

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS  
CAMPUS ITUMBIARA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VICTOR LUCAS ROSA GOMES

ANÁLISE DE PERDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO COM A INSERÇÃO DE  
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

ITUMBIARA-GO

2023



**INSTITUTO FEDERAL**  
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

### **TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

#### **Identificação da Produção Técnico-Científica**

- |                                                                      |                                                         |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Tese                                        | <input type="checkbox"/> Artigo Científico              |
| <input type="checkbox"/> Dissertação                                 | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização                 | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC - Graduação                  | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ |                                                         |

Nome Completo do Autor: Victor Lucas Rosa Gomes

Matrícula: 20191040070190

Título do Trabalho: Análise de perdas em sistemas de distribuição com a inserção de geração distribuída

#### **Autorização - Marque uma das opções**

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.  
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.  
☐ Outra justificativa: \_\_\_\_\_

### **DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 26/12/2023.

Local Data



Documento assinado digitalmente  
VICTOR LUCAS ROSA GOMES  
Data: 27/12/2023 17:16:09-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

VICTOR LUCAS ROSA GOMES

ANÁLISE DE PERDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO COM A INSERÇÃO DE  
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Campus Itumbiara/IFG, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Diogo Soares Resende.

ITUMBIARA-GO

2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

G633a      Gomes, Victor Lucas Rosa  
              Análise de perdas em sistemas de distribuição com a  
              inserção de geração distribuída. / Victor Lucas Rosa Gomes. --  
              Itumbiara, 2023.  
              46p. : il.

              Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia  
              Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia  
              de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2023.

              Orientador: Prof. Dr. Diego Soares Resende.

              1. Geração distribuída de energia elétrica. 2. Energia  
              elétrica - Redução. 3. Energia elétrica - Racionamento. I.  
              Título. II. Resende, Diego Soares. III. Instituto Federal de  
              Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 621.319

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara  
Bibliotecária: Rosiane Gonçalves de Lima CRB1/1684



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**VICTOR LUCAS ROSA GOMES**

### **ANÁLISE DE PERDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO COM A INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Campus Itumbiara/IFG, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica sob orientação do (a) Prof.(a) Dr. Diogo Soares Resende.

Aprovado em 15 de dezembro de 2023

#### **BANCA EXAMINADORA**



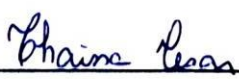
---

Prof. Dr. Diogo Soares Resende



---

Prof. Dr. Bruno G. G. L. Zambolini Vicente



---

Profa. Ma. Thaissa de Melo Cesar

## DEDICATÓRIA

*Primeiramente a Deus por ter me dado força e sabedoria. Aos meus pais Edmilson Vicente Gomes e Maria José Rosa Gomes além de toda minha família por todo apoio nessa jornada.*

## **AGRADECIMENTOS**

Neste momento de agradecimento, gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que estiveram ao meu lado durante esse percurso.

Primeiramente, minha profunda gratidão a Deus. Minha fé em Deus me deu a força, a coragem e a confiança para perseverar, mesmo nas situações mais difíceis. Acredito que Deus guiou meus passos e me abençoou com oportunidades e recursos para concluir minha graduação.

Em seguida minha família, que merece meu mais profundo agradecimento. Seu apoio constante, encorajamento e amor incondicional foram o alicerce que me sustentou em momentos de desafio. Minha família sempre esteve presente, acreditando em mim, mesmo quando eu duvidava de mim mesmo. Suas palavras de incentivo e apoio financeiro fizeram toda a diferença e permitiram que eu chegasse até aqui.

Minha namorada também desempenhou um papel fundamental nessa jornada. Sua paciência, compreensão e amor me deram força nos momentos de dúvida e cansaço. Ter você ao meu lado tornou essa jornada mais significativa e alegre.

Aos meus colegas de faculdade, quero expressar minha gratidão por nossa parceria e colaboração ao longo desses anos. Juntos, enfrentamos desafios acadêmicos, compartilhamos conhecimentos e experiências, e nós apoiamos mutuamente. Sem a amizade que desenvolvemos, essa jornada teria sido muito mais difícil.

Nenhum de nós alcança nossos objetivos sozinhos, e sou profundamente grato por ter tantas pessoas maravilhosas em minha vida. Cada um de vocês desempenhou um papel fundamental em minha jornada acadêmica.

Obrigado a todos por fazerem parte dessa conquista. Este TCC é dedicado a vocês, e espero que saibam o que são importantes em minha vida.

*“Confia ao Senhor as tuas obras, e teus  
pensamentos serão estabelecidos.”*

**Provérbios 16:3**

## RESUMO

A geração distribuída (GD) tem obtido reconhecimento em todo o mundo, inclusive no Brasil, onde políticas de promoção e incentivo e a integração de fontes de energia renovável nas redes elétricas têm sido implementadas. Isso destaca a importância da tendência global em direção a uma matriz energética mais diversificada e sustentável. Sua introdução representa uma mudança significativa no sistema elétrico tradicional, demandando adaptações por parte das distribuidoras para se manterem eficientes e competitivas diante deste novo cenário. A proximidade das fontes de geração em relação aos consumidores apresenta uma série de vantagens, tanto para as empresas responsáveis pela transmissão e distribuição de energia elétrica quanto para os consumidores finais. Primeiramente, essa proximidade resulta em economias consideráveis nos gastos relacionados à operação e à manutenção das linhas de transmissão e distribuição, reduzindo as perdas e a necessidade de dispositivos de segurança. Além disso, a utilização da energia gerada no próprio local de consumo é capaz não apenas de diminuir as perdas, mas também pode contribuir para a diminuição dos custos que recaem sobre os consumidores finais, fazendo com que a geração distribuída seja uma opção mais atrativa em comparação com a geração e distribuição de energia em longas distâncias. Diante disso, o presente trabalho busca identificar cenários específicos, incluindo a localização estratégica da GD e as variações na demanda de carga, em que a incorporação de fontes distribuídas de energia elétrica resulta em uma diminuição substancial das perdas no sistema, contribuindo para a eficiência e a sustentabilidade do sistema elétrico.

Palavras-chaves: geração distribuída, perdas, energia, sistema, redução.

## **ABSTRACT**

*Distributed generation (DG) has gained recognition around the world, including in Brazil, where promotion and incentive policies and the integration of renewable energy sources into electrical grids have been implemented. This highlights the importance of the global trend towards a more diverse and sustainable energy matrix. Its introduction represents a significant change in the traditional electrical system, requiring adaptations from distributors to remain efficient and competitive in this new scenario. The proximity of generation sources to consumers presents a series of advantages, both for companies responsible for the transmission and distribution of electrical energy and for end consumers. Firstly, this proximity results in considerable savings in expenses related to the operation and maintenance of transmission and distribution lines, reducing losses and the need for safety devices. Furthermore, the use of energy generated at the point of consumption is capable of not only reducing losses but can also contribute to reducing the costs that fall on final consumers, making distributed generation a more attractive option in comparison with the generation and distribution of energy over long distances. Given this, the present work seeks to identify specific scenarios, including the strategic location of DG and variations in load demand, in which the incorporation of distributed sources of electrical energy results in a substantial reduction in losses in the system, contributing to efficiency and the sustainability of the electrical system.*

*Keywords: distributed generation, losses, energy, system, reduction.*

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Classificação de Geração .....                                         | 19 |
| Figura 2 - Perdas de Energia.....                                                 | 22 |
| Figura 3 - Perdas técnicas para diferentes níveis de penetração e dispersão ..... | 25 |
| Figura 4 - Perfil típico de carga residencial num dia útil.....                   | 26 |
| Figura 5 - Curva de geração solar para usina conectada ao SIN.....                | 27 |
| Figura 6 - Exemplo de Funcionamento Energy Shifting .....                         | 28 |
| Figura 7 - Modelo de Teste IEEE 123 Barras.....                                   | 29 |
| Figura 8 - Área de simulação .....                                                | 30 |
| Figura 9 - Curva de Carga.....                                                    | 30 |
| Figura 10 - Curva de Irradiância.....                                             | 31 |
| Figura 11 - Gráfico de Perdas no Sistema com 5% de GD inserida .....              | 32 |
| Figura 12 - Variação de quantidade de barras com 5% de GD.....                    | 33 |
| Figura 13 - Gráfico de Perdas no Sistema com 10% de GD inserida .....             | 34 |
| Figura 14 - Variação de quantidade de barras com 10% de GD.....                   | 35 |
| Figura 15 - Gráfico de Perdas no Sistema com 15% de GD inserida .....             | 36 |
| Figura 16 - Variação de quantidade de barras com 15% de GD.....                   | 37 |
| Figura 17 - Gráfico de Perdas no Sistema com 20% de GD inserida .....             | 38 |
| Figura 18 - Variação da quantidade de barras com 20% de GD.....                   | 39 |
| Figura 19 - Comparação de Perdas entre Potências de GD diferentes.....            | 40 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|       |                                          |
|-------|------------------------------------------|
| GD    | Unidade(s) de Geração Distribuída        |
| PDE   | Plano Decimal de Energia                 |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica     |
| UC    | Unidade Consumidora                      |
| TUSD  | Tarifa do Uso do Sistema de Distribuição |
| EPE   | Empresa de Pesquisa Energética           |
| CIP   | Contribuição de Iluminação Pública       |

## SUMÁRIO

|       |                                            |    |
|-------|--------------------------------------------|----|
| 1     | INTRODUÇÃO.....                            | 12 |
| 1.1   | JUSTIFICATIVA.....                         | 12 |
| 1.2   | OBJETIVOS .....                            | 13 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral .....                       | 13 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos.....                 | 13 |
| 2     | REFERENCIAL TEÓRICO.....                   | 14 |
| 2.1   | O SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA.....         | 14 |
| 2.2   | SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO .....              | 14 |
| 2.3   | TARIFAÇÃO.....                             | 15 |
| 2.4   | GERAÇÃO DISTRIBUÍDA .....                  | 17 |
| 2.5   | NORMAS NO BRASIL.....                      | 20 |
| 2.6   | PERDAS DE ENERGIA .....                    | 21 |
| 2.7   | PERDAS TÉCNICAS EM UM SISTEMA COM GD ..... | 23 |
| 2.8   | PONTO ÓTIMO .....                          | 25 |
| 2.9   | PERFIS DE CARGA E GERAÇÃO.....             | 25 |
| 3     | METODOLOGIA.....                           | 28 |
| 4     | RESULTADOS .....                           | 32 |
| 4.1   | CENÁRIO 1.....                             | 32 |
| 4.2   | CENÁRIO 2.....                             | 33 |
| 4.3   | CENÁRIO 3.....                             | 34 |
| 4.4   | CENÁRIO 4.....                             | 35 |
| 4.5   | CENÁRIO 5.....                             | 36 |
| 4.6   | CENÁRIO 6.....                             | 37 |
| 4.7   | CENÁRIO 7.....                             | 38 |
| 4.8   | CENÁRIO 8.....                             | 39 |
| 4.9   | CENÁRIO 9.....                             | 40 |

|     |                            |    |
|-----|----------------------------|----|
| 5   | CONSIDERAÇÕES FINAIS ..... | 41 |
| 5.1 | CONCLUSÃO .....            | 41 |
| 6   | REFERÊNCIAS .....          | 42 |

## **1 INTRODUÇÃO**

A geração tradicional centralizada de energia elétrica, a partir de grandes centrais geradoras distantes dos centros urbanos, gera um fluxo linear de potência até os consumidores finais. A ascensão da Geração Distribuída (GD) traz desafios para as empresas distribuidoras de energia, que precisam se adaptar a políticas fomentadoras e a um mercado em expansão. A introdução da GD implica mudanças substanciais no sistema elétrico tradicional, exigindo adaptações das distribuidoras para mantê-las competitivas (SANTOS JR, 2022).

