

## **Avaliação do Impacto da Conexão de Recursos Energéticos Distribuídos na Rede de Distribuição**

Saymon Fonseca Santos Mendes<sup>1</sup>, Carlos Henrique dos Santos<sup>2</sup>, Lina Paola Garces Negrete<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação - Universidade Federal de Goiás, saymonfsmendes@gmail.com

<sup>2</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação - Universidade Federal de Goiás

<sup>3</sup>Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação - Universidade Federal de Goiás

### **RESUMO**

Os Recursos Energéticos Distribuídos (REDs) têm-se tornado cada vez mais importantes no planejamento e operação nos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, devido ao impacto tecnológico, econômico e ambiental, assim como pelas incertezas inerentes envolvidas em sua modelagem. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento das perdas de energia no sistema devido à influência da inserção destes recursos. A metodologia foi desenvolvida por meio de uma simulação de Monte Carlo e o uso da ferramenta OpenDSS para avaliar as condições operativas por meio do fluxo de potência para validar os impactos gerados, especificamente nas perdas técnicas de energia ativa, perfis de tensão e o perfil de fornecimento na fonte, quando considerada como fonte de recursos distribuídos, a geração solar fotovoltaica e o sistema de armazenamento de energia com o uso de baterias. Os resultados proporcionaram a otimização de pontos estimados de alocação e dimensionamento quando considerada a redução das perdas totais de energia na rede. Portanto, conclui-se que, a implementação dessa metodologia proporciona a operação do sistema elétrico de forma segura e contribui com a qualidade de energia uma vez que se tem o controle na flutuação de tensão, redução das perdas técnicas e da potência fornecida pelos alimentadores da rede, ao realizar o dimensionamento e alocação correta dos recursos dentro do sistema de distribuição gerando benefícios para a concessionária e consumidor.

Palavras-chave: Fluxo de Potência. Geração Distribuída. Opends. Recursos Energéticos. Sistemas de Distribuição.

### **1. INTRODUÇÃO**

Os recursos energéticos distribuídos (RED) formam parte fundamental do novo cenário de operação das redes elétricas, sendo mais visíveis na rede de distribuição. Eles são compostos, principalmente, por geração distribuída (GD), armazenamento de energia, projetos de eficiência energética e/ou gerenciamento pelo lado da unidade consumidora.

A reestruturação do setor elétrico ocorrida nos últimos anos tem possibilitado que os sistemas elétricos de distribuição (SDEE) sejam submetidos a intensas mudanças relacionadas à inserção de novas tecnologias. Dessa forma, tem aumentado o interesse pela instalação de

GD, tendo benefícios pelo fato de apresentarem vantagens para uma operação mais eficiente e econômica das redes de distribuição, podendo estas GD serem a partir de fontes renováveis, como energia solar e eólica. Com a publicação da Resolução Normativa No. 482/2012 da ANEEL (ANEEL, 2012), foi concedida ao consumidor brasileiro a oportunidade de gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada, bem como fornecer o excesso de energia para a rede de distribuição local. Devido à crescente demanda por um aumento gradual do uso de energias renováveis nas matrizes energéticas, houve um impulso na expansão dos sistemas de Geração Distribuída e Sistemas de Armazenamento de Energia, por meio do uso de baterias. Essa expansão trouxe benefícios tanto para as concessionárias elétricas quanto para os consumidores.

Do ponto de vista financeiro, isso é atrativo, pois os investimentos e o tempo necessários para a instalação e utilização dos RED são menores em comparação com grandes usinas de geração. No entanto, a instalação pode ter impactos negativos no funcionamento das redes de distribuição. Alguns desses impactos incluem possíveis elevações de tensão que podem danificar os equipamentos, reversão no fluxo de potência afetando a operação dos sistemas de proteção e reguladores, e flutuações de tensão que podem exigir uma atuação mais frequente dos reguladores de tensão, resultando em maior desgaste desses equipamentos. Devido a esses impactos, é importante realizar estudos para a conexão dos RED no sistema, a fim de que a alocação e o dimensionamento dos recursos energéticos distribuídos sejam feitos de forma estratégica e apropriada. Isso permite obter os benefícios oferecidos por eles e garante que a operação da rede seja realizada dentro dos limites físicos e operacionais. Decisões tomadas sem critérios de planejamento podem resultar em prejuízos significativos para todos os envolvidos na operação e uso das redes. Portanto, é essencial adotar uma abordagem cuidadosa e planejada ao utilizar essa tecnologia.

