

Análise probabilística do impacto da recarga simultânea de veículos elétricos em uma rede de distribuição europeia de baixa tensão

Nelson Rodrigues Silva*. **Luis Gustavo Wesz da Silva****.
Marcelo Escobar de Oliveira***. **Ghunter Paulo Viajante******. **Hugo Xavier Rocha*******.

**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Itumbiara, 75524-245
BR (nelson.silva@academico.ifg.edu.br).*

***Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Itumbiara, 75524-245
BR (luis.gustavo@ifg.edu.br).*

****Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Itumbiara, 75524-245
BR (marcelo.oliveira@ifg.edu.br).*

*****Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Itumbiara, 75524-245
BR (ghunter.viajante@ifg.edu.br).*

******Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Itumbiara, 75524-245
BR (hugo.rocha@ifg.edu.br).*

Abstract: The exponential growth of electric vehicles (EVs) over the years leads to research to analyze and assess the impacts due to the simultaneous recharge of these vehicles in the electric power system (SEP). EVs are significant single-phase loads, which when added to the predominant residential load can symbolize a big problem, as the low voltage networks and their devices were not dimensioned aiming at such an increase in demand. In addition to overload and undervoltage, the sudden connection and disconnection of these devices can generate transient impacts. This work proposes a probabilistic methodology to evaluate the impacts caused by the simultaneous recharge of EVs in the SEP, aiming at future projections, while evaluating the use of distributed photovoltaic generation and grid-connected batteries as a solution. In the simulations, the uncertainties regarding the parameters (location, profiles, generation/storage capacity, among others) will be considered. Monte Carlo (MC) simulations are used in all scenarios, aiming to obtain a probabilistic assessment of the impacts on energy quality, and verifying the impacts and efficiency of the scenario proposed as a solution. The analyzes and tests will be carried out in OpenDSS software, using a European low voltage IEEE network. All results will be presented and discussed.

Resumo: Diante do crescimento exponencial dos veículos elétricos (VEs) ao longo dos anos, surgem pesquisas para analisar e avaliar os impactos devido a recarga simultânea desses veículos no sistema elétrico de potência (SEP). Os VEs são cargas monofásicas significativas, que quando somadas a carga residencial predominante podem simbolizar um grande problema, pois as redes de baixa tensão e seus dispositivos não foram dimensionados visando tamanho aumento na demanda. Além de sobrecarga e subtensões, a conexão e desconexão repentina desses dispositivos podem gerar impactos transitórios. Este trabalho propõe uma metodologia probabilística para avaliar os impactos causados pela recarga simultânea de VEs no SEP, visando projeções futuras, ao mesmo tempo que avalia o uso de geração distribuída fotovoltaica e baterias conectadas na rede como solução. Nas simulações, as incertezas em relação aos parâmetros (localização, perfis, capacidade de geração/armazenamento, dentre outros) serão consideradas. Simulações de Monte Carlo (MC) são utilizadas em todos cenários, almejando obter uma avaliação probabilística dos impactos na qualidade de energia, e averiguando os impactos e a eficiência do cenário proposto como solução. As análises e testes serão realizados no software OpenDSS, utilizando uma rede Europeia de baixa tensão IEEE. Todos resultados serão apresentados e discutidos.

Keywords: Electric Vehicles; Hosting Capacity; Batteries; Distributed Generation; OpenDSS.

Palavras-chaves: Veículos Elétricos; Capacidade de Hospedagem; Baterias; Geração Distribuída; OpenDSS.

1. INTRODUÇÃO

A redução dos impactos ambientais tem se tornado prioridade desde a revolução industrial. Os países vêm investindo cada

vez mais em formas de amenizar a utilização de fontes de emissão de poluentes. Dentre essas formas, destaca-se a busca por fontes limpas e renováveis de energia elétrica e a redução no uso de veículos a combustão. Tal cenário