O Brasil e outras nações implementaram políticas de incentivo ao GD e à energia renovável, resultando em um aumento específico de consumidores tornando-se prosumidores. No entanto, essa expansão enfrenta desafios de integração e gestão das redes de distribuição, especialmente considerando localização, fonte de energia e capacidade das tecnologias geradoras.

Para mitigar as perdas de energia enfrentadas pelo sistema de distribuição, técnicas como a reconfiguração do sistema e alocação de capacitores são algumas propostas, porém uma alternativa em destaque é a geração distribuída com energia solar, que ganha cada vez mais força pela redução das perdas no transporte de energia devido sua proximidade com as cargas. O crescimento rápido da GD impacta regulamentações, fluxo de energia e mercado energético, exigindo investimentos adicionais em infraestrutura das distribuidoras. Apesar dos benefícios econômicos e ambientais do GD, o desenvolvimento contínuo tanto tecnológico quanto regulatório é essencial para garantir sua eficiência e estabilidade no cenário energético atual.

### **1.1 JUSTIFICATIVA**

Este trabalho é motivado pela urgência em enfrentar os desafios contemporâneos do setor energético. O setor enfrenta uma demanda crescente por eletricidade, juntamente com a necessidade premente de reduzir perdas nos sistemas de transmissão e distribuição, ao mesmo tempo em que busca fontes de energia mais sustentáveis.

O problema das perdas de energia durante a transmissão e distribuição é um desafio persistente para as empresas de energia. A inclusão da geração distribuída apresenta-se como uma solução promissora, permitindo a produção de energia próxima ao ponto de consumo, minimizando assim as perdas.

A escolha de desenvolver um programa de simulação no MATLAB® demonstra um comprometimento com uma abordagem técnica. Essa simulação possibilitará uma análise

detalhada das condições em que a geração distribuída oferece vantagens significativas na redução de perdas de energia do sistema IEEE 123 barras. (KERSTING, 1991)

Além disso, a pesquisa se alinha com as tendências globais de transição para fontes de energia mais distribuídas e sustentáveis. Ao abordar questões práticas e acompanhar essas tendências, este trabalho contribuirá para o desenvolvimento sustentável, diminuindo a necessidade de expansão de infraestrutura e minimizando as emissões associadas ao transporte de eletricidade.

Portanto este estudo não aborda apenas questões críticas no setor de energia, mas também propõe soluções inovadoras e sustentáveis. A análise abrangente da proposta fornecerá ideias para aqueles envolvidos na otimização de sistemas de geração e distribuição de energia elétrica, podendo assim ter uma contribuição significativa para o avanço do campo.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Realizar uma análise abrangente das condições em que a geração distribuída (GD) oferece vantagens significativas em termos de redução de perdas de energia em sistemas de literatura, por meio do desenvolvimento de um programa de simulação no MATLAB<sup>®</sup>.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar uma revisão bibliográfica abrangente para compreender os conceitos, benefícios e desafios da geração distribuída em sistemas elétricos.
- Desenvolver um programa de simulação no MATLAB<sup>®</sup> que modele o comportamento de sistemas reais, considerando a incorporação de fontes de GD em diferentes cenários.
- Executar simulações variando parâmetros-chave, como a quantidade de GD, a localização estratégica da GD e a demanda de carga, para avaliar o impacto na redução de perdas de energia.
- Analisar e interpretar os resultados das simulações para identificar as condições em que a GD é mais vantajosa em termos de minimização de perdas de energia.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 O SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA**

O sistema de energia elétrica é baseado na utilização de centrais geradoras de grande porte, como hidroelétricas, termoeletricas, nucleares, entre outras modalidades de geração. Geralmente, essas centrais estão localizadas em regiões distantes e afastadas dos centros urbanos, próximas aos recursos naturais necessários para a conversão de diferentes formas de energia, como a potencial, cinética ou térmica, em eletricidade (SANTOS JR, 2022).

Essa abordagem centralizada na geração de energia elétrica implica em um fluxo unidirecional de potência em sistemas de distribuição de energia elétrica, que começa nas centrais geradoras e se direciona de forma final aos consumidores em suas residências, estabelecimentos comerciais ou áreas rurais.

No entanto, a implementação de unidades com Geração Distribuída (GD) impacta diretamente as despesas e ganhos das empresas distribuidoras de energia elétrica. Com a presença de políticas fomentadoras e um mercado em expansão contínua, torna-se essencial que essas companhias procurem opções para atenuar os efeitos e enfrentar os obstáculos surgidos em decorrência da incorporação dessas tecnologias (FIUZA, 2022). A introdução da GD representa uma mudança significativa no sistema elétrico tradicional, demandando adaptações por parte das distribuidoras para se manterem eficientes e competitivas diante desse novo cenário.

Diante desse cenário de expansão no consumo de energia elétrica, torna-se inevitável a necessidade de diversificar as fontes de geração, incluindo a implementação do modelo de geração distribuída. As projeções indicam que, no Brasil, a capacidade instalada de geração distribuída deve aumentar significativamente, passando de 4,2 GW em 2020 para 24,5 GW até 2030 (PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA 2030, 2021). Essa expansão da geração distribuída desempenhará um papel fundamental na garantia do fornecimento de energia elétrica em meio ao crescimento da demanda, contribuindo para a diversificação da matriz energética e a sustentabilidade do setor energético no país.

### **2.2 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO**

Os agentes de distribuição consistem em empresas que detêm concessão, permissão ou autorização para efetuar a distribuição de energia elétrica em uma região designada. Essas

companhias desempenham um papel crucial no fornecimento de energia, adquirindo eletricidade do sistema de transmissão e distribuindo-a para todos os consumidores ligados às suas redes. Suas responsabilidades abrangem a operação, manutenção e expansão do sistema de distribuição, bem como a venda de eletricidade para os consumidores cativos, sem permissão para realizar outras atividades, como a geração e transmissão de energia (EVOLUT,2022) (ANEEL, 2021).

No entanto, com o crescimento populacional contínuo e o desenvolvimento industrial, a demanda global por energia está em constante aumento. No contexto brasileiro, o Plano Decenal de Energia 2030 (PDE 2030) projeta que até o ano de 2030, a população do Brasil atinja 225,4 milhões de habitantes, representando um crescimento anual de 0,6% em relação a 2019. Além disso, o consumo de energia elétrica está estimado para aumentar a uma taxa anual de 2,2% (PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA 2030, 2021).

A operação eficiente e confiável dos sistemas de distribuição elétrica é essencial para garantir a disponibilidade de energia para os consumidores. Quaisquer ineficiências, perdas ou falhas no sistema podem resultar em interrupções no fornecimento e afetar a qualidade do serviço prestado.

Portanto, ao investigar o impacto da geração distribuída na redução das perdas de energia, é necessário considerar como essa tecnologia se integra e interage com os componentes e operações dos sistemas de distribuição elétrica existentes.

## **2.3 TARIFICAÇÃO**

Um ponto de considerável interesse para as distribuidoras é a configuração das tarifas e os níveis tarifários estipulados pela ANEEL. Esses aspectos são planejados com o objetivo de assegurar o equilíbrio econômico-financeiro das empresas envolvidas, ao mesmo tempo em que visam proteger os consumidores contra os potenciais efeitos prejudiciais do monopólio (CASTRO; GOUVEA; MOSZKWICZ, 2019).

A maneira como as tarifas são estruturadas para as residências segue modelos específicos, os quais levam em consideração um único fator, que está diretamente relacionado à quantidade de energia elétrica utilizada. Nesse enfoque, tanto os gastos estáveis quanto os gastos variáveis da distribuidora são incorporados. Como resultado, a tarifa por cada unidade de consumo, geralmente medida em kWh ao longo de um período determinado pelas regulamentações, é então determinada (ANEEL, 2023).

A estrutura da tarifa de energia elétrica deve ser formulada levando em consideração o princípio da eficiência econômica. Ao mesmo tempo, é crucial que essa estrutura respeite os princípios de equidade, simplicidade, transparência e estabilidade, garantindo também que não haja discriminação entre os consumidores. O propósito dessa abordagem é permitir que a distribuidora recupere os custos de maneira justa (COSSENT et al., 2011).

No entanto, quando a geração distribuída (GD) é integrada ao sistema de distribuição e se baseia em uma tarifa vinculada ao volume, isso pode resultar na impossibilidade de a distribuidora recuperar todos os custos fixos relacionados à rede. Outra tarifa que é afetada devido à essa integração é a contribuição de iluminação pública (CIP), que é um tributo municipal destinado a financiar a iluminação pública, arrecadado por meio das faturas de energia elétrica. A GD, ao gerar energia próxima ao local de consumo, pode reduzir a demanda da rede elétrica, afetando indiretamente a base de cálculo da CIP que muitas vezes é vinculada ao consumo de energia. Essa redução na demanda pode levar a desafios na cobertura dos custos fixos relacionados à infraestrutura de iluminação pública, exigindo uma revisão ou ajuste da forma como a CIP é aplicada e calculada em face das mudanças no padrão de consumo energético (NEOENERGIA, 2023).

Para evitar esse cenário, é viabilizado um aumento na tarifa de eletricidade, impactando os consumidores regulares. Isso acontece porque os produtores-consumidores (prosumidores) conseguem compensar esse aumento com os créditos de energia que geram. Dessa forma, os consumidores regulares acabam indiretamente financiando a incorporação da GD, constituindo o que é conhecido como um subsídio cruzado evidente (CASTANEDA et al., 2017; PICCIARIELLO et al., 2015).

Devido à vulnerabilidade dos consumidores cativos em relação aos incrementos tarifários, há um interesse ampliado na adoção das tecnologias de geração distribuída, o que amplifica a situação mencionada. Desde 2012, as empresas distribuidoras têm enfrentado um desafio significativo em relação ao excesso de contratos de fornecimento de energia, atribuído à gradual diminuição do consumo de eletricidade por parte dos consumidores cativos, impulsionada pela expansão dos sistemas fotovoltaicos no mercado nacional. A progressiva adesão dos consumidores às tecnologias de GD afeta as distribuidoras tanto em curto prazo quanto de forma duradoura (GOUVÊA, 2019).

## **2.4 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

A ideia subjacente à utilização de unidades de geração distribuída implica que a produção de energia elétrica se origina de diversas fontes localizadas próximas ou juntas aos consumidores. Essas fontes estão interligadas à rede de distribuição e normalmente operam em baixa tensão, frequentemente fazendo uso de fontes de energia renovável. Essa proximidade das fontes de geração em relação aos consumidores traz diversas vantagens, tanto para as empresas encarregadas da transmissão e distribuição de energia elétrica quanto para os consumidores finais (SANTOS JR, 2022).

Destaca-se, que a proximidade das fontes de geração reduz as despesas relacionadas à manutenção das linhas de distribuição, minimizando perdas e a necessidade de dispositivos de segurança. Além disso, o aproveitamento da energia produzida no próprio local de consumo não apenas diminui as perdas, mas também contribui para a redução dos custos suportados pelos consumidores finais. Como resultado, a geração distribuída torna-se mais atrativa em comparação com a geração e distribuição em grandes distâncias (SANTOS JR, 2022).

Esse conceito de geração distribuída tem ganhado destaque globalmente, com cerca de 144 nações, incluindo o Brasil, implementando políticas de estímulo à geração distribuída e à incorporação de energia renovável em suas matrizes energéticas (SIOSHANSI, 2016).