Com base nas análises de planejamento e nos potenciais impactos de um dimensionamento, este trabalho propõe uma metodologia para avaliar o impacto da alocação de geradores trifásicos distribuídos e sistemas de armazenamento de energia com o uso de baterias em redes elétricas de distribuição, com foco principalmente no perfil das perdas técnicas ativas totais de energia do sistema. O objetivo principal é avaliar o impacto dos recursos energéticos distribuídos na rede de distribuição de energia elétrica por meio da implementação de uma Simulação de Monte Carlo, utilizando como variáveis aleatórias: os perfis de carga de cada consumidor, a potência injetada pelas unidades de GD, a alocação

das unidades de GD, o perfil de carga/descarga e alocação do baterias e sua capacidade de armazenamento e a análise do fluxo de potência com o uso do software OpenDSS.

## **2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Revisão da Literatura**

O sistema elétrico compreende a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. O transporte de energia, em qualquer um desses estágios, resulta em perdas técnicas relacionadas ao aquecimento dos condutores (Efeito Joule), que transforma energia elétrica em energia térmica, bem como perdas nos núcleos dos transformadores e perdas dielétricas. Essas perdas são influenciadas pelo carregamento do sistema (carga leve, média ou pesada) e pela configuração da rede. Embora as perdas técnicas sejam inerentes ao sistema elétrico, a otimização dessas perdas vem sendo avaliada desde 1975. O estudo pioneiro de Merlin e Back (1975), analisou a redução das perdas ativas por meio da reconfiguração de redes, sendo posteriormente abordado de forma diferente por Baran e Wu (1989).

Além da reconfiguração da rede, NG, SALAMA e CHIKHANI (2000a) estudaram a alocação de capacitores para compensação de potência reativa, visando à redução de perdas no sistema de distribuição de energia. No entanto, as perdas nos sistemas elétricos estão diretamente relacionadas à distribuição e à intensidade do fluxo de potência nas redes que os compõem. Com a presença da GD, ocorre uma alteração na distribuição do fluxo, afetando o carregamento das linhas de distribuição e, conseqüentemente, modificando o comportamento das perdas (Ayres, 2010).

No trabalho desenvolvido por Mendes, Silva, Negrete e Oliveira (2021), é realizado uma análise do impacto do fornecimento de potência da GD no sistema de distribuição sob o perfil de perdas. O sistema utilizado como referência foi o IEEE-34 barras. A metodologia aplicada foi avaliar o comportamento da redução de perdas do sistema quando se varia o valor de potência fornecido pelo recurso distribuído. O qual foi obtido uma curva característica de redução de perdas sob a influência da presença da GD na rede, em que se observa um valor limite ótimo de potência para obter a redução de perdas no sistema, sendo que, a partir de um valor acima do ótimo de fornecimento, o carregamento causado pela presença da GD causará impactos negativos para o sistema, ocasionando em aumento das perdas técnicas.

## **3. METODOLOGIA EMPREGADA**

Neste trabalho, será realizada uma avaliação do impacto sobre as perdas totais de energia em um sistema de distribuição utilizando a Simulação de Monte Carlo considerando a inserção de recursos energéticos distribuídos. Serão alocadas duas unidades de Geração



simulação, são observados os perfis de tensão nos barramentos, sua capacidade máxima e as perdas totais de energia medidas a partir de um medidor conectado ao barramento da fonte. O parâmetro de perdas do sistema original,  $P_o$ , é utilizado como critério para avaliar e determinar a posição onde os REDs serão inseridos no circuito. Após a definição dos parâmetros de perdas do sistema sem a alocação dos REDs (Sistema Original), juntamente com seus respectivos perfis de tensão, o próximo passo é selecionar quais barramentos do sistema estarão disponíveis para a alocação. Para este estudo, foram escolhidos 100 barramentos, utilizando como critério aqueles que apresentam as maiores perdas técnicas e o maior fluxo de potência transmitido para cada barramento. Como exemplo, pode-se observar a Tabela 1 a seguir, que apresenta um sistema hipotético com apenas 2 barramentos.

