

Metodologias utilizadas na elaboração de cenários para simulações do sistema elétrico de potência com inserção de geração distribuída fotovoltaica

Zedequias Machado Alves*, Lucas Mondardo Cunico†, Guilherme Manoel da Silva‡,
Gustavo Marchesan§, Ghendy Cardoso Junior*

**†Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IFSC
Rodovia, SC-443, 845 - Vila Rica, Criciúma - SC, 88813-600

*Email: zedequias.alves@ifsc.edu.br

†Email: lucas.cunico@ifsc.edu.br

‡Email: guilherme.manoel@ifsc.edu.br

§*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE
Universidade Federal de Santa Maria, UFSM

Av. Roraima nº 1000, Camobi, Santa Maria - RS, 97105-900

§Email: gutomarchesan@gmail.com

*Email: ghendy@ufsm.br

Resumo — Com a crescente demanda por Geração Distribuída (GD), em especial a Fotovoltaica (GDFV), o planejamento do sistema elétrico de distribuição considerando a participação da GDFV é essencial. Assim, torna-se necessário a aplicação de metodologias de simulação que melhor representem a inserção de GDFV no sistema elétrica. Este trabalho realiza a simulação de três possíveis percentuais de GDFV (10%, 20% e 30%) a serem inseridos em um sistema de 33 barras. As simulações são realizadas de três perspectivas: considerando a inserção em todas as barras; alocação pseudoaleatória; e alocação aleatória. Nas simulações são observados os níveis de tensão e perda ativa. A escolha inadequada da metodologia a ser utilizada nas simulações com GDFV pode comprometer os estudos realizados.

Palavras-Chave — Geração distribuída fotovoltaica; simulação pseudoaleatória; Nível de tensão; Perdas Técnicas

I. INTRODUÇÃO

Apesar dos benefícios oferecidos pela Geração Distribuída (GD), vários desafios econômicos e técnicos podem resultar em uma integração inadequada entre as unidades de GD e as redes de distribuição existentes [1]. Portanto, nos planejamentos envolvendo unidades de GD, é importante que sejam atendidos critérios de qualidade da energia, estabilidade de tensão, redução de perdas, confiabilidade do sistema e rentabilidade do investimento [2].

De acordo [3], a estimativa é de que até 2040 aproximadamente 30% da energia elétrica utilizada no Brasil seja proveniente de GD. É necessário que sejam realizados estudos de forma a preparar o Sistema Elétrico de Potência (SEP) para receber a GD, reduzir os impactos negativos e maximizar os seus benefícios [4].

Em sistemas reais, a GD é inserida pelo consumidor (carga), que decide investir e utilizar uma geração renovável. O consumidor com geração distribuída normalmente utiliza a sua

geração juntamente com os serviços oferecidos pela concessionária (*ongrid*), a utilização de forma isolada da rede (*offgrid*) é menos comum.

Embora existam estudos com propostas de planejamento ótimo da GD integrada ao sistema elétrico de potência (SEP) [5], a alocação da GD no sistema elétrico ocorre de forma aleatória e, na maioria das vezes, independem da ação do planejador do sistema de distribuição.

Nos trabalhos observados a respeito dos impactos relacionados à GD no SEP, poucos são os que deixam claro qual a metodologia utilizada para a escolha das barras candidatas a receberem a GD. Há trabalhos que realizam a alocação da GD em todas as barras do sistema [6, 7]. Outros trabalhos, fixam as unidades de GD em barras pré-definidas e avaliam os impactos considerando estes pontos [8, 9].

Este trabalho tem como proposta avaliar as metodologias utilizadas na escolha de barras candidatas a receberem a alocação futura de Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV). Serão implementadas e cotejadas três possíveis metodologias: inserção de GDFV em todas as barras, inserção pseudoaleatória de GDFV, e inserção aleatória de GDFV.