contribuí para o aumento na inserção de geração distribuída e veículos elétricos no SEP, o que acarreta uma série de estudos para avaliar o impacto dessa inserção na qualidade de energia. A geração distribuída fotovoltaica se destaca por ser mais acessível. Em Silva et al. (2021) é possível notar o crescimento e os impactos da GD fotovoltaica, e que apenas a GD fotovoltaica não é capaz de aumentar a hospedagem, pois o seu horário de pico de geração diverge do horário de maior demanda por parte dos consumidores. Como solução, este trabalho fará o uso de baterias, armazenando energia em horários de baixa demanda, e fornecendo-a quando necessário. Os VEs, impulsionados pelo avanço tecnológico e questões ambientais, apresentam um crescimento exponencial ao longo do tempo (DUNCAN; MICHAEL, 2019). Além dos problemas ambientais relacionados a sua produção e a atual matriz energética mundial (HAWKINS, et al, 2012), eles simbolizam um grande desafio para as concessionárias, já que os SEPs não foram projetados visando tamanho aumento na potência da carga. Nesse contexto, surgem pesquisas e trabalhos que buscando maneiras de aumentar a capacidade de hospedagem e amenizar os danos causados pela inserção eminente dessas tecnologias, almejando garantir a confiabilidade e qualidade do serviço. As análises se tornam ainda mais complicadas diante da estocasticidade dos parâmetros (características físicas, climáticas, referente as projeções, dentre outros). Este trabalho tem como objetivo mostrar como a união dessas tecnologias pode ser benéfica para o SEP, além explicitar os problemas causados pela conexão de VEs no SEP. No desenvolvimento do algoritmo, todos dispositivos são modelados considerando a estocasticidade dos parâmetros, que são extraídos da literatura. Em todos casos, são realizadas simulações de MC, almejando obter uma avaliação probabilística, garantindo ao final uma distribuição estatística dos dados.

2. MÉTODOS

O sistema de distribuição é denominado de baixa tensão quando possui linhas de distribuição e equipamentos associados em tensões nominais inferiores ou iguais a 1 kV. A qualidade de energia pode ser definida como a ausência de deformações causadas por harmônicos, interrupções, subtensão e sobretensão. Os resultados são comparados aos valores estabelecidos pela norma EN50160 como estrutura de referência para índices de qualidade de energia em baixa tensão (EN50160, 2010).

Todas informações (atributos, elementos, etc.) citadas do OpenDSS, podem ser acessadas na biblioteca de documentos do software ou no manual disponível em Dugan et al. (2016).

2.1 Método Probabilístico

Os perfis de cargas residenciais apresentam grande variabilidade ao longo da semana, apesar desses perfis demonstrarem um comportamento mais estável em dias úteis devido ao horário de trabalho comercial, uma abordagem determinística baseada na análise de uma única etapa de tempo traria resultados incertos, e não representaria o comportamento estocástico dos parâmetros. O método probabilístico se faz necessário diante desse cenário. Este

trabalho utilizará o método de MC, comumente aplicado em problemas com interpretação probabilística, nas análises. As simulações de MC são realizadas considerando os aspectos incertos dos dispositivos conectados à rede para um determinado período de observação (Fig. 1).

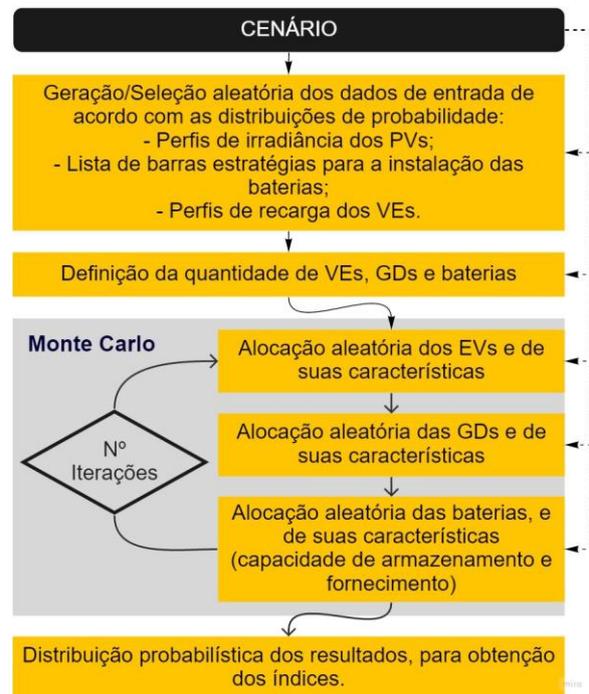


Fig. 1 Fluxograma da metodologia proposta.

