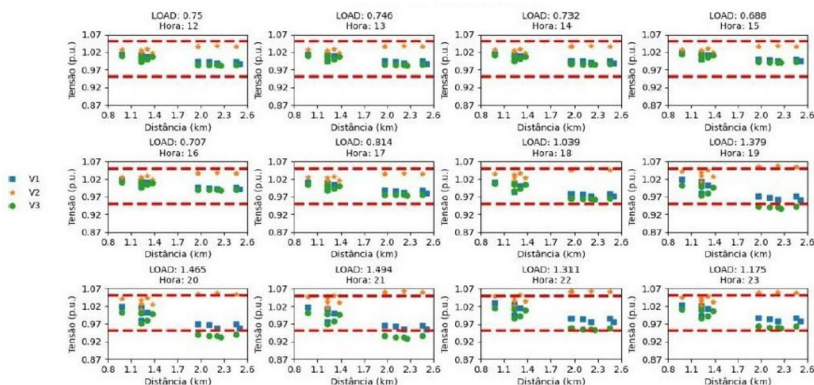
Figura 7.



Fonte: autoria própria.

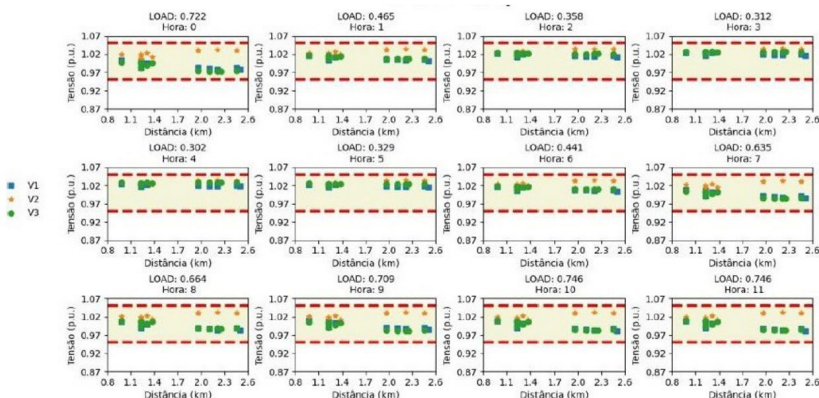
Para o controle convencional LDC (fig. 7 e 8), note-se que, quando a carga total do sistema ultrapassa 1,379 p.u., a fase 2 começa a violar o limite superior de 1,05 p.u. para os nós mais distantes. Isso ocorre em 21% do tempo (5h). A subtensão ocorre em alguns nós mais distantes da fase 3, nas horas 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 8 - Perfil de tensão . Controle Fuzzy (12 h a 23h)



Fonte: autoria própria.

Figura 9– Perfil de Tensão -Controle Fuzzy.



Fonte: autoria própria.

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 Fuzzy	9	0,037 p.u.	46,5%

Fonte: autoria própria.

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 energia próximo aos consumidores ao longo do dia, melhorando o perfil de tensão e facilitando a atuação dos controladores.

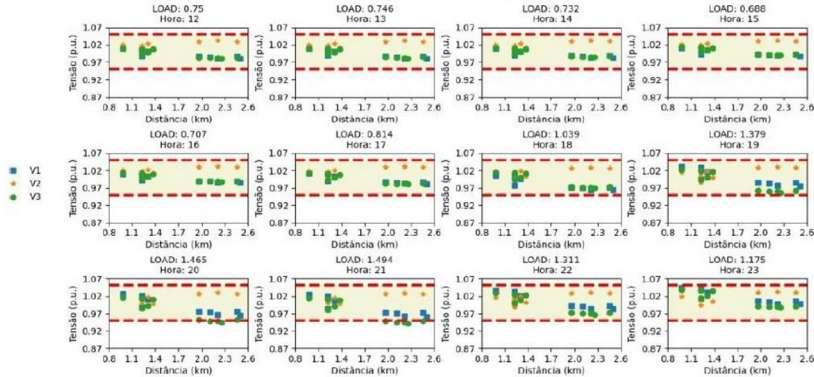
Tabela 2 – Resultado das métricas para operação com DG

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

Fonte: autoria própria.

A fim de elucidar a eficiência e robustez do controlador Fuzzy desenvolvido em cenários com a presença de GD, as fig. 10 mostra o gráfico 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 10- Perfil de Tensão -Controle Fuzzy (12h a 23h).



Fonte: autoria própria.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

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.

Adicionalmente, recomenda-se aplicar o controle fuzzy em diferentes configurações de subestações — incluindo barramentos com mais níveis de tensão, transformadores com comutação sob carga (OLTC) e sistemas com geração distribuída — de forma a verificar a escalabilidade e flexibilidade da solução.

Por fim, destaca-se a importância da análise da conformidade do controlador com os requisitos técnicos estabelecidos pelas normas brasileiras, como a NBR 5410, a NBR 14039 e, em particular, os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), especialmente o Módulo 8, que trata da qualidade da energia elétrica. Essa análise é essencial para que o modelo fuzzy seja considerado viável para aplicação real por concessionárias

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-energieletrica-alcanca-14-gw-de-capacidade-e-igual-usina-de-itaipu/> Acesso em 28 de maio de 2025.
- ANEEL. **Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica.** In: Agência Nacional de Energia Elétrica (Ed.). PRODIST. ANEEL, 2021. Revisão 1
- ARDINI, J. A. **Gerenciamento do carregamento de transformadores de distribuição.** UFRJ, 2000.
- 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, 2017.
- BANSAL, R. C. **Bibliography on the application of induction generators in nonconventional energy systems.** IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 18, n. 3, p. 433-439, 2003.
- 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: 28 de maio de 2025

CHOUKRI, I.; DJELLALI, C.; BOUKHALFA, K.; BOUKHALFA, S.; BOUKHALFA, M. **A new deep learning model for sequential pattern mining using ensemble learning and model selection: taking mobile activity recognition as a case.** Procedia Computer Science, v. 155, p. 129–136, 2019. ResearchGate+1.

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.

LUCCHESI, F. C.; ANSELMINI, F.; MARTINS, C. **National Electrical Manufacturers Association (NEMA).** v. 15, n. 1, p. 375-380, 2000.

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

PAL, S.; NATH, S. **A novel technique for determination of voltage stability margin.** IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 25, n. 3, p. 1234-1240, 2010.

SALMAN, S.; WAN, X. **Impact of distributed generation on protection of power networks.** IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 22, n. 3, p. 1152-1158, 2007.

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. Sistema interligado Nacional. Disponível em <https://www.ana.gov.br/sar/sin/> acesso em 28 de maio de 2025.

SICHUAN UNIVERSITY. **Título do documento.** Local: Sichuan University, 2010.

JARDINI, M. G. M.; CASOLARI, R. P.; J. 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.

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.

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.