II. SIMULAÇÕES COM INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Para a realização de estudos envolvendo o planejamento do sistema elétrico com a contribuição da GDFV, é necessário observar a aleatoriedade na escolha das barras candidatas a receberem GDFV, o dimensionamento da GDFV, e a intermitência da GDFV e da carga ao longo do dia e das estações do ano.

Considerando um crescimento gradual da GDFV, conforme abordado em [3]. Neste estudo, são realizadas simulações com inserção de três níveis de participação de GDFV no sistema elétrico (10%, 20% ou 30%), utilizando três possíveis

metodologias: inserção de GDFV em todas as barras, inserção pseudoaleatória de GDFV, e inserção aleatória de GDFV. O nível mínimo de tensão e as perdas técnicas são observadas em cada uma das simulações realizadas.

As simulações foram realizadas no sistema teste de 33 barras [10]. O sistema pode ser visto na Fig. 1.

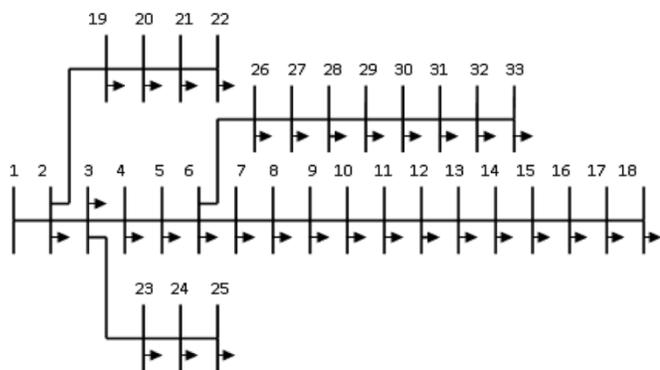


Fig. 1. Sistema 33 barras [11].

O sistema de 33 barras é um sistema de média tensão (12,66 kV). Possui o alimentador conectado à barra 1 e atende uma carga total de 3,715 MW. A perda ativa total do sistema é de 202,68 kW, a menor tensão é de 0,913 pu e ocorre na barra 18.

Para as simulações foi utilizado o Matlab® juntamente com o conjunto de bibliotecas para simulações do sistema elétrico de potência MatPower® [12].

A. Simulações com GDFV instalada em todas as barras

Simulações com a inserção de um percentual fixo de GDFV em um sistema, sendo que este percentual será distribuído de forma proporcional em todas as barras, pode ser executado conforme o fluxograma da Fig. 2.

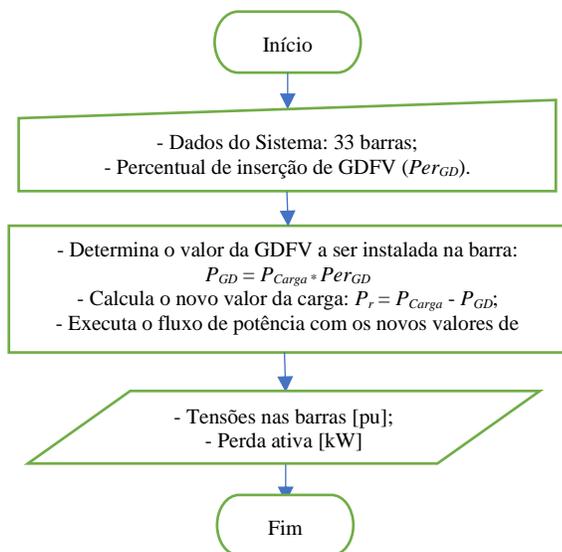


Fig. 2. Inserção de GDFV em todas as barras. Onde: Per_{GD} é o percentual de GDFV a ser instalado no sistema; P_{GD} a potência ativa da GDFV a ser instalada; P_r a potência ativa resultante na barra; P_{Carga} a potência ativa da carga atual.

As Fig. 3 e Fig. 4 apresentam, respectivamente, as perdas de potência ativa do sistema e os níveis de tensão nas barras, para simulações de 10%, 20% e 30% de GDFV utilizando a metodologia do fluxograma apresentado na Fig. 2.