Visando limitar as influências imprevisíveis externas e englobar o pior cenário (horário de pico), os testes serão repetidos 100 vezes, e realizados em todos intervalos de 1 hora de um dia útil. A saída do método será os níveis de tensões, perdas e potências em todos barramentos do sistema.

2.2 Modelagem do EV

Quiros et al. (2015) mostra que 70% dos VEs são recarregados apenas uma vez por dia, que durante os dias úteis, as conexões são concentradas às 8h (antes do trabalho) e às 18h (após o trabalho), e que a maioria das conexões (65%) terminam com a bateria cheia. Em Quiros-Tortos et al. (2018) é possível verificar o perfil de carga dos VEs, assim como a magnitude das baterias (1,44, 3 ou 3,6 kW) e os comuns fatores de potência (0,97i a 98i). Já a capacidade das baterias são valores equiprováveis de 24 e 16 kWh, o que totaliza cerca de 4 a 7 horas de carga em uma rede de 230V fornecendo cerca de 15A. Através desses dados, é realizada uma distribuição probabilística para a modelagem dos VEs, onde o perfil de demanda, capacidade armazenamento e fornecimento da bateria, fator de potência e localidade são selecionados de acordo com a taxa de probabilidade individual.

No OpenDSS os veículos elétricos podem ser modelados de diversas maneiras, sendo mais usual a modelagem como carga ou bateria. Neste trabalho foi adotada a modelagem como carga (*load*) de potência constante (*model=1*), pois se

adequa diante do cenário e dados angariados (DUGAN; MCDERMOTT, 2016).

2.3 Modelagem da GD fotovoltaica

Para considerar o perfil estocástico da geração fotovoltaica, é necessário considerar as variações na irradiância solar diária, causada por fenômenos climáticos. Os perfis de irradiância são extraídos de Paulescu et al. (2019), que considera diversos modelos estatísticos para a projeção da irradiância solar na Europa (Romênia). A potência individual dos PVs é de 330 kWh, já o quanto cada GD fotovoltaica gera de energia é calculado com base no perfil de irradiância solar, considerando uma eficiência entre 12% e 21% de acordo com Meral et al. (2011). Nos testes, a quantidade de PVs varia aleatoriamente por residência, onde a chance de ter mais módulos aumenta de acordo com a magnitude da potência instalada.

Todos dados listados são considerados na modelagem do elemento *PVSystem* no OpenDSS, também se considera um fator de potência unitário e temperatura ideal de 25°C. O inversor é modelado para variar sua eficiência de 86% a 97% de acordo com a potência de entrada (0.1pu a 1pu), e a energia de corte (in/out) sendo 10% da geração.

2.4 Modelagem da bateria

Os perfis das baterias são modelados para variar de acordo com a necessidade do sistema. Em momentos de grande geração e/ou baixo consumo a bateria começa a carregar, operando como carga, já em horários de grande demanda por parte dos consumidores a bateria passa a fornecer energia, operando como um gerador de fator de potência unitário. As baterias são distribuídas aleatoriamente em barras consideradas estratégias no SEP, de acordo com a distribuição das cargas na rede. De acordo com Gao et al. (2017), seguindo a linha dos ônibus elétricos, a capacidade de armazenamento e de fornecimento das baterias podem variar de 60 a 548 kWh, onde a potência pode chegar a centenas de kW. Neste trabalho utilizou-se baterias com capacidade de 60 a 80 kWh, de acordo com o porte do sistema.

A bateria (*storage*) no OpenDSS, é modelada para se comportar de acordo com um perfil (*loadshape*) previamente estabelecido (*dispmode = follow*), onde valores negativos simbolizam a carga e os positivos a descarga (DUGAN; MCDERMOTT, 2016).

2.5 Sistema Teste

Neste estudo é adotado o sistema teste trifásico apresentado na Fig. 2. Esse sistema é uma modificação do sistema teste de baixa tensão com 906 barras disponível na biblioteca do OpenDSS como IEEE LVTestCase (DUGAN; MCDERMOTT, 2011). Esta rede é baseada em um sistema de distribuição Europeu, com uma frequência fundamental de 50Hz. O sistema possui 116 barras e 55 cargas monofásicas residenciais com distintos perfis de demanda. A rede possui um transformador na primeira barra do sistema, conectado

em delta-estrela, que abaixa a tensão de 11kV para 0.416kV. As cargas são alocadas em diferentes fases, balanceadas de acordo com o modelo. Na Fig. 2, se encontra circundadas em verde, as regiões propensas em relação a instalação das baterias (distribuídas entre começo, meio e fim da rede).