Existem duas formas principais de obter financiamento para investir em energia solar: financiamento solar e linha de crédito. Cada uma possui processos diferentes: a linha de crédito oferece uma aprovação rápida, enquanto o financiamento solar é mais burocrático. No caso do financiamento solar, o sistema pertence à instituição financeira até que todas as parcelas sejam quitadas. Embora as taxas de juros da linha de crédito sejam mais altas, o processo é ágil, com um limite definido e disponível para uso imediato (BNDES, 2022).

Os incentivos desempenham um papel crucial na redução dos riscos associados a esse método de geração e estimulam o desenvolvimento contínuo do mercado a longo prazo (DANTAS, 2020).

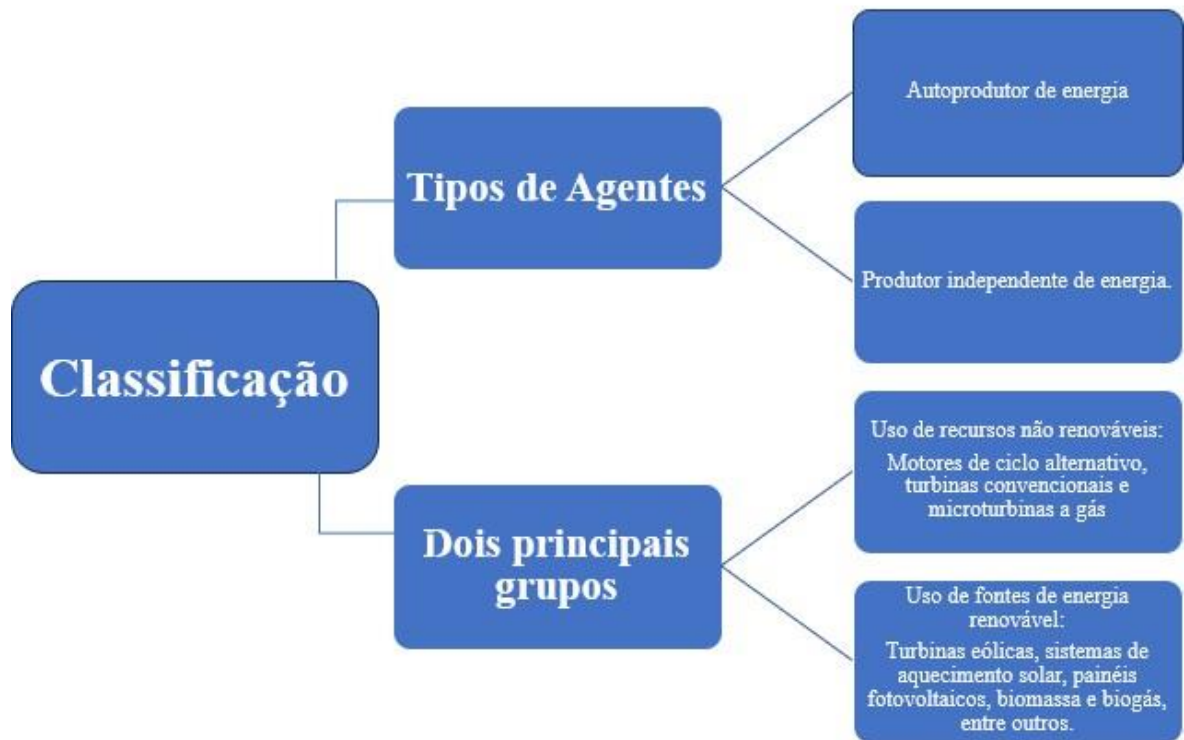
A partir da regulamentação das categorias denominadas micro e minigeração em 2012, o Brasil testemunhou um aumento significativo no número de consumidores que se tornaram prosumidores, ultrapassando 900 mil unidades ao final de 2021 (ANEEL, 2022). Esse aumento na demanda pela geração distribuída apresenta desafios complexos relacionados à concepção e gestão das redes de distribuição, considerando fatores como a localização, a fonte de energia e a capacidade das tecnologias geradoras.

Embora o número de unidades de geração distribuída conectadas à rede de distribuição no Brasil ainda seja relativamente pequeno em relação à capacidade total instalada de todas as fontes de energia, a tendência aponta para um aumento significativo no futuro, o que pode potencialmente impactar substancialmente a infraestrutura de rede. Parear essa nova capacidade com a geração brasileira, já composta majoritariamente por fontes “limpas”, torna o nosso sistema ainda mais “verde”, se comparado ao de outras nações. (WAENGA; PINTO, 2016).

No contexto da geração de energia, existem essencialmente dois tipos de agentes: o autoprodutor de energia e o produtor independente de energia. O produtor independente de energia obtém a concessão ou autorização para gerar eletricidade, que pode ser comercializada total ou parcialmente, enquanto o autoprodutor utiliza a eletricidade gerada para suas próprias necessidades, podendo vender o excedente de energia produzida. Sendo que ambos fazem parte do mercado livre de energia (ANEEL, 2015).

Para entender melhor as tecnologias de geração distribuída, elas podem ser categorizadas em dois grupos principais: aquelas que fazem uso de recursos não renováveis, como motores de ciclo alternativo, turbinas convencionais e microturbinas a gás, e aquelas fundamentadas em fontes de energia renovável, como turbinas eólicas, sistemas de aquecimento solar, painéis fotovoltaicos, biomassa e biogás, entre outros (FIUZA, 2022). As fontes renováveis, em particular a energia eólica e solar, têm ganhado destaque devido ao seu menor impacto ambiental, embora sejam fontes intermitentes sujeitas a flutuações de acordo com as condições ambientais (FIUZA, 2022).

**Figura 1 - Classificação de Geração**



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Cada categoria de tecnologia de geração distribuída tem o potencial de oferecer vantagens, desde que seja planejada e localizada adequadamente. Além disso, investir em tecnologias de armazenamento pode mitigar os desafios relacionados à intermitência das fontes renováveis, embora questões econômicas relacionadas aos custos dessas tecnologias ainda restrinjam sua adoção generalizada (FIUZA, 2022).

Os benefícios da geração distribuída se estendem tanto aos consumidores quanto às empresas distribuidoras, mas é crucial que as distribuidoras considerem diversos parâmetros ao conectar a geração distribuída à sua rede, incluindo a tecnologia de geração, o nível de tensão, o tamanho da geração distribuída e outros fatores (ROY; POTA, 2015).

A expansão rápida da geração distribuída tem impacto significativo na regulamentação, no fluxo de energia e no mercado energético. Isso pode resultar em investimentos adicionais por parte das empresas distribuidoras em infraestrutura, melhoria da rede e manutenção, mas também oferece oportunidades para reduzir custos, dependendo da abordagem estratégica adotada (FIUZA, 2022).

A geração distribuída é uma tendência crescente que traz benefícios econômicos e ambientais, mas também desafios complexos que devem ser gerenciados para garantir a

eficiência e a estabilidade do sistema elétrico. A evolução tecnológica e regulatória contínua é fundamental para o sucesso da geração distribuída no cenário energético atual (HUANG, 2017).

## **2.5 NORMAS NO BRASIL**

Abordando normas referente a micro e minigeração distribuída, no contexto brasileiro, a implementação de unidades com geração distribuída (GD) foi estabelecida como um marco regulatório pelo Decreto nº 5.163/04, decorrente da Lei nº 10.848/04, a qual estabelece as diretrizes para a comercialização de energia elétrica no país, abrangendo a GD e estipulando os procedimentos para a sua implementação. De acordo com essa legislação, enquadram-se como geração distribuída os empreendimentos geradores provenientes das seguintes fontes: (a) energia solar; (b) energia eólica; (c) hidrelétricas com potência instalada até 30 MW; e (d) termelétricas, inclusive de cogeração a gás, desde que apresentem uma eficiência energética igual ou superior a 75%. Cabe destacar que essa exigência de eficiência energética não se aplica quando a biomassa ou resíduos de processo são utilizados como combustível (ANEEL, 2023).

Através da Resolução Normativa nº 482 de 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estipulava as diretrizes gerais referentes ao acesso das micro e minigerações aos sistemas de distribuição de energia elétrica (ANEEL 2012). Esta resolução adota o mecanismo de compensação para lidar com os eventuais excessos de produção gerados por essas fontes. O dispositivo legal abre a possibilidade de que uma unidade consumidora (UC) possa não somente gerar energia para o seu próprio consumo, mas também introduzir energia na rede de distribuição, acumulando créditos de energia que podem ser utilizados em momentos subsequentes (ANEEL, 2012).

Em 2015, a mencionada resolução passou por revisão por intermédio da REN 687/15, introduzindo outras opções para a compensação por meio de créditos de energia. Isso englobou possibilidades como: projetos com diversas unidades consumidoras, sistemas de geração compartilhada e modalidade de autoconsumo remoto, de acordo com as diretrizes da ANEEL em 2015. Dessa forma, o responsável pela pequena geração distribuída tem a capacidade de abater créditos em outras unidades consumidoras situadas dentro da região de concessão da distribuidora (FIUZA, 2022).

Porém ambas as resoluções não estão mais vigentes, sendo as duas principais resoluções que estão vigentes a REN 1.000/21 que consolida e atualiza as regras relacionadas ao serviço de distribuição de energia elétrica. Sendo que ela abrange todos os direitos e deveres dos consumidores e simplifica o sistema, revogando algumas normas anteriores (ANEEL, 2021), e

a REN 1.059/23 que aprimora as regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Essa resolução altera as normativas anteriores sobre o autoconsumo remoto, a central geradora de fonte despachável, o crédito de energia e o empreendimento com múltiplas unidades consumidoras (ANEEL, 2023).

Posteriormente, por meio da Lei nº 14.300/2022, resultado da evolução do Projeto de Lei nº 5.829/2019, estende-se a obrigatoriedade de pagamento de encargos e tarifas pelo uso das infraestruturas de transmissão e distribuição para micro e minigeradores de energia elétrica. O projeto aprovado incorpora a ideia de implementar gradualmente, às unidades consumidoras que possuem geração distribuída, o pagamento pela utilização da rede elétrica, denominado Tarifa do Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) Fio B (FUIZA, 2022).

Entre as principais alterações que podem beneficiar a empresa distribuidora, estão: o enquadramento da microgeração distribuída no faturamento como Grupo A, onde unidades consumidoras com carga e/ou geração maior do que 50 kW e menor ou igual a 75 kW podem ser enquadradas no Grupo A. Esse fato ocorrerá caso os estudos de conexão elaborados pela distribuidora de energia elétrica identifiquem que essas unidades têm o potencial de prejudicar a prestação do serviço de distribuição a outros consumidores se continuarem enquadradas como Grupo B (GREENER, 2023).

## **2.6 PERDAS DE ENERGIA**

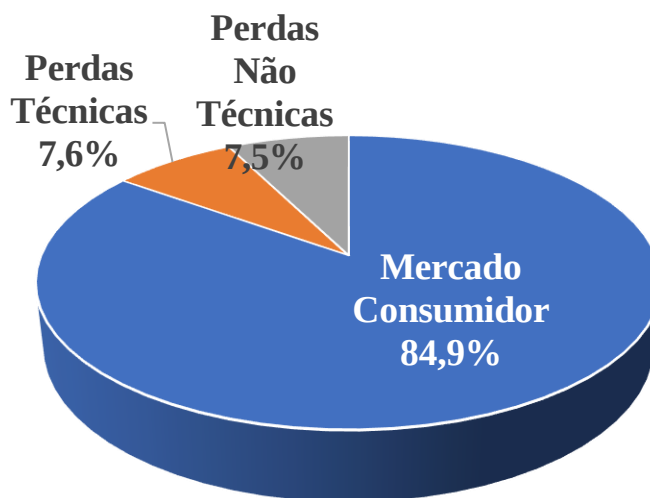
Os dispositivos e componentes elétricos interconectados que operam na produção, transmissão e distribuição de energia formam o Sistema Elétrico de Potência (SEP), cujo propósito primordial é assegurar o fornecimento de energia aos consumidores (BARROS; GEDRA; BORELLI, 2016).