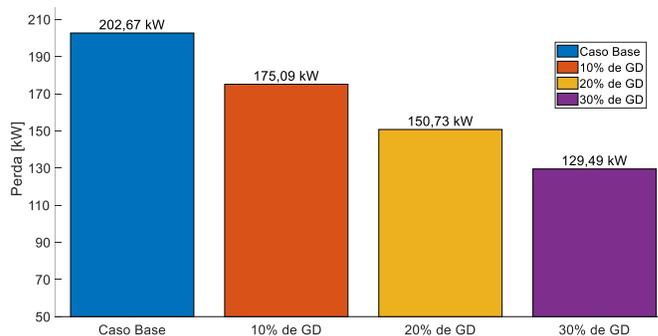


Fig. 3. Perda Ativa do sistema com a inserção de GDFV em todas as barras.

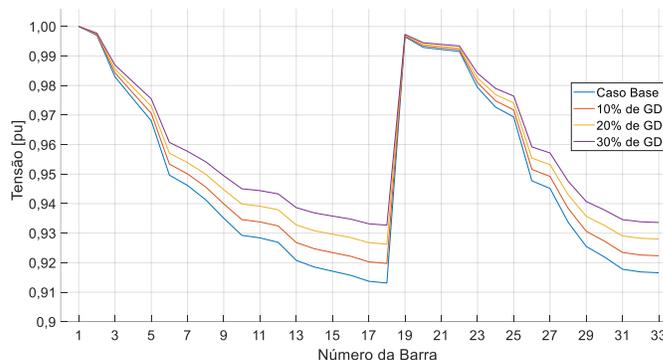


Fig. 4. Níveis de tensão com inserção de GDFV em todas as barras.

Para os três percentuais de GDFV, a barra 18 apresentou o menor nível de tensão com valores de 0,913 pu, 0,920 pu, 0,926 pu e 0,933 pu, para os cenários Caso Base, 10% de GD, 20% de GD e 30% de GD, respectivamente.

B. GDFV instaladas de forma pseudoaleatória na rede

Simulações e estudos envolvendo cenários aleatórios apresentam vários desafios, entre eles a “repetibilidade”. Uma forma de contornar esta situação é realizando simulações pseudoaleatórias, ou seja, fixar a sequência de valores a serem sorteados.

O Matlab®, enquanto ferramenta de simulação, oferece três formas de gerar números aleatórios: *seed*; *state*; e *twist* [13]. Sendo que os três geradores de números aleatórios suportam a fixação da sequência de sorteios. Por exemplo, escolhendo o gerador de números aleatórios como sendo o *state*, basta antes da rotina de sorteios aplicar o comando:

```
>> rand('state', X)
```

Onde: X deve ser um número inteiro. Para cada número inteiro utilizado será gerada uma sequência diferente de valores.

As unidades de GDFV, principalmente as instaladas em consumidores residenciais, são dimensionadas para atender a

todo o consumo de energia elétrica do cliente, ou grande parte dele. Nesta seção propomos a instalação das GDFV dimensionadas para atender o consumo do cliente quase que na totalidade, sendo as unidades de GDFV alocadas de forma pseudoaleatórias no sistema, conforme fluxograma da Fig 5.