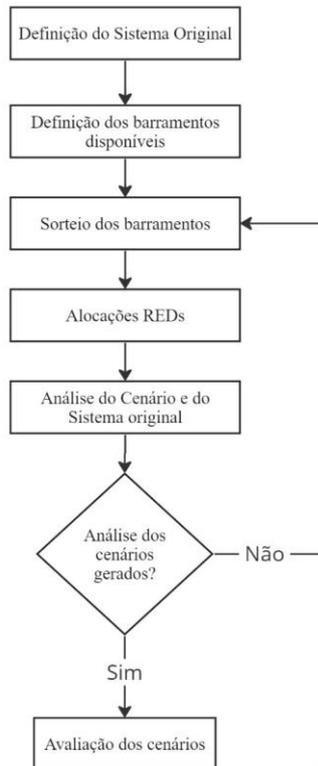
TABELA 1. DEFINIÇÃO DOS PESOS DE CADA BARRAMENTO SOBRE O SISTEMA

| <b>Barramento</b>     | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>Sistema</b> |
|-----------------------|----------|----------|----------------|
| Perdas Técnicas (kWh) | 89,00    | 123,00   | 1.200,00       |
| Energia (kWh)         | 400,00   | 650,00   | 10.000,00      |
| Perdas Técnicas (%)   | 7,42     | 10,25    | 100,00         |
| Energia (%)           | 4,00     | 6,50     | 100,00         |
| Peso Geral (%)        | 40,53    | 59,47    | 100,00         |

Na Tabela 1, a linha "Energia (%)" representa a proporção da energia transmitida pelo barramento em relação à energia total transmitida por todos os demais barramentos. A linha "Perdas técnicas (%)" indica a proporção das perdas técnicas daquele barramento em relação às perdas técnicas totais do sistema. Por fim, a linha "Peso Geral (%)" combina os dois pesos anteriores e realiza uma comparação dessas características em relação ao sistema como um todo. Após determinar esses valores para todos os barramentos do sistema, foram selecionados os 100 barramentos com os maiores valores na característica "Peso Geral (%)" para o estudo. Após a escolha dos 100 barramentos, o processo de Simulação de Monte Carlo é iniciado. É definida a quantidade de cenários a serem analisados. Para cada cenário, são sorteados dois barramentos onde serão alocadas uma Bateria e uma GD em cada um. Em seguida, as principais informações do sistema são extraídas para cada cenário, incluindo as perdas técnicas, os níveis de tensão e o carregamento dos barramentos. Esse processo é