A estrutura dominante do Sistema Elétrico de Potência (SEP) do Brasil é composta, principalmente, pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), que abrange uma rede diversificada de linhas de transmissão de alta voltagem, subestações e unidades de geração de eletricidade conectadas entre si. Esse arranjo possibilita a troca de energia entre várias áreas e regiões do país (ANEEL, 2014).

Apesar dos benefícios trazidos pelo compartilhamento de energia e pela disponibilidade resultante da extensa interconexão e da existência de grandes fontes centralizadas de geração no Sistema Interligado Nacional (SIN), o sistema enfrenta índices significativos de perda de

energia, devido à grande distância entre as usinas de grande porte e os centros de consumo. No ano de 2018, as perdas globais de energia no processo de distribuição representaram aproximadamente 14% do total de consumo no mercado (ANEEL, 2019).

**Figura 2 - Perdas de Energia**



Fonte: Adaptada de (ANEEL,20213)

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define as perdas no sistema elétrico como a diferença entre a energia produzida e a energia efetivamente comercializada, categorizando-as em duas partes distintas: perdas técnicas e perdas comerciais, também conhecidas como perdas não técnicas.

As perdas técnicas manifestam-se como uma parte intrínseca ao processo de transmissão e distribuição de energia, derivando do efeito Joule nos condutores, perdas nos núcleos dos transformadores e perdas dielétricas, entre outros fatores. Essas perdas estão diretamente ligadas à carga do sistema e à configuração da rede. Por sua vez, as perdas não técnicas têm sua origem em ocorrências como furtos, fraudes, imprecisões nas leituras e erros no processo de medição e faturamento (ANEEL, 2019).

De acordo com as informações veiculadas no Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) projeta que até 2030 a capacidade instalada de geração distribuída atingirá cerca de 24,5 GW, sendo a geração de energia solar fotovoltaica responsável por 93% desse total projetado (EPE, 2019). Este fato aponta para um cenário promissor no qual a implementação e adoção da geração distribuída de energia solar continuarão a ganhar destaque e crescer consideravelmente nos próximos anos.

Para minimizar as perdas no processo de distribuição, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece modelos regulatórios que incorporam incentivos ou penalidades destinados às empresas distribuidoras. No contexto das perdas não técnicas, conforme estabelecido no Módulo 2 - Revisão Tarifária Periódica das Concessionárias de Distribuição - PRORET (2015), um limite máximo para as perdas não técnicas regulatórias é definido com base numa análise das complexidades das distribuidoras, sendo que quaisquer custos não contemplados nas tarifas são responsabilidade direta da distribuidora.

Segundo levantamento efetuado pela ANEEL no ano de 2019, o custo médio das perdas na distribuição, excluindo os tributos, totalizou cerca de R\$ 7,4 bilhões para as perdas não técnicas. Em virtude da abordagem restritiva estabelecida pela ANEEL, os valores despendidos pelos consumidores foram estimados em R\$ 5,3 bilhões, enquanto as perdas técnicas acarretaram um gasto de R\$ 7,9 bilhões (ANEEL, 2019).

Para mitigar esse problema, foram adotadas algumas técnicas. Uma delas é a reconfiguração do sistema, originalmente proposta por Merlin e Back em 1975. Nesse contexto, eles desenvolveram um algoritmo heurístico para determinar a configuração mais adequada do sistema, visando à minimização das perdas. As várias configurações da rede induzem variações nos fluxos de potência ativa nas linhas de distribuição, resultando em diferentes níveis de perdas (MERLIN; BACK, 1975).

Outra técnica mencionada na literatura é a alocação de capacitores em paralelo com as cargas, a fim de regular a quantidade de potência reativa. Essa abordagem não apenas auxilia na diminuição das perdas técnicas, mas também resulta na elevação do fator de potência e na aprimoração do perfil de tensão (SOUZA, 2017).

Alocar a geração de energia o mais próximo possível das cargas resulta em uma redução significativa das perdas causadas pelo transporte da energia, especialmente no contexto da geração distribuída, quando se utiliza a energia solar fotovoltaica, que se destaca pela capacidade de gerar energia próxima às cargas

## **2.7 PERDAS TÉCNICAS EM UM SISTEMA COM GD**

De acordo com Guo et al. (2015), os sistemas de geração distribuída não só são essenciais para atender à demanda, mas também demonstram versatilidade ao oferecer uma série de vantagens ao sistema de energia elétrica. Esses benefícios incluem a diminuição do congestionamento na distribuição e transmissão de energia, a redução dos picos de demanda, a

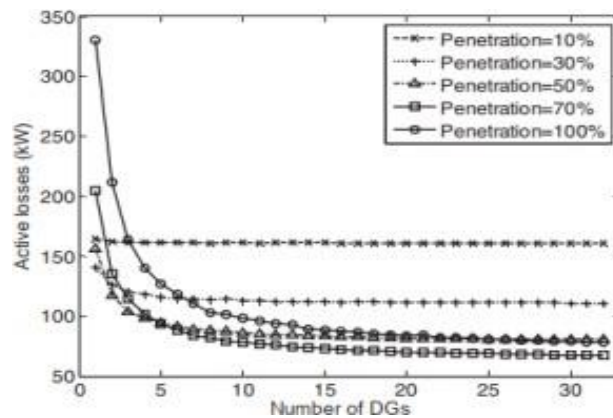
melhoria do controle da tensão e a minimização das perdas técnicas. Entretanto deve-se avaliar alguns critérios. A penetração, segundo a definição, envolve a proporção entre a potência gerada pela geração distribuída que é injetada na rede e a potência de consumo da carga. A interligação entre essas duas potências está intimamente ligada à variação das perdas causadas pela geração distribuída, podendo tanto diminuí-las quanto aumentá-las.

A posição da fonte de geração em relação à carga tem um impacto significativo nas perdas técnicas, as perdas estão diretamente relacionadas com a resistência total da linha de transmissão, onde essa linha representa o trajeto percorrido pela energia até alcançar a carga que precisa ser alimentada. Quanto maior for a extensão desse trajeto, maiores serão as perdas. Em uma análise simplificada, quanto mais próxima a fonte estiver da carga, melhores serão os resultados (Chiradeja, 2005).

A determinação do local de instalação se torna uma tarefa complexa quando há múltiplos pontos de consumo a considerar. Isso se complica devido ao fato de que, dependendo da localização da fonte de geração distribuída (GD), o trajeto até as cargas mais distantes será mais extenso, resultando em perdas superiores em comparação com a geração centralizada (QIAN et al. 2011).

A dispersão se caracteriza pelo número de fontes de geração distribuída (GD) conectadas à rede elétrica e pela potência de cada uma delas. Por exemplo, uma rede que tenha 15 fontes de geração, cada uma com 1 MW de potência, apresenta uma dispersão maior do que uma rede que tenha apenas 3 fontes de geração, cada uma com 5 MW de potência. Guo et al. (2015) realizaram uma análise em um sistema composto por 33 barramentos, variando o nível de dispersão com diferentes perfis de penetração. Os resultados dessa pesquisa indicam que a dispersão da geração em múltiplos pontos torna mais provável a redução das perdas no sistema.

**Figura 3 - Perdas técnicas para diferentes níveis de penetração e dispersão**



Fonte: Guo et al. (2015)

## 2.8 PONTO ÓTIMO

O conceito de ponto ótimo tem como objetivo configurar o sistema de geração distribuída de maneira a maximizar seus benefícios. Além dos parâmetros mencionados anteriormente, a determinação do ponto ótimo de geração geralmente leva em consideração outros critérios, como questões ambientais, disponibilidade de recursos primários para geração, capacidade da rede elétrica, entre outros fatores. Também é importante considerar os impactos da geração distribuída nos níveis de tensão do sistema, como ressaltado por Alves (2018).

À medida que aumenta o número de variáveis, parâmetros e critérios a serem considerados no dimensionamento da geração distribuída, torna-se impraticável determinar o ponto ótimo sem o auxílio de métodos computacionais. Chiradeja (2005) menciona diversos métodos, como lógica fuzzy, algoritmos genéticos, abordagens analíticas, fluxo de potência e busca Tabu. Afirmando ainda que a aplicação desses métodos pode resultar em uma redução significativa nas perdas de energia, que pode variar de 60% a 90%.

## 2.9 PERFIS DE CARGA E GERAÇÃO

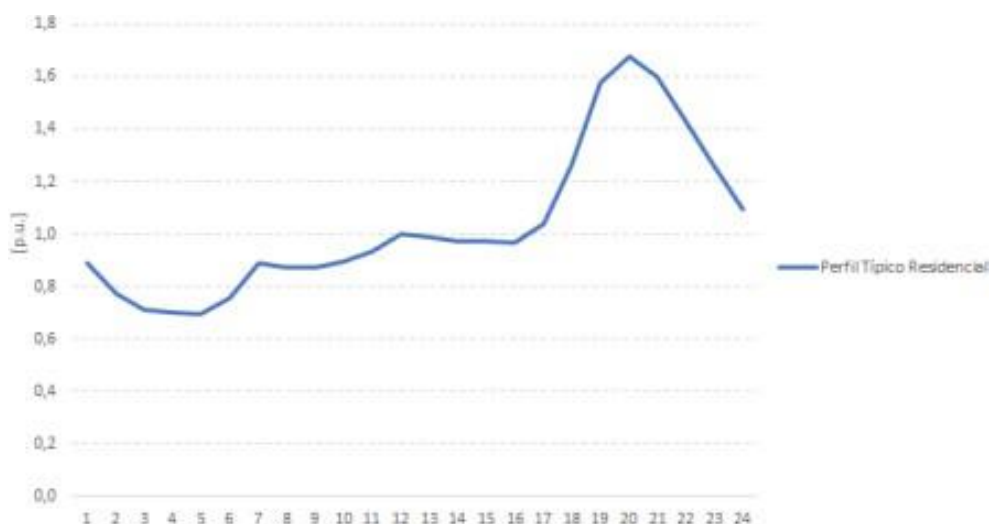
O dimensionamento de um sistema de distribuição com fontes de geração distribuída envolve a avaliação de vários parâmetros, cuja má definição pode levar a condições desfavoráveis para o sistema. Destacar a importância de levar em conta os perfis de carga e geração ao analisar a redução das perdas técnicas proporcionada pela geração distribuída.

A demanda de energia elétrica reflete o consumo de energia ao longo do dia e é visualizada por meio da representação gráfica conhecida como curva de carga. Em uma situação ideal, a carga seria distribuída de forma mais uniforme ao longo do dia, aproximando a demanda

média da demanda máxima, o que facilitaria o planejamento de unidades de geração mais eficientes. No entanto, devido ao fato de que toda energia gerada deve ser consumida instantaneamente, é necessário que as unidades de geração sejam dimensionadas para atender aos picos de demanda (Stefanello et. Al, 2019).

Em contrapartida ao cenário ideal mencionado anteriormente, a curva de demanda residencial exhibe flutuações significativas em sua forma, como pode ser observado no gráfico apresentado na Figura 4.