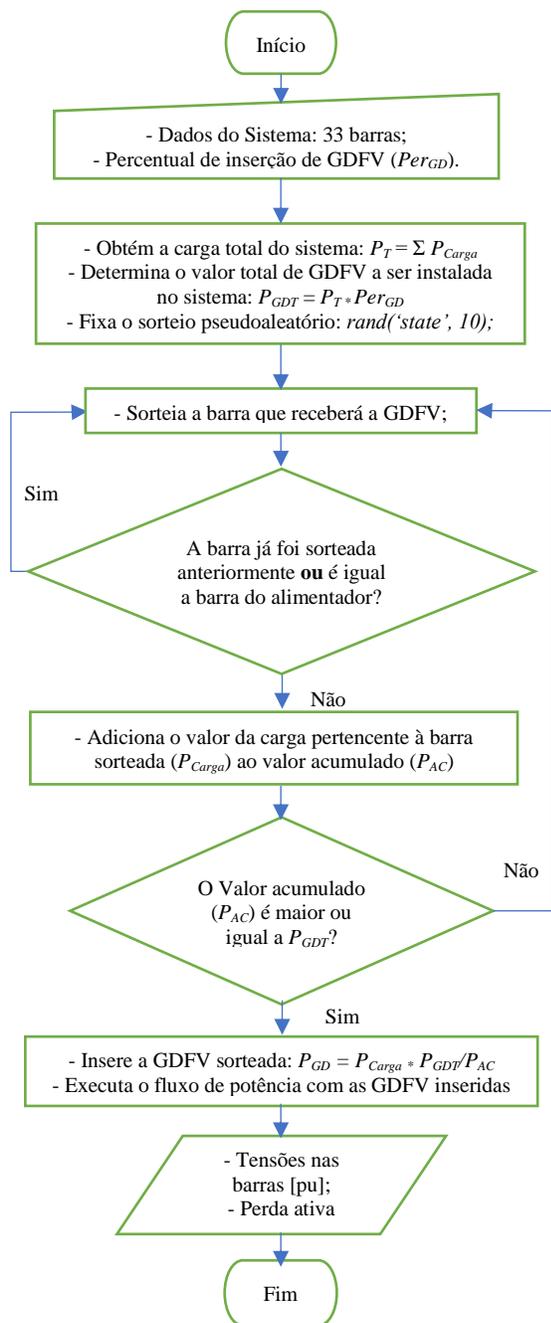


Fig 5. Inserção pseudoaleatória de GDFV. Onde: P_T é a potência ativa total das cargas, P_{GDT} a potência ativa total a ser atendida pelas GDFV, P_{AC} a soma das cargas nas barras sorteadas para receberem a GDFV.

Os dados das GDFV alocadas de forma pseudoaleatória no sistema de 33 barras, obtido com o uso do fluxograma da Fig 5, podem ser visualizados nas TABELAS I, II e III.

TABELA I. DADOS PARA INSERÇÃO DE 10% DE GDFV.

Barra Sorteada	Carga [kW]	Tamanho da GD [kW]
15	60	47,42
7	200	158,08
32	210	165,99

TABELA II. DADOS PARA INSERÇÃO DE 20% DE GDFV.

Barra Sorteada	Carga [kW]	Tamanho da GD [kW]
15	60	53,71
7	200	179,04
32	210	187,99
3	90	80,57
9	60	53,71
12	60	53,71
31	150	134,28

TABELA III. DADOS PARA INSERÇÃO DE 30% DE GDFV.

Barra Sorteada	Carga [kW]	Tamanho da GD [kW]
15	60	58,40
7	200	194,67
32	210	204,41
3	90	87,60
9	60	58,40
12	60	58,40
31	150	146,00
4	120	116,80
20	90	87,80
17	60	58,40
11	45	43,80

Observa-se nas TABELAS I, II e III, que as barras sorteadas para o cenário com 10% de GDFV se repetem no cenário para 20% de GDFV, e as barras sorteadas para 20% se repetem no cenário de 30%, isso ocorre porque os sorteios foram pseudoaleatórios, fixados por meio do comando *state*. Porém, os tamanhos das unidades de GDFV a serem instaladas, mesmo que para uma mesma barra, são diferentes, isso ocorre pois os tamanhos das GDFV são ajustados nas barras de forma a manter o percentual global fixo desejado, no caso abordado neste trabalho, em 10%, 20% ou 30%. Não há instalação de mais de uma unidade de GDFV por barra de carga, nem a instalação de GDFV na barra do alimentador, estas condições foram implementadas no algoritmo.

As perdas e os níveis de tensão no sistema com as GDFV instaladas de forma pseudoaleatórias, conforme fluxograma da Fig 5, podem ser visualizadas na Fig. 6 e Fig. 7 respectivamente.