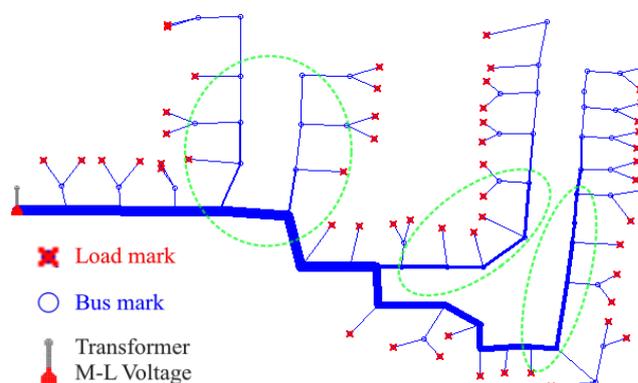


Fig. 2 Diagrama unifilar: sistema teste Europeu de baixa tensão IEEE.

3. SIMULAÇÕES

Todas simulações, assim como a geração dos dados de entrada aleatórios e o controle do loop de iteração, foram realizadas por meio da interação do OpenDSS (DUGAN; MCDERMOTT, 2011) com o PyCharm, utilizando uma CPU Intel Core i5-7400 @ 3.0 GHz com 8 GB de RAM. O OpenDSS é um simulador de domínio de frequência, que pode realizar simulações baseadas no tempo, como Quase Static Time Series (QSTS). Para todos testes, considera-se uma projeção futura de 50% (28 cargas), para a quantidade para ambos dispositivos (GDs e VEs).

3.1 Impactos – contextualizando o problema

Inicialmente, uma simulação de MC para um ponto fixo no tempo (Fig. 3) é realizada com o intuito de analisar o comportamento do sistema diante da inserção de múltiplos VEs.

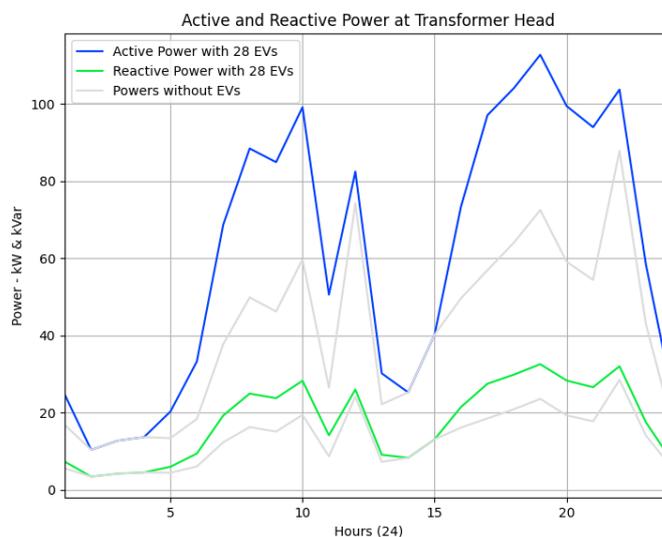


Fig. 3 Perfil de carga - Teste MC (ponto fixo no tempo).

Na Fig. 3 podemos comparar o perfil de carga da rede antes e após a inserção dos VEs. É notável o aumento da demanda por potência ativa, que, devido a compensação de reativos, acarreta o aumento da potência reativa. Com o aumento do fluxo de potência nas linhas, podemos observar nas Fig. 4 e 5 que as perdas do sistema tendem a aumentar e as tensões nas barras a diminuir, o que impacta diretamente na qualidade de energia.