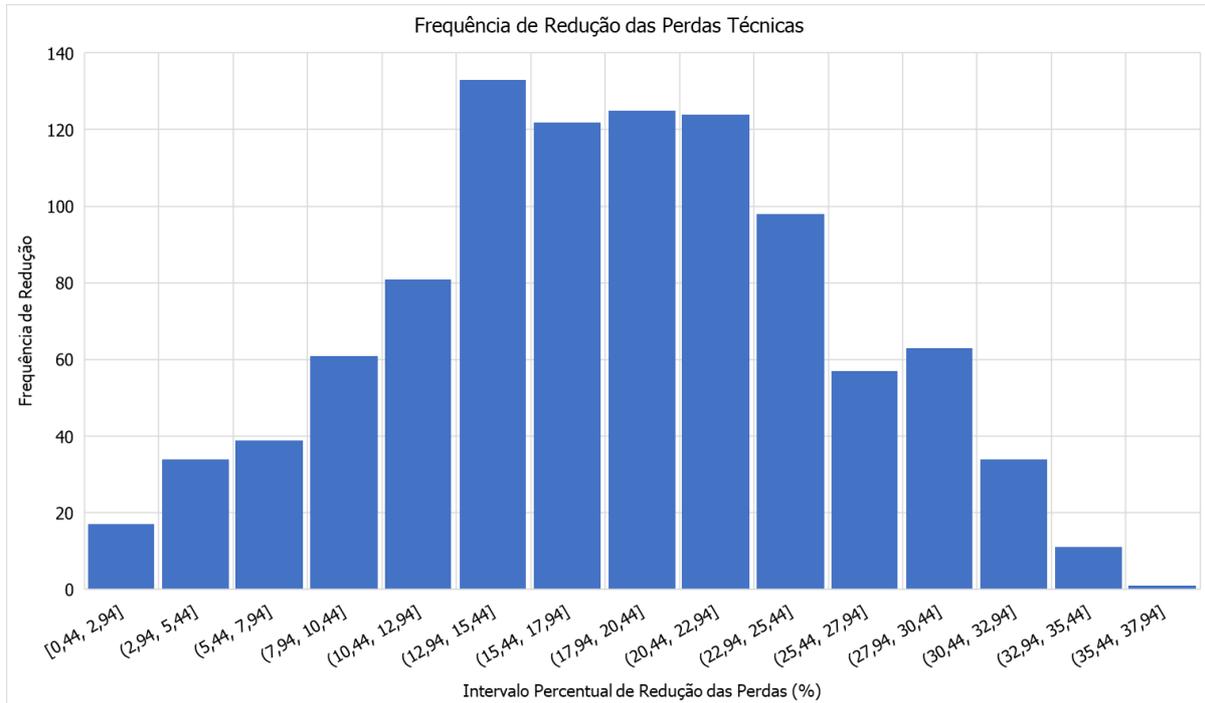
repetido até que a quantidade de cenários seja concluída. O fluxograma da metodologia é apresentado na Figura 3.

Figura 3. Fluxograma da metodologia.



#### 4. RESULTADOS

Com base na descrição da metodologia e no fluxograma apresentado, os principais resultados analisados são o comportamento das perdas totais de energia ativa, o perfil de fornecimento e o perfil de tensão do sistema conforme descrito na metodologia. A Figura 4 apresenta a frequência de ocorrência da redução percentual das perdas nos cenários gerados pela Simulação de Monte Carlo (SMC). No eixo horizontal, tem-se os percentuais de redução das perdas, enquanto no eixo vertical, tem-se as probabilidades de ocorrência dessas reduções. A função gaussiana de densidade de probabilidade indica que, em 68% dos casos, as perdas técnicas podem ser reduzidas aplicando os REDs dentro da faixa de  $10,44\% \leq \text{Redução (\%)} \leq 25,43\%$ . Essa faixa representa a dispersão mais próxima dos resultados obtidos pela SMC, conforme sua finalidade de avaliação.

**Figura 4. Frequência percentual de redução de perdas técnicas.**


Dessa forma, utilizando um cenário considerado um dos mais prováveis, conforme obtido pela SMC, é possível realizar a comparação e validação da metodologia aplicada no sistema para verificar as mudanças ocorridas com a inserção dos recursos energéticos distribuídos. A Figura 5 mostra o perfil de potência das duas GDs alocadas no sistema, enquanto as Figuras 6 e 7 apresentam o comportamento da Bateria 1 e Bateria 2 alocadas no sistema, respectivamente. Nas Figuras 6 e 7, o gráfico em azul (kWout) representa o perfil de fornecimento de energia da bateria para a rede, e o gráfico em laranja (kWIn) representa o perfil de carregamento da bateria. Esses gráficos ilustram como a geração distribuída e o armazenamento de energia afetam o fornecimento e o carregamento da rede ao longo do tempo.

Figura 5. Perfil de Potência das GDs.