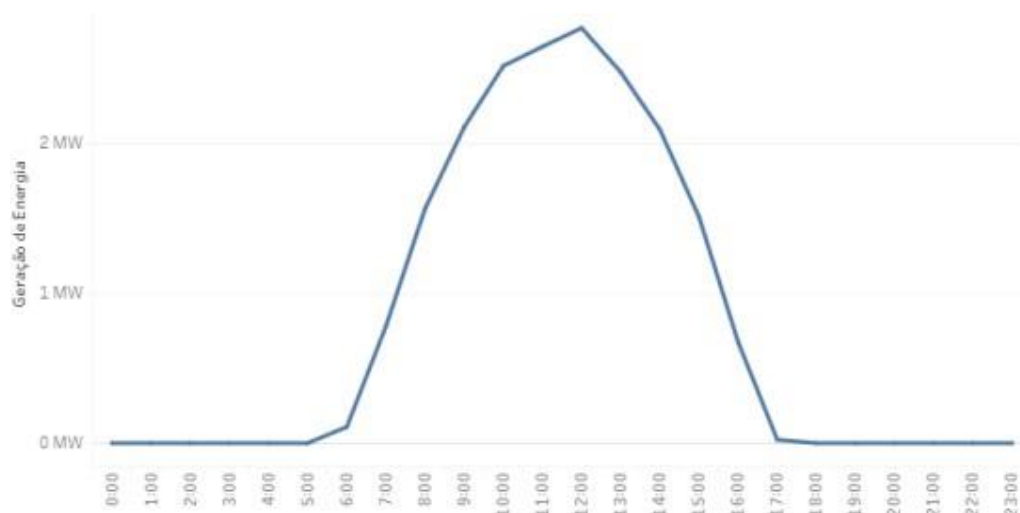
**Figura 4 - Perfil típico de carga residencial num dia útil**



Fonte: EPE (2022)

Da mesma forma que a curva de carga reflete o comportamento da demanda elétrica dos consumidores durante o dia, é possível fazer uma analogia para a produção de energia, que é representada pelo perfil de geração. Esse perfil indica a quantidade de energia gerada por uma usina ao longo do dia. Na Figura 5, é possível visualizar o perfil de geração associado a sistemas fotovoltaicos, uma vez que eles constituem a maior parte da geração distribuída no Brasil, conforme mencionado anteriormente neste trabalho.

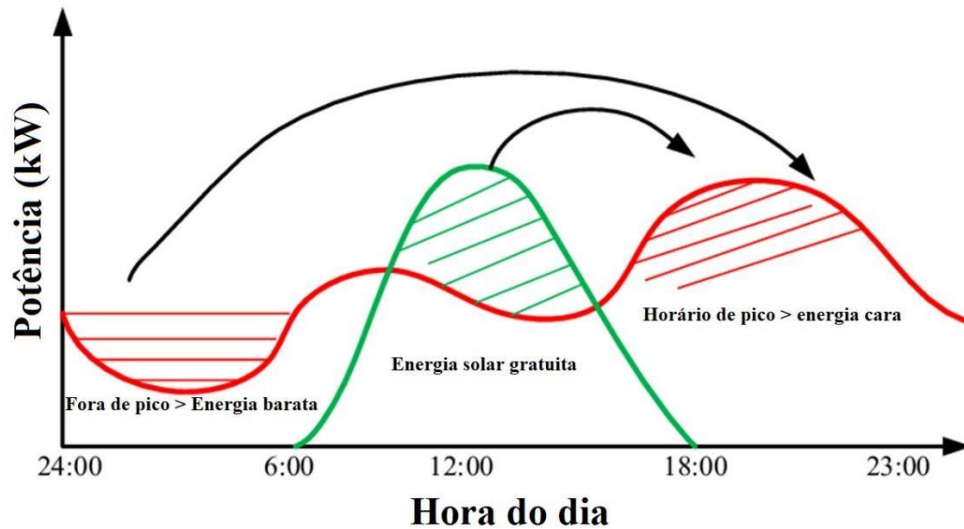
**Figura 5 - Curva de geração solar para usina conectada ao SIN**



Fonte: ONS (2021)

Ao comparar os gráficos apresentados na Figura 4 e na Figura 5, nota-se que o momento de pico na demanda residencial não coincide com o pico de geração fotovoltaica, o que difere do cenário ideal. Essa discrepância ocorre devido à natureza intermitente da geração solar, que está disponível apenas durante o dia. Sendo neste caso uma possível solução a implementação de baterias para realizar o *energy shifting*.

Figura 6 - Exemplo de Funcionamento Energy Shifting



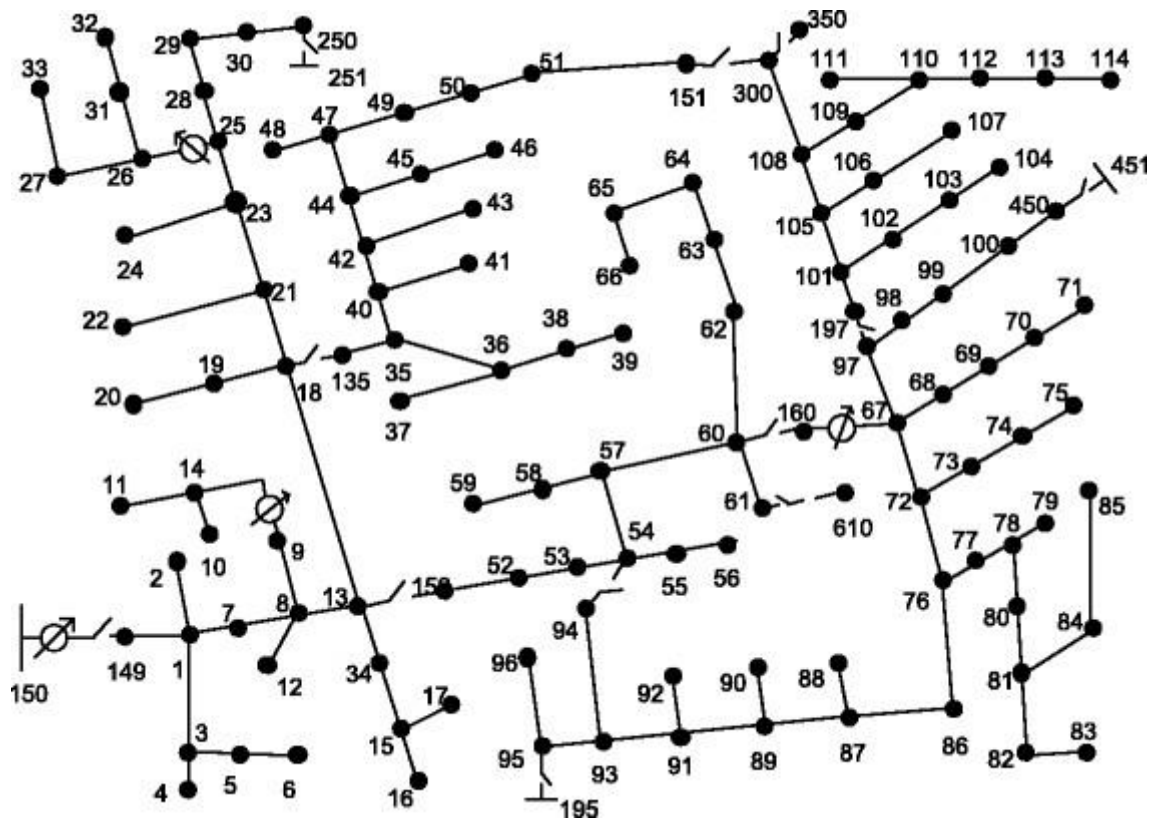
Fonte: Hassan; Cipcigan; Jenkins,(2017)

Essa abordagem permite o armazenamento de energia durante os períodos de geração excedente e sua liberação durante os momentos de alta demanda, sendo assim, não apenas poderia otimizar a utilização de recursos, mas também mitigar as perdas decorrentes da diferença temporal entre a produção e o consumo de energia.

### 3 METODOLOGIA

Para realizar a simulação proposta neste trabalho, foi desenvolvida uma ferramenta em ambiente MATLAB®, responsável por simular a inclusão de unidades de geração distribuída em barras do sistema do sistema IEEE 123 barras, obtido a partir da biblioteca do OpenDSS (Distributed System Simulator). Essa escolha fornece um ambiente realista para a análise de como a inserção de geração distribuída (GD) pode influenciar o desempenho do sistema elétrico permitindo a comparação do sistema com e sem unidades geradoras de energia.

Figura 7 - Modelo de Teste IEEE 123 Barras



Fonte: (IEEE, 2015)

O programa conta com uma interface homem-máquina que simplifica a interação do usuário e através da qual é possível definir o percentual de barras nas quais serão incluídas unidades de geração distribuída, o percentual da carga do sistema que será gerado a partir destas fontes e o número de fases utilizadas pelos inversores de potência associados às GDs. Por exemplo, o usuário pode optar por alocar 5% das barras com GD, representando 10% da potência total do sistema, sendo para isso utilizados inversores monofásicos, como no caso da Figura 4.

**Figura 8 - Área de simulação**

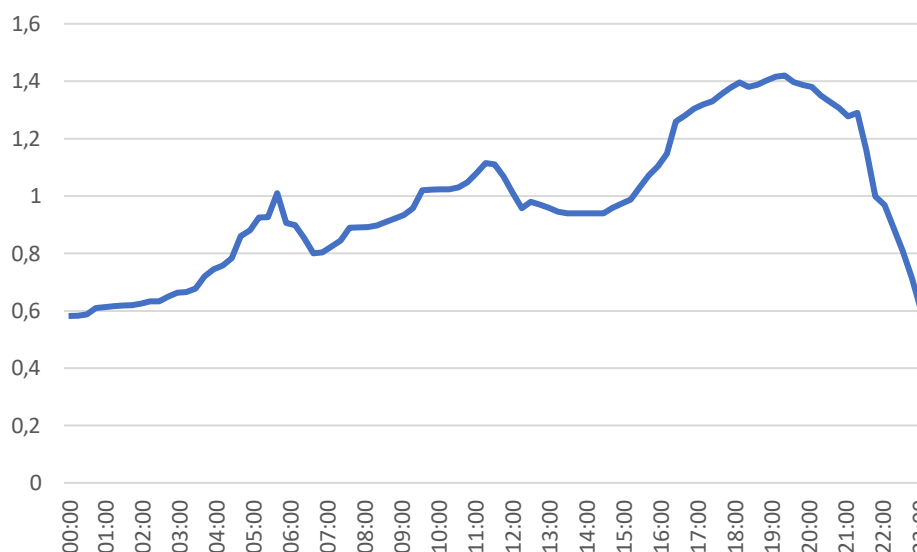
The screenshot shows a software interface for simulation configuration. On the left, there are three buttons: 'Carrega Sistema', 'Carrega Loadshape', and 'Carrega Curva Irradiância'. Below these are three input fields: 'Geração GD (%)' with the value '10', 'Barras GD (%)' with the value '5', and 'Repetições' with the value '1'. On the right, there is a dropdown menu with 'Todos inversores' selected, and four checkboxes: 'Mono', 'Bi', 'Tri', and 'Mono + Bi', all of which are checked. Below the checkboxes, a text label reads 'Total de xxx simulações a serem realizadas. Tempo estimado de xxx s.' At the bottom right, there is a button labeled 'Roda simulações'.

Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Após as seleções do usuário, o programa realizará a escolha das barras que serão inseridas as GDs, garantindo uma abordagem representativa. Em seguida, é realizada uma simulação do sistema com a presença dos GDs, utilizando os modelos do OpenDSS para capturar o comportamento dinâmico do sistema.