Fig. 4 Perdas do circuito. (Fig. 3)

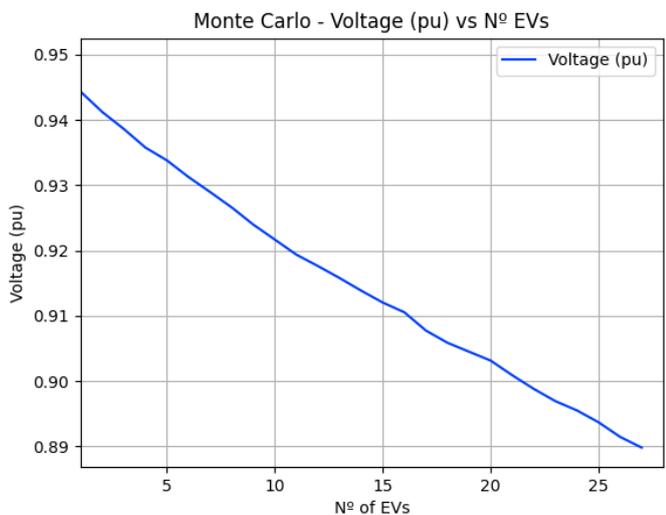


Fig. 5 Decaimento no nível tensão. (Fig. 3)

Com a diminuição da tensão nas barras, é natural que os consumidores apresentem problemas de subtensão (tensões menores que 0.9 pu (-10%), como podemos averiguar na Fig. 6.

Outro problema que preocupa as concessionárias, é o fato de que os VEs são cargas monofásicas significativas, e são conectadas na mesma fase da residência, sendo somadas à carga residencial predominante. Segundo Järvinen et al. (2012), diversas redes de baixa tensão, juntamente de seus dispositivos (proteção, conversão, etc.), foram projetadas para suportar uma demanda de pico diversificada equivalente de 4 a 4,5 kW por casa (isso após a demanda máxima de

diversidade (ADMD) é média em todas as instalações; algumas casas terão uma demanda muito maior e alguns uma demanda muito menor). Portanto, a capacidade de hospedagem disponível nessas redes, podem não ser o suficiente para suportar a conexão massiva de VEs. Nesse cenário, este trabalho irá utilizar GDs fotovoltaicas e baterias para aumentar a capacidade de hospedagem. As GDs suprem as cargas próximas, reduzindo o fluxo de potência pelas linhas do sistema. As baterias carregam em períodos de baixa demanda, e armazenam o excesso de energia gerado pelas GDs, para fornecê-la quando necessário.

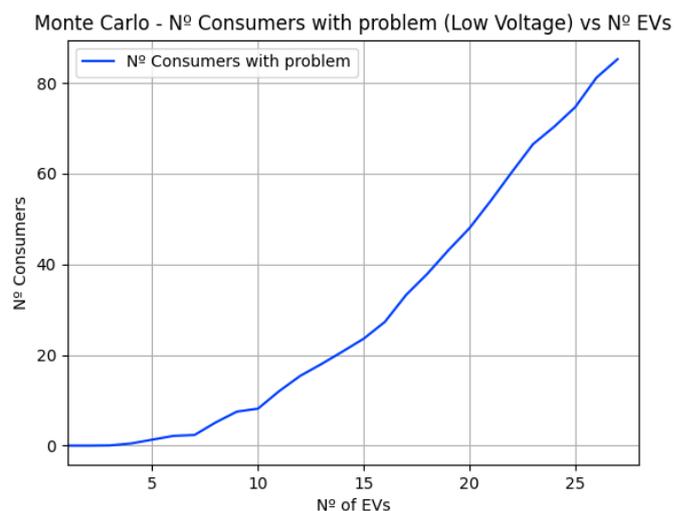


Fig. 6 Número de consumidores com subtensão. (Fig. 3)

3.2 Simulação do cenário proposto como solução

O avanço tecnológico ligado aos empreendimentos na área, têm tornado viável a aquisição desses dispositivos por parte dos consumidores. Esses dispositivos operando separados podem gerar impactos negativos, como demonstrado, no caso das GDs fotovoltaicas, em Silva et al. (2021) e na seção 3.1 deste trabalho, sobre os EVs. Diante disso, se torna viável buscar maneiras de utilizar a integração desses dispositivos para beneficiar o SEP e amenizar os impactos. Para demonstrar e comprovar a eficiência da integração dessas tecnologias, uma simulação de MC é realizada (Fig. 7 e 8).