Semelhante ao sistema com GDFV inseridas em todas as barras, quando inseridas de forma pseudoaleatórias, a menor tensão ocorreu na barra 18. Os menores níveis de tensão foram de 0,913 pu, 0,921 pu, 0,928 pu e 0,936 pu, para os cenários Caso Base, 10% de GDFV, 20% de GDFV e 30% de GDFV respectivamente.

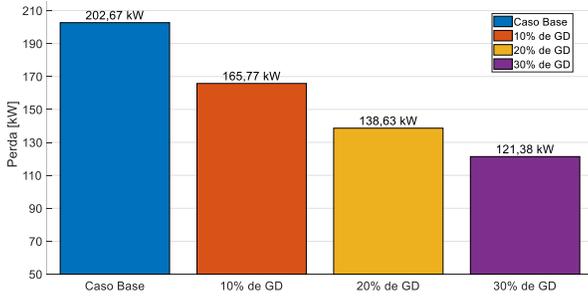


Fig. 6. Perda ativa do sistema com inserção pseudoaleatória de GDFV.

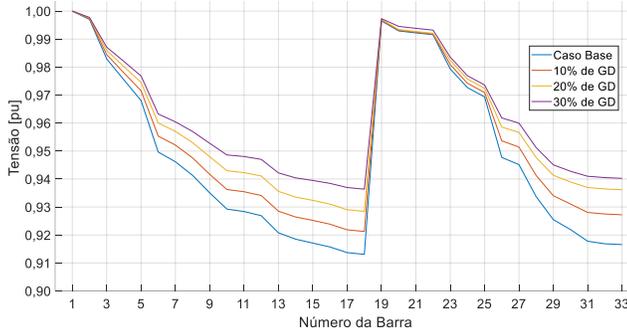


Fig. 7. Níveis de tensão com inserção de GDFV em barras pseudoaleatórias.

C. GDFV instalada de forma aleatória na rede

A simulação com alocação aleatória de GDFV pode ser realizada com pequenas adaptações no fluxograma utilizado para a simulação pseudoaleatória. É necessário que se retire a fixação do sorteio pseudoaleatória ($rand('state', 10)$). Também é necessário que se insira uma *condição de parada* antes do fim do fluxograma, a *condição de parada* pode ser um número fixo de iterações, desvio padrão, ou variância de determinada grandeza a ser monitorada.

Para o caso em estudo, optou-se em estabelecer como *condição de parada* um número fixo de iterações (10^6 iterações). As grandezas coletadas durante as iterações foram: menor nível de tensão [pu]; e perda ativa [kW].

Nos casos simulados, com inserção de 10%, 20% e 30% de GDFV, as barras onde ocorreram o menor nível de tensão, para todos os cenários, foram a barra 33, com 16% das ocorrências, e a barra 18, com 84% das ocorrências.

A cada iteração realizada foi coletado o valor do menor nível de tensão na rede. Os registrados nas iterações ocorrem conforme apresentado na Fig 8. Os valores médios ficam em torno de 0,919 pu, 0,924 pu e 0,930 pu, para os percentuais de 10%, 20% e 30% de GDFV respectivamente.

O mesmo feito para o nível de tensão mínima também foi realizado para a perda ativa total da rede. Na Fig 9, são apresentados os dados para as perdas ativa do sistema. Os valores médios ficam em torno de 200,04 kW, 152,43 kW e 131,46 kW, para os percentuais de 10%, 20% e 30% de GDFV respectivamente.

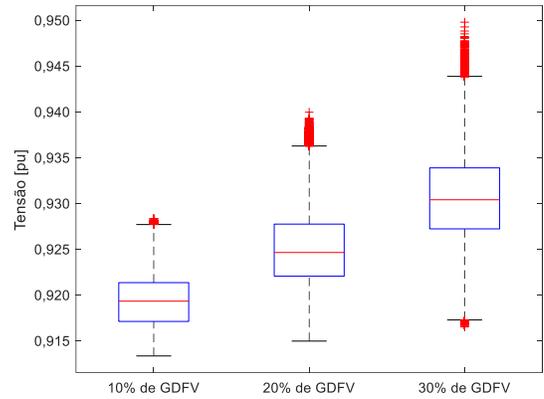


Fig 8. Níveis de tensão mínima ocorridos na inserção aleatória de GDFV.