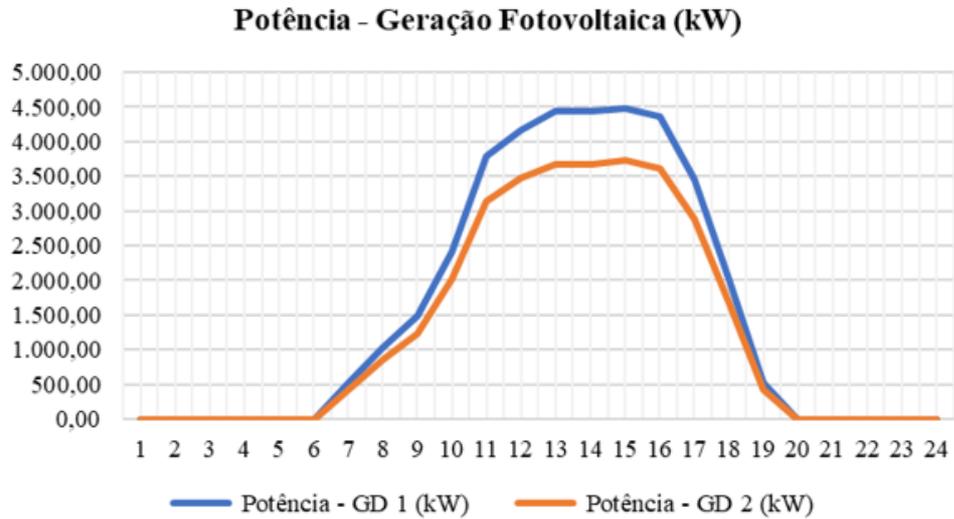


Figura 6. Perfil de Potência da Bateria

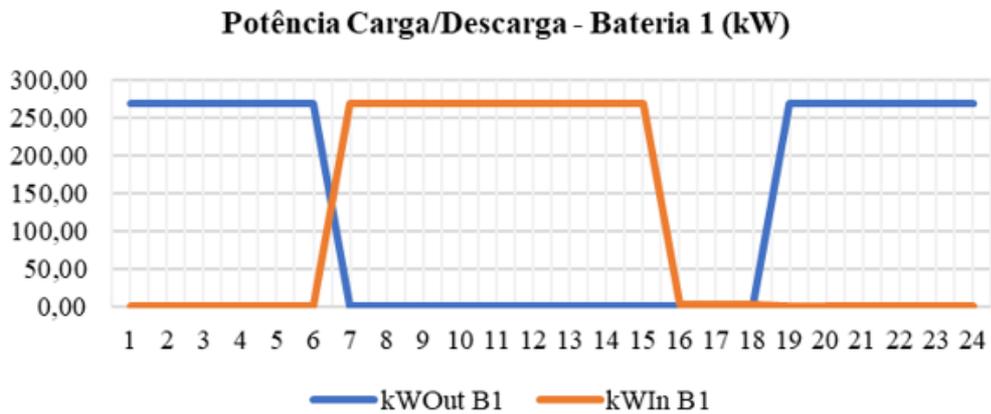
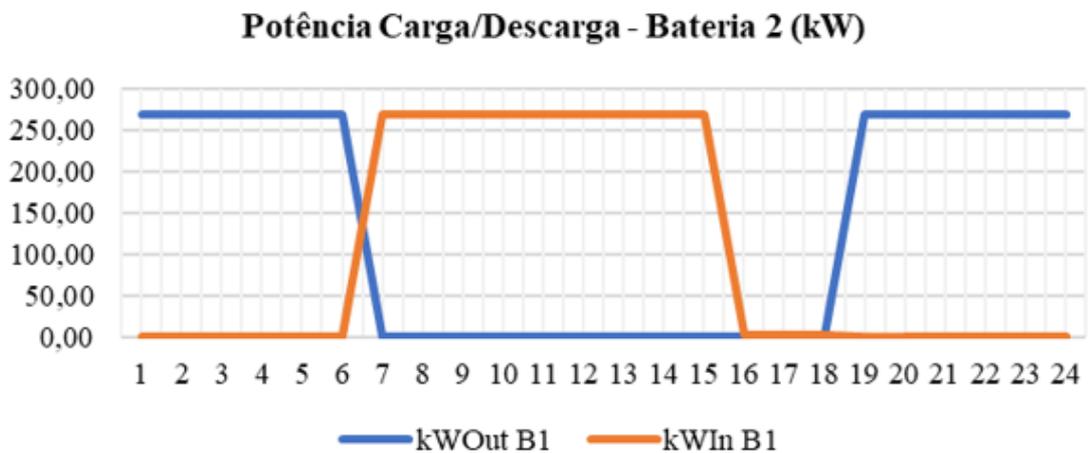
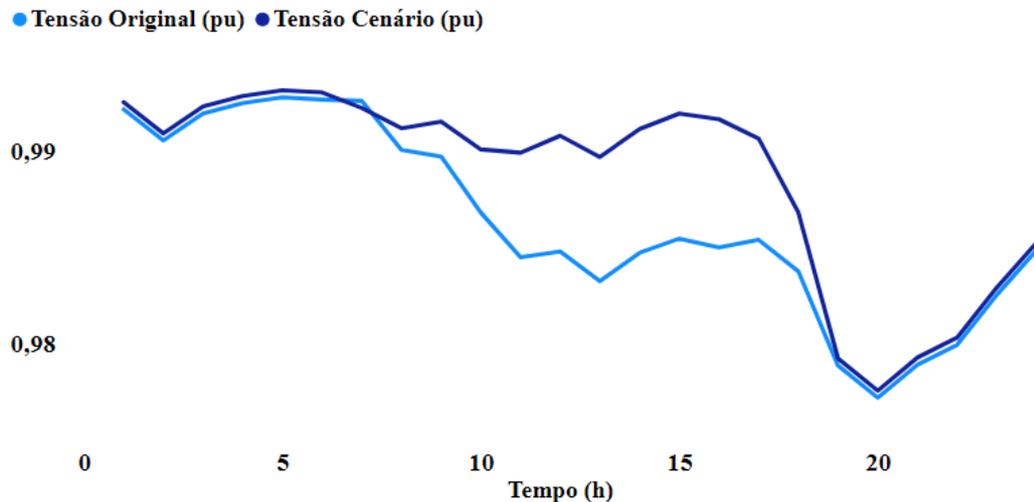