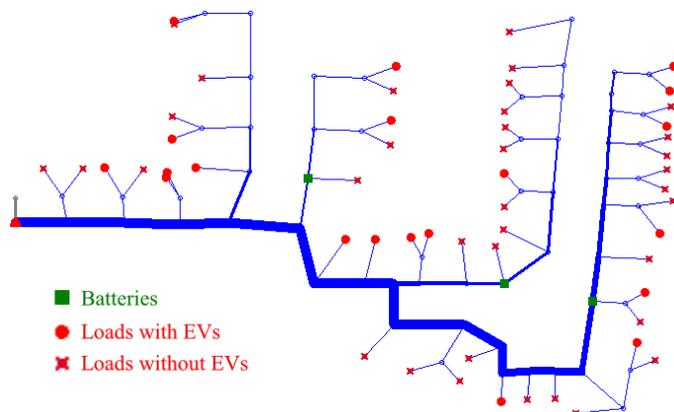


Fig. 7 Exemplo de alocação dos dispositivos.

Na Fig. 7 podemos observar um exemplo de alocação aleatória dos dispositivos. De acordo com a metodologia probabilística, são gerados outros 100 modelos em um loop iterativo, e para cada caso é feita uma análise considerando a estocasticidade dos dados. Ao final é realizada uma distribuição estatística sobre os resultados.

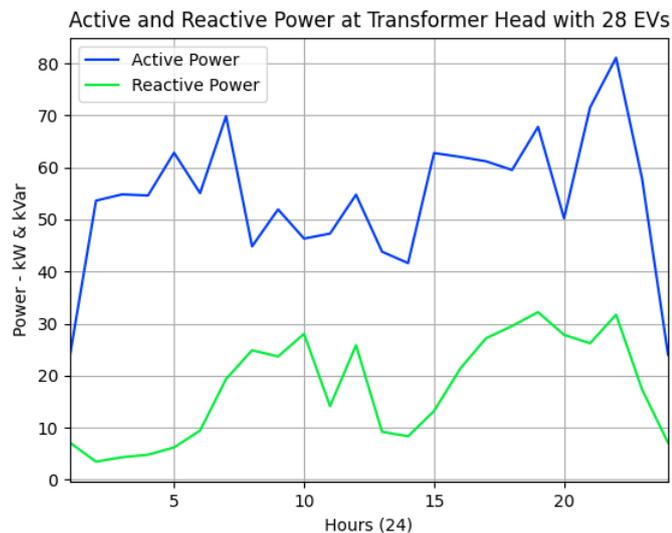


Fig. 8 Perfil de carga – cenário solução.

Na Fig. 8 encontra-se o novo perfil de carga, após a integração dos dispositivos. Comparando os perfis disponíveis nas Fig. 3 e 8, é possível notar que houve:

- Aumento na capacidade de hospedagem da rede;
- Aliviou o transformador, evitando sobrecarga em horários de alta demanda;
- Redução na demanda máxima de potência ativa provinda da concessionária, alimentador;
- Maior linearização da demanda;
- Aumento no fornecimento de energia reativa, por parte do alimentador, nos horários de maior demanda listados na Fig. 3;

É possível notar que, devido ao carregamento das baterias em horários de baixa demanda, o problema de fluxo reverso apresentado em Silva et al. (2021) foi solucionado, evitando as demais consequências.

Por fim, a Fig. 9 mostra a mínima tensão encontrada em cada cenário, onde é notável um aumento na tensão, mesmo diante do aumento do fluxo de potência causado pelos dispositivos, devido a inserção das GDs, como apresentado em Silva et al. (2021).

Na Fig. 9 podemos perceber que a inserção de VEs sem medidas de controle, resulta na violação dos índices de qualidade de energia, que neste trabalho, impostos pela EN50160 (2010). É importante ressaltar que os problemas de tensão podem se agravar em sistemas maiores, devido ao aumento no comprimento da linha.

3.3 Notas

Este estudo é realizado visando uma rede inteligente. É importante ressaltar que a inserção desses dispositivos na rede, a torna muito complexa. Grande parte dos sistemas de distribuição, juntamente de seus dispositivos de proteção, foram dimensionados visando o modelo radial, com apenas um alimentador. A partir do momento em que se insere baterias e GDs na rede, a radialidade do sistema é afetada (SILVA, et al, 2021), o que dificulta o controle dos dispositivos e torna complexo o arranjo da proteção. Diante dos benefícios e da necessidade, esse cenário abre espaço para futuras pesquisas.

Diante dos gráficos plotados, a metodologia de MC acaba suavizando os dados (curva), mas durante as simulações é possível perceber o quanto os parâmetros estocásticos afetam os resultados, o que enfatiza a importância de considera-los.