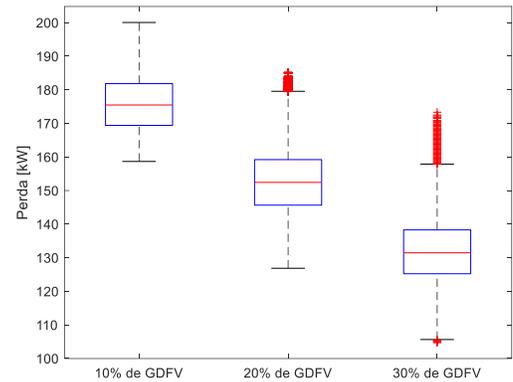


Fig 9. Perdas de potência ativa ocorridas na inserção aleatória de GDFV.

III. DISCUSSÕES

A comparação entre os resultados obtidos pelas metodologias abordadas neste trabalho nem sempre é prudente ou aconselhável. O planejador deve avaliar qual metodologia melhor se aplica a sua necessidade.

As simulações com GDFV alocadas em todas as barras são indicadas para situações em que as instalações das GDFV ocorrem na baixa tensão e a análise é realizada na média tensão.

As simulações com GDFV alocadas de forma pseudoaleatórias na média tensão, são indicadas para situações com GDFV instaladas de forma concentrada em determinadas regiões, sendo as regiões de concentração obtidas de forma pseudoaleatórias.

A simulação aleatória pode auxiliar na determinação do melhor cenário a ser abordado na simulação pseudoaleatória. É coerente que o cenário aplicado na simulação pseudoaleatória esteja dentre os mais prováveis de ocorrerem. A simulação pseudoaleatória realizada neste trabalho, por exemplo, poderia ter sido melhor escolhida para que os valores mínimos de tensão e valores de perda ativa estivessem mais próximos dos valores médios encontrados na simulação aleatória.

Além da metodologia utilizada para a realização da simulação, também é necessário que se defina o ponto de operação. O ponto de operação utilizado para a realização das simulações apresentadas neste trabalho considerou: a carga em

seu valor médio; fator de potência unitário da GDFV; e potência gerada levemente inferior ao valor da carga instalada.

A geração de energia em uma unidade de GDFV não é constante durante o dia, como mostra a Fig. 10. No pico de geração a GDFV pode atingir valores de até quatro vezes o valor da carga média [14].

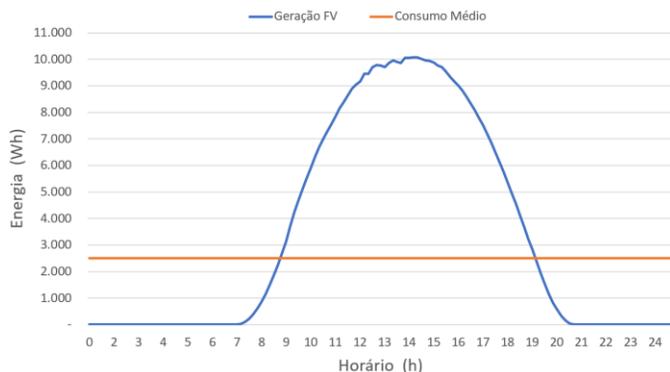


Fig. 10. Comportamento da GDFV com relação à carga média diária [15].

IV. CONCLUSÃO

A escolha do cenário de simulação é uma das primeiras etapas no processo de planejamento do sistema com GDFV. A metodologia escolhida para a alocação das GDFV no SEP pode influenciar ou até mesmo invalidar os resultados obtidos.