Para representar as cargas do sistema foi utilizado a curva de carga abaixo, retirada da biblioteca do OpenDSS

**Figura 9 - Curva de Carga**

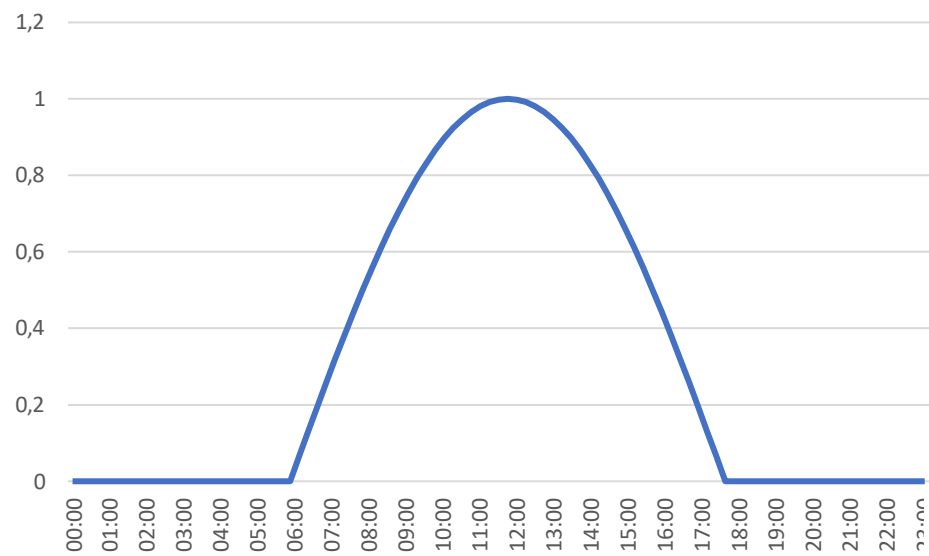


Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

O gráfico da figura 5 da curva de carga atua como um multiplicador em relação à carga nominal do sistema.

Já para representar a geração foi utilizado a seguinte curva de irradiância também retirada da biblioteca do OpenDSS.

Figura 10 - Curva de Irradiância



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Após o tratamento dos dados, seguimos com a análise e interpretação dos resultados, buscando compreender de que maneira a geração distribuída impacta o desempenho do sistema, especialmente no que diz respeito à redução de perdas de energia. Abaixo foi apresentado na Tabela 1 os diferentes cenários simulados.

Tabela 1 – Simulações Realizadas

| Cenário | Geração (%) | Barras (%) | Repetições |
|---------|-------------|------------|------------|
| 1       | 5           | 5          | 10         |
| 2       | 5           | 5,10,15,20 | 4          |
| 3       | 10          | 10         | 10         |
| 4       | 10          | 5,10,15,20 | 4          |
| 5       | 15          | 15         | 10         |
| 6       | 15          | 5,10,15,20 | 4          |
| 7       | 20          | 20         | 10         |
| 8       | 20          | 5,10,15,20 | 4          |
| 9       | 5,10,15,20  | 5,10,15,20 | 4          |

Fonte: Elaborada pelo Autor (2023)

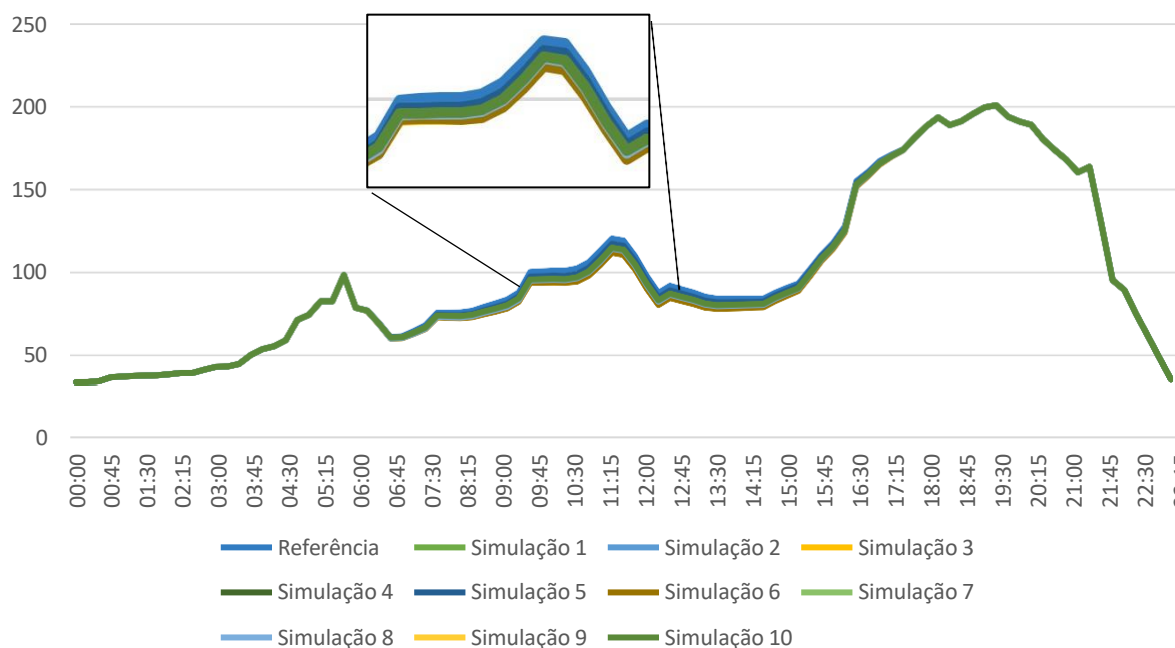
## 4 RESULTADOS

Após realizar todas as simulações foram obtidos resultados que mostram o impacto dos da variação dos parâmetros considerados nas perdas do sistema.

O primeiro cenário a ser analisado foi o do impacto nas perdas com 5% das barras com geração distribuída e 5% da potência do sistema providas de tais fontes, conforme a Figura 11.

### 4.1 CENÁRIO 1

Figura 11 - Gráfico de Perdas no Sistema com 5% de GD inserida



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Neste caso, houve múltiplas simulações para que fosse possível enxergar que dependendo da escolha das barras com GD as percas mudariam seu valor, pois com apenas uma simulação, não seria possível visualizar essa mudança e a análise poderia ser feita em uma escolha de barras não tão interessante. Pode-se notar tal diferença entre as simulações 6, destacando-se por melhor escolhas de barras com geração e a simulação 4 com pior escolha, estando debaixo da referência de perdas sem geração distribuídas no sistema.

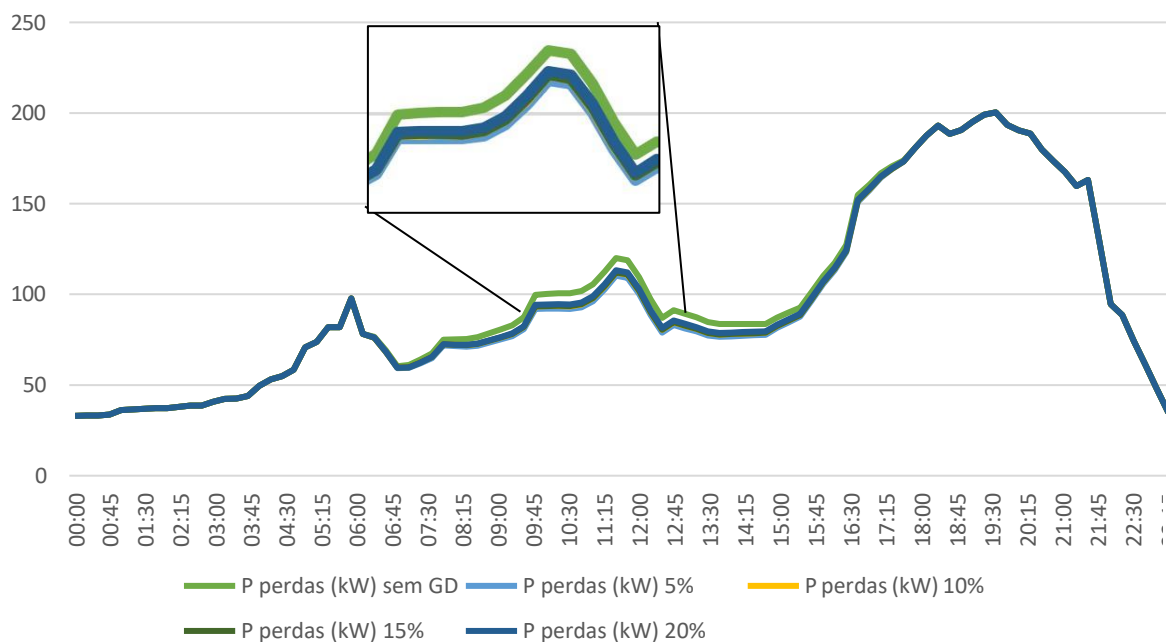
Percebe-se que por ser uma quantidade relativamente pequena de barras com GD e pouca potência da geração, a redução em relação a perdas é baixa, variando em torno de 1,02%, cerca

de 264 kW de potência. Entretanto se fosse possível mover o pico de geração de energia para o pico de consumo, certamente haveria uma redução de diversos problemas relacionados a distribuição de energia, sendo um dos principais as perdas.

Em seguida houve um aumento na porcentagem de barras com GD variando de 5 em 5, porém mantendo a potência inserida no sistema de 5% da potência total.

## 4.2 CENÁRIO 2

**Figura 12 - Variação de quantidade de barras com 5% de GD**



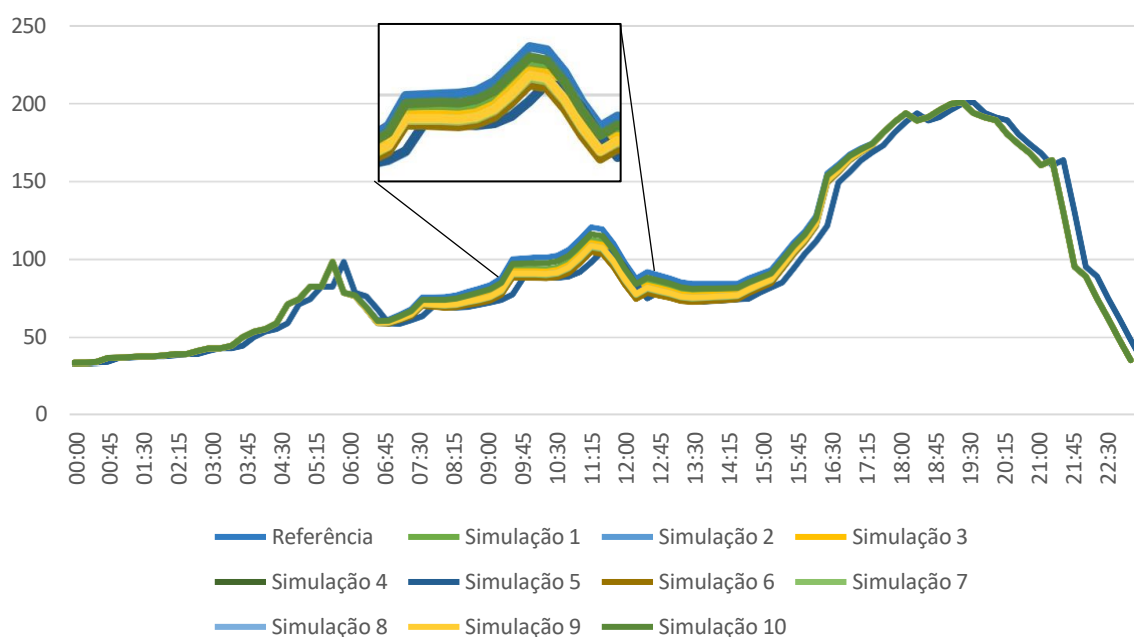
Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Percebe-se que conforme se aumenta a variação de barras com GD as perdas se reduzem, mesmo mantendo o valor de potência fixa em 5% do total, assim podendo concluir que quanto maior a dispersão de barras com GD menor seria o caminho que a energia iria percorrer e consequentemente as perdas seriam reduzidas, uma vez que a geração se localizaria próxima ao consumidor.