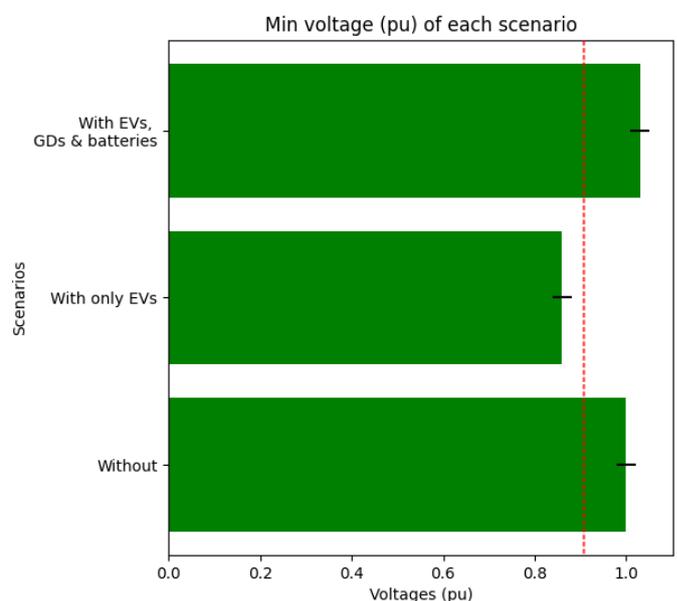


Fig. 9 Mínima tensão na rede em cada caso. (Fig. 3 e 8)

6. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um método probabilístico, avaliando os impactos decorrentes da recarga simultânea de VEs no SEP considerando projeções futuras. A metodologia foi aplicada em cenários realísticos, considerando a estocasticidade dos parâmetros. Os testes mostraram o comportamento das grandezas elétricas da rede diante do aumento da penetração dos VEs, complementando a literatura. Também demonstrou a eficiência do uso de GDs fotovoltaicas e baterias no aumento da capacidade de hospedagem e controle do SEP. Incentivando novas pesquisas e o desenvolvimento de ferramentas para mitigar os danos e garantir a confiabilidade e qualidade do serviço prestado.

REFERÊNCIAS

- Duncan, Michael P. (2019). The growth of electric vehicles. *Tribology & Lubrication Technology*, volume 75, Ed. 11, 6.

- Dugan, R. C., & McDermott, T. E. (2011). An open-source platform for collaborating on smart grid research. In *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting* (pp. 1-7). IEEE.
- Dugan, R. C., & McDermott, T. (2016). Reference guide. The Open Distribution System Simulator (OpenDSS). EPRI.
- EN50160. (2010). Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Networks, Standard EN 50160, *CENELEC*.
- Gao, Z., Lin, Z., LaClair, T. J., Liu, C., Li, J. M., Birky, A. K., & Ward, J. (2017). Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service. *Energy*, 122, 588-600.
- Järvinen, J., Orton, F., & Nelson, T. (2012). Electric vehicles in australia's national electricity market: Energy market and policy implications. *The Electricity Journal*, 25(2), 63-87.
- Hawkins, T.R., Gausen, O.M. and Strømman, A.H. (2012). Impactos ambientais de veículos híbridos e elétricos - uma revisão. *Int J Life Cycle Assess*, volume 17, 997-1014.
- Meral, M. E. and Furkan, D. (2011). A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 15, 2176-2184.
- Paulescu, M. and Paulescu, E. (2019). Short-term forecasting of solar irradiance. *Renewable Energy*. volume 143, 985-994.
- Quiros, J., Ochoa, L.F. and Lees, B. (2015). A statistical analysis of EV charging behavior in the UK. *IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*. Latin America.
- Quiros-Tortos, J., Navarro-Espinosa, A., Ochoa, L. F. and Butler, T. (2018). Statistical representation of EV charging: Real data analysis and applications. *Power Systems Computation Conference (PSCC)*.
- Silva, N.R., Da Silva, L.G.W., Oliveira, M.E., Rocha, H.X. and Viajante, G.P. (2021). Study of the Impacts of Inserting Distributed Photovoltaic Generators in the Protection of Energy Distribution Systems. *IEEE URUCON*, volume 1, 430-434.