Figura 7. Perfil de Potência da Bateria



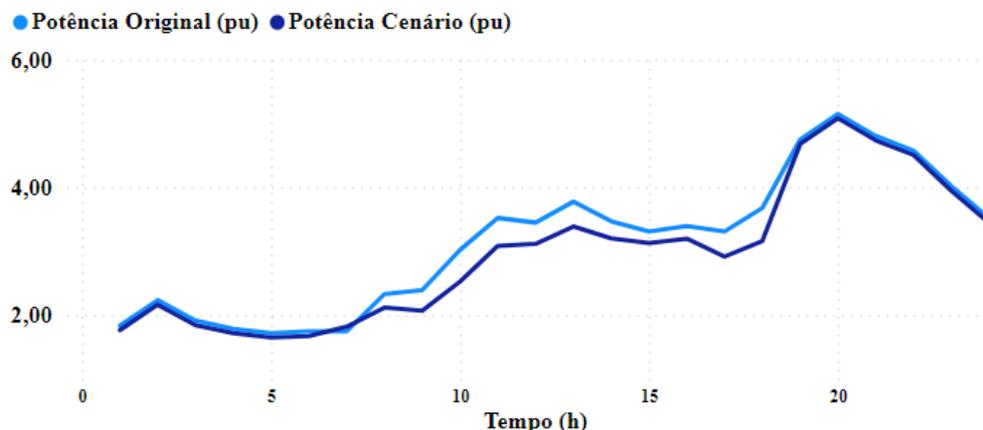
A Figura 8 apresenta o comparativo do perfil de tensão do sistema sem a inserção dos RED e o sistema com a alocação dos recursos. Observa-se, como os níveis de tensão foram melhorados ao longo do alimentador.