Os resultados para as tensões mínimas apresentam valores bem próximos independente da metodologia aplicada, as variações são inferiores a 1% entre as simulações com alocação em todas as barras, pseudoaleatória e os valores médios da simulação aleatória. As perdas apresentam variações maiores, chegando a variar aproximadamente 8% entre a simulação com alocação em todas as barras e a pseudoaleatória.

A simulação aleatória considerou que todas as cargas possuem a mesma probabilidade de receber GDFV, isso nem sempre é verdade. Fatores como a demanda consumida, questões regionais, questões socioeconômicas, ambientais, entre outras, podem influenciar na probabilidade de determinado cliente instalar a GDFV.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] T. Jamal, T. Urme, M. Calais, G. Shafiqullah, and C. Carter, "Technical challenges of PV deployment into remote Australian electricity networks: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 1309–1325, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.02.080.
- [2] J. LIU, H. GAO, Z. MA, and Y. LI, "Review and prospect of active distribution system planning," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 3, no. 4, Art. no. 4, Nov. 2015, doi: 10.1007/s40565-015-0170-7.
- [3] Clean Energy Council. "The distributed energy resources revolutionary: road map for australia's enormous rooftop solar and battery potential," 2019. [Online]. Available: <https://assets.cleanenergycouncil.org.au/documents/advocacy-initiatives/the-distributed-energy-resources-revolution-paper.pdf>.
- [4] S. Jain, S. Kalambe, G. Agnihotri, and A. Mishra, "Distributed generation deployment: State-of-the-art of distribution system planning in sustainable era," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 363–385, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.04.024.
- [5] A. Ehsan and Q. Yang, "Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques," *Applied Energy*, vol. 210, pp. 44–59, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.106.
- [6] M. B. López, M. S. Villamizar, M. Molinas, and E. B. Alzate, "Oscillation analysis of low-voltage distribution systems with high penetration of photovoltaic generation," *Electrical Engineering*, vol. 103, no. 2, Art. no. 2, Nov. 2020, doi: 10.1007/s00202-020-01152-x.
- [7] B. Fani, H. Bisheh, and I. Sadeghkhani, "Protection coordination scheme for distribution networks with high penetration of photovoltaic generators," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 8, Art. no. 8, Mar. 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2017.1229.
- [8] H. Ji, C. Wang, P. Li, F. Ding, and J. Wu, "Robust Operation of Soft Open Points in Active Distribution Networks With High Penetration of Photovoltaic Integration," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2019, doi: 10.1109/tste.2018.2833545.
- [9] S. S. Guggilam, E. D. Y. C. Chen, S. V. Dhople, and G. B. Giannakis, "Scalable Optimization Methods for Distribution Networks With High PV Integration," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 4, Art. no. 4, Jul. 2016, doi: 10.1109/tsg.2016.2543264.
- [10] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 9, no. 4, Art. no. 4, 1989, doi: 10.1109/61.25627.
- [11] P. S. Meera and S. Hemamalini, "Optimal Siting of Distributed Generators in a Distribution Network using Artificial Immune System," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 7, no. 2, Art. no. 2, Apr. 2017, doi: 10.11591/ijece.v7i2.pp641-649.
- [12] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sanchez, and R. J. Thomas, "MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, Art. no. 1, Feb. 2011, doi: 10.1109/tpwrs.2010.2051168.
- [13] MathWorks, "rng: Control random number generator," 2021. [Online]. Available: www.mathworks.com/help/matlab/ref/rng.html.
- [14] R. C. Basoni, "Modelagem e simulação de uma microrrede piloto isolada com provimento de referência através de um gerador síncrono virtual," Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, 2017.
- [15] Z. M. Alves, L. M. Cunico, G. Kroth, A. P. de Moraes, G. Marchesan, and G. C. Junior, "Fator de potência em instalações com geração distribuída: Estudo de caso em geração fotovoltaica de 73,28 kWp," Dec. 2020, doi: 10.48011/asba.v2i1.1280.