Em seguida, foi alterado a quantidade de barras e a potência das unidades geradoras de energia inseridas no sistema. Permitindo que seja feita a análise de perdas de alguns casos com 10% das barras com geração distribuída com também 10% da potência do sistema providas dessas GDs.

### 4.3 CENÁRIO 3

Figura 13 - Gráfico de Perdas no Sistema com 10% de GD inserida



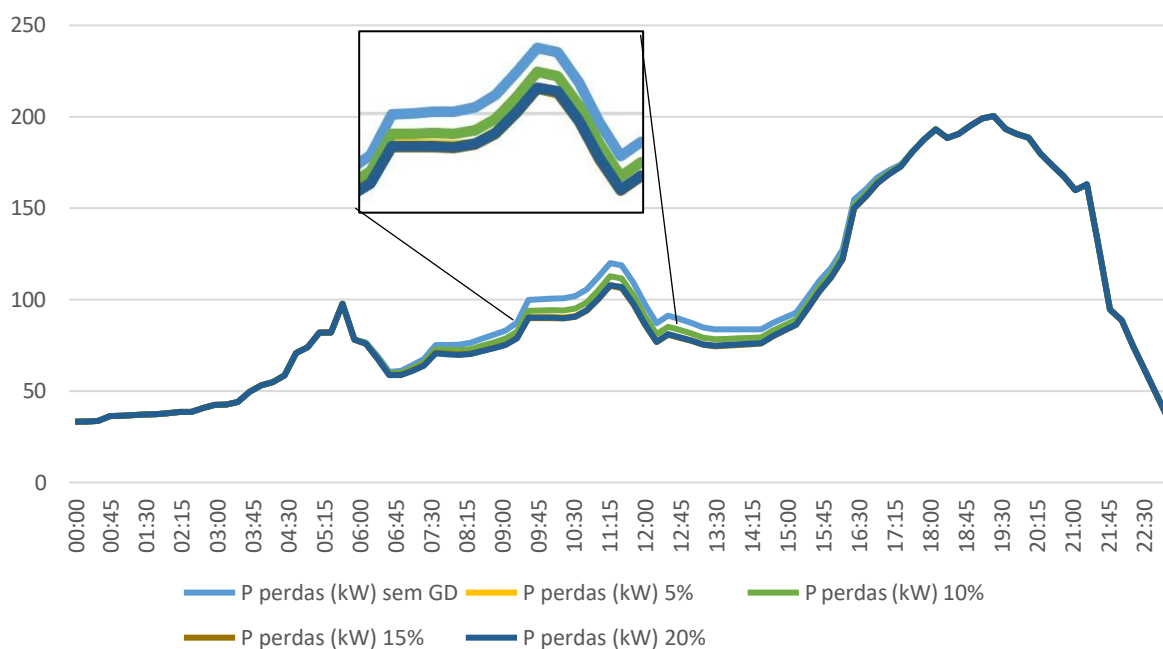
Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Partindo para uma quantidade de barras com GD e potência de 10% do total, percebe-se que ainda permanece uma redução de perdas baixa, entretanto um pouco maior do que em relação à anterior de 5%. Assim tendo uma redução de 2,1% cerca de 197 kW.

Posteriormente, seguiu-se com um aumento na porcentagem de barras com GD variando de 5% em 5%, porém mantendo a potência de 10% da potência total.

#### 4.4 CENÁRIO 4

Figura 14 - Variação de quantidade de barras com 10% de GD



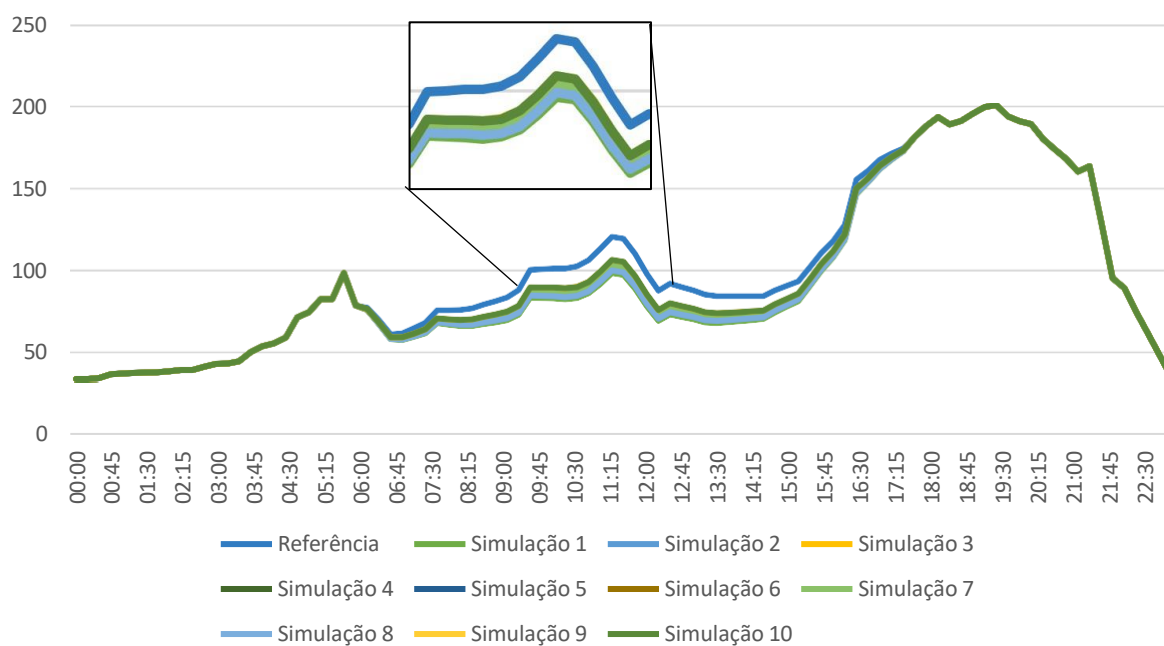
Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Assim como na variação de barras com 5% de GD, a variação de 10% tem o mesmo comportamento, entretanto com um valor ainda menor de perdas. Entretanto, é possível perceber que a melhor escolha de barras foi a com 15% da potência total do sistema, sendo essa a que teve maior redução de perdas. Esse fato se dá por que na simulação de barras com 20% da potência total não foi escolhida a melhor opção possível para se obter um número ainda menor de perdas.

Logo após, foi simulado as perdas com 15% das barras com geração distribuída e 15% da potência total do sistema vinda dessas GDs.

## 4.5 CENÁRIO 5

Figura 15 - Gráfico de Perdas no Sistema com 15% de GD inserida

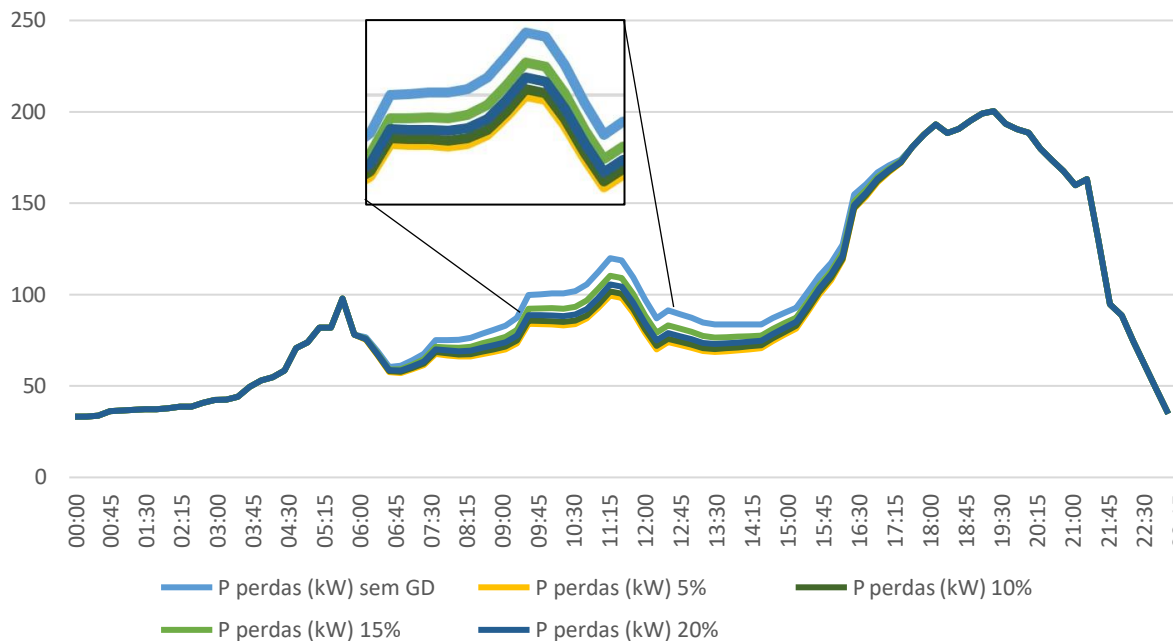


Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Neste caso já é possível visualizar uma redução nas perdas melhor que nos outros dois casos anteriores, registrando uma marca de 2,85% de redução, aproximadamente 267 kW. Logo depois, seguiu-se com o aumento na porcentagem de barras com GD variando de 5% em 5%, porém mantendo a potência de 15% da potência total.

## 4.6 CENÁRIO 6

Figura 16 - Variação de quantidade de barras com 15% de GD



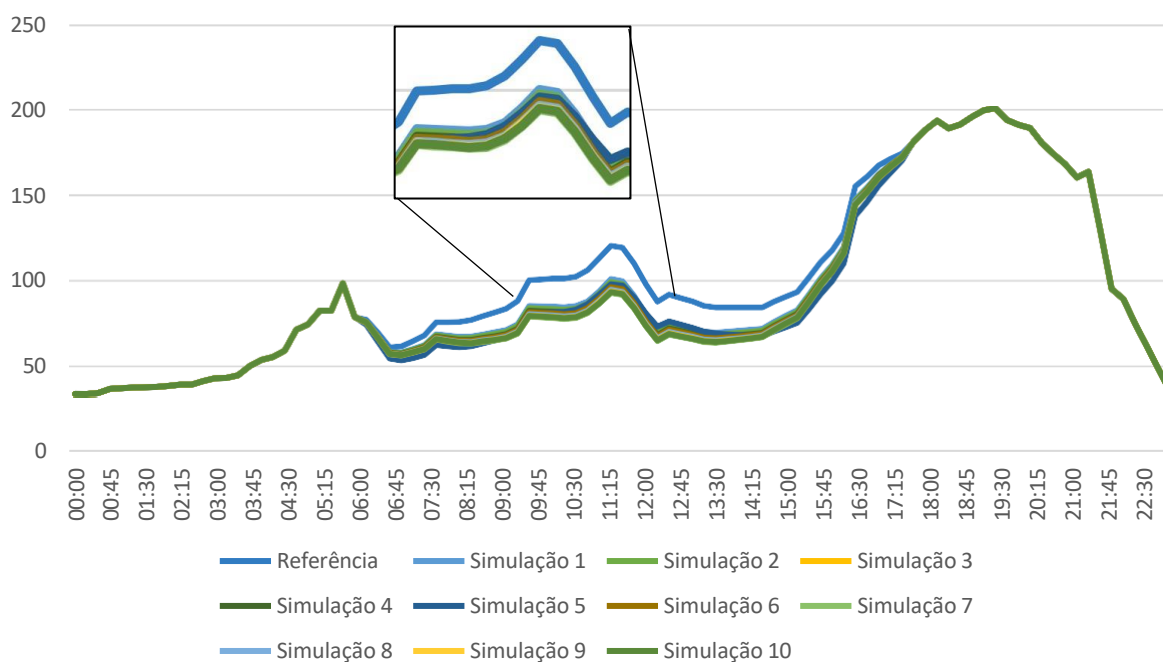
Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Neste caso nota-se que o melhor caso foi o de 5% de barras com GD com 5% da potência total do sistema, em seguida vindo a de 10%, 20% e por último a de 15%. Esse acontecimento ocorre por motivo de escolha de barras com GD, neste caso a escolha de barras com 5% foi a mais adequada do que as outras opções, visto uma vez que, quando maior a distribuição de barras com GD menor seria as perdas, já que a energia não teria que percorrer grandes caminhos.