Figura 8. Comparativo do perfil de tensão do sistema sem RED e com RED alocado



A comparação entre o perfil de fornecimento do alimentador do sistema sem a inserção dos recursos energéticos distribuídos (RED) e o sistema com a alocação dos RED é ilustrada na Figura 9. É importante destacar que essa mudança é especialmente perceptível nos intervalos de tempo em que a geração de energia solar fotovoltaica está disponível e injetando potência efetivamente na rede, assim como quando a bateria está fornecendo energia para a rede. Dessa forma, é possível observar o alívio no fornecimento de energia por parte do alimentador devido à presença dos recursos energético.

Figura 9. Comparativo do perfil de fornecimento do alimentador sem e com os REDs alocados



## **5. CONCLUSÕES**

A metodologia proposta neste trabalho demonstrou ser altamente eficiente para avaliar o desempenho das redes de distribuição com a influência dos recursos energéticos distribuídos (RED) no sistema. Por meio dessa abordagem, foi possível constatar que as perdas totais de energia ativa no sistema podem ser reduzidas pela alocação estratégica de unidades de geração distribuída de energia solar fotovoltaica em pontos específicos da rede de distribuição. A inclusão de sistemas de armazenamento de energia também beneficia a redução das perdas, além de auxiliar na redução da demanda de energia, otimizando a operação do sistema e evitando ou adiando a necessidade urgente de investimentos na rede.

Com base nos resultados obtidos, foi observado que a potência gerada e a localização dos RED influenciam significativamente o sistema, podendo resultar em uma redução de perdas técnicas na faixa de 10,44% a 25,43%. Nesse contexto, o OpenDSS mostrou-se uma ferramenta de análise essencial e robusta, permitindo considerar aspectos que podem ser modelados de maneira mais realista, como os perfis de carga e os modelos que definem a geração de potência das usinas fotovoltaicas e dos sistemas de armazenamento de energia. Portanto, estudos que visam avaliar os impactos nos sistemas de distribuição de energia elétrica por meio da alocação de sistemas distribuídos de geração de energia e sistemas de armazenamento de energia com o uso de baterias ao longo dos barramentos do circuito são benéficos, pois fornecem uma melhor compreensão das vantagens técnicas para o sistema, auxiliando na tomada de decisões, seja para permitir o acesso a esses empreendimentos ou sinalizar a necessidade de novos investimentos na rede.

## **6. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte na realização deste trabalho, por meio da Chamada CNPq/MCTI/FNDCT Nº 18/2021 - Faixa A - Grupos Emergentes - processo No. 408898/2021-6. Também, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro por meio do Programa CAPES PDPG Pós-Doutorado Estratégico Edital Nº 16/2022 - Processo 88887.692441/2022-00.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica] (2012), **Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências**, Brasília: Resolução Normativa nº 482/2012, 17 de Abril de 2012. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>. Acesso em: 06/11/2023.

Ayres, H. M. (2010), **Desenvolvimento de metodologias de análise de geradores distribuídos em sistemas de distribuição de energia elétrica**, 176 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1613526>. Acesso em: 06/11/2023.

Mendes, S. F. S., Silva, C., Negrete, G.P.L., Oliveira, E. M. (2021), **Impacto Do Dimensionamento Da Geração Distribuída Nas Perdas Elétricas Dos Sistemas De Distribuição Usando Opendss**, Anais Da XIV Conferência Brasileira Sobre Qualidade Da Energia Elétrica, 2021, Online. Disponível em: <https://proceedings.science/cbqee-2021/trabalhos/impacto-do-dimensionamento-da-geracao-distribuida-nas-perdas-eletricas-dos-siste?lang=pt-br>. Acesso em: 06/11/2023.

M. E. Baran and F. F. Wu (1989), "**Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing**," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, April 1989. DOI: 10.1109/61.25627.

Merlin, A.; Back, H (1975), **Search for a minimal-loss operating spnning tree configuration in an urban power distribution system**, In: POWER SYSTEM COMPUTATION CONFERENCE, 5., 1975, Cambridge. Proceedings... Zurich: PSCC, 1975. p. 1-18.

NG, H.N.; Salama, M.M.A.; Chikhani, A.y (2000). **Classification of capacitor allocation techniques**. Ieee Transactions On Power Delivery, v. 15, n. 1, p. 387-392, 2000. DOI: 10.1109/61.847278.