Finalizando as alterações de potência do sistema vindas das unidades geradoras, foi simulado as perdas com 20% das barras com geração distribuída responsável por 20% da potência total do sistema.

## 4.7 CENÁRIO 7

Figura 17 - Gráfico de Perdas no Sistema com 20% de GD inserida



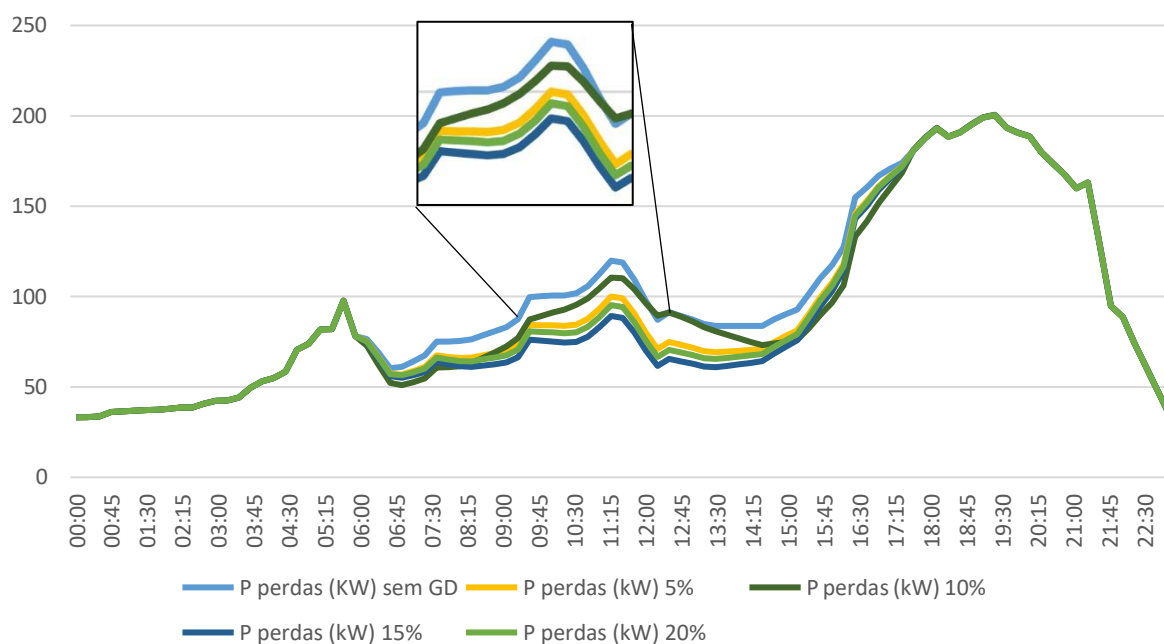
Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Neste conjunto de simulações, nota-se que a variação de 20% de geração responsável pela potência total do sistema com 20% das barras distribuída, é o melhor caso entre os quatro apresentados, onde foi registrado o menor valor de perdas no horário em que a geração atua no sistema. Diferença de 7,2%, cerca 676 kW de potência de comparado ao sistema sem nenhuma geração.

Assim seguindo o mesmo critério para análise das anteriores, foi aumentado a porcentagem de barras com GD variando de 5% em 5%, porém mantendo a potência de 20% da potência total.

## 4.8 CENÁRIO 8

Figura 18 - Variação da quantidade de barras com 20% de GD



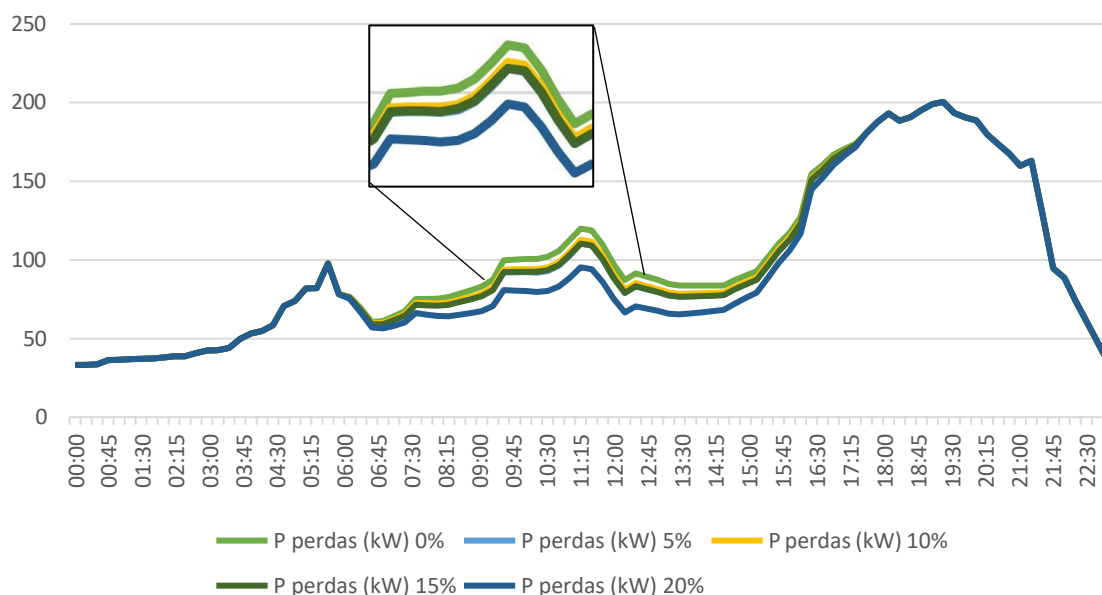
Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Neste resultado, com a escolha aleatória do MATLAB<sup>®</sup> sobre quais barras terão a presença de GD, é possível ver que dependendo do horário existem dois modelos que variam com menor quantidade de perdas, a variação com 10% possui menor valor de perdas no começo do dia, entre as 6:00 e 8:15, e no final do dia entre as 15:45 e 18:00, já a variação com 15% lidera no intervalo entre as 8:15 e 16:00, também vale ressaltar que para a variação de 10% no período das 8:15 e 15:00 é o pior caso de perdas.

Por último, foi mantido a mesma quantidade de barras que o sistema teria com geração distribuída, porém a potência fornecida por elas foi variada, obedecendo o mesmo critério das simulações anteriores, aumentando a porcentagem de 5 em 5.

## 4.9 CENÁRIO 9

Figura 19 - Comparação de Perdas entre Potências de GD diferentes



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Assim como se aumentar o tamanho da carga a quantidade de perdas também aumentaria, nesse conjunto de simulação é possível ver claramente que conforme acrescenta-se geração distribuída no sistema o nível de perdas será reduzido, como mostrado na figura 18 acima. Nota-se que a variação das perdas acontece apenas no horário em que se tem geração de energia no sistema fotovoltaico iniciando por volta das seis da manhã e finalizando as sete da noite, obtendo variações mais bruscas no horário de pico de geração.

Levando em consideração o preço da energia sendo R\$ 0,40 em média o gasto desse sistema apenas com a perda de energia devido a distribuição seria em torno de R\$ 90.180,40. Já para o sistema na melhor condição simulada de 20% do total de barras sendo responsável por 20% de toda potência do sistema apresentado o custo cai para R\$ 83.683,55, uma economia de aproximadamente R\$ 6.496,85, sendo esse valor para a simulação de um sistema relativamente pequeno. Para um sistema grande, a quantidade de perdas é enorme, um gasto que com apenas a inserção de GD na rede pode ser minorado.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo final, será consolidado as conclusões deste trabalho, que abrangeram simulações em um sistema de 123 barras inserindo geração distribuída, com foco na redução de perdas de energia. Assim como, realizar uma análise de como a redução das perdas impactaram financeiramente a empresa responsável pela distribuição de energia e qual a escolha mais adequada de quantidade e tamanho de GDs para esse sistema seria mais vantajoso. Além de ressaltar a importância da adoção de fontes de energia limpa para a melhoria da rede de energia. Por fim, enfatizar os benefícios econômicos e ambientais resultantes dessas ações, destacando sua relevância em um cenário empresarial cada vez mais voltado para a sustentabilidade e redução de custos.

### 5.1 CONCLUSÃO

Ao longo deste estudo, foi analisado algumas possibilidades onde foi inserido unidades com geração distribuída em um sistema de 123 barras, e verificado se essas unidades conseguiriam afetar positivamente o sistema em relação as perdas de energia.

Diante disso foi possível perceber que conforme aumenta-se a potência dessas GDs, o sistema continuava reduzindo as perdas para certas barras selecionadas (para a escolha de barras mais apropriada). Além disso, se as barras que forem selecionadas para a instalação de GD não fossem as mais adequadas, as perdas não seriam reduzidas conforme o esperado, podendo variar pouco em relação ao sistema sem geração distribuída. Também vale destacar que conforme se aumenta o número de barras com geração, notava-se uma redução de perdas de energia no sistema. Assim afirmando que, a quantidade, tamanho e onde são inseridas as GDs podem interferir nas perdas de energia do sistema.

Após todas as simulações concluídas, a de maior redução foi a alternativa de 20% de geração distribuída no sistema, garantindo que à melhor aproveitamento da energia quando se tem carga mais próxima a geração.

Embora 20% de geração distribuída esteja integrada ao sistema, não resulta necessariamente em uma redução proporcional de 20% nas perdas. As perdas em um sistema elétrico são influenciadas por uma série de fatores, como a eficiência da rede de distribuição, a distância entre a geração e o consumo, a qualidade dos equipamentos e a variação na demanda de energia ao longo do tempo.

Após inserir unidades geradoras no sistema, essas podem ajudar a reduzir algumas perdas, especialmente se a geração estiver próxima aos pontos de consumo, evitando o transporte de

eletricidade por longas distâncias. No entanto, outras fontes de perda, como a resistência nos cabos de distribuição, não são afetadas diretamente pela adição de geração distribuída.

Considerando a defasagem entre a curva de geração e a curva de carga, é evidente que essa diferença limita a capacidade de redução das perdas no sistema energético. A implementação de elementos de armazenamento para realizar o *energy shifting* surge como uma solução promissora. Ao permitir o armazenamento de energia durante os períodos de geração excedente e sua liberação durante os momentos de alta demanda, essa abordagem não apenas poderia otimizar a utilização de recursos, mas também mitigar as perdas decorrentes da diferença temporal entre a produção e o consumo de energia.

A redução de perdas de energia não apenas economiza recursos financeiros, mas também contribui significativamente para a preservação do meio ambiente, confiabilidade do sistema e impulsiona avanços em eficiência e tecnologia. Em um cenário onde se busca cada dia mais a utilização de fontes renováveis, a geração distribuída é uma possível solução para a os problemas enfrentados pelas distribuidoras de energia.

Trabalhos futuros, poderão ser direcionados à identificação das instalações de geração distribuída, com um foco na análise do impacto da localização específica de cada uma dessas unidades. O objetivo é compreender minuciosamente como a localização de tais fontes de energia afeta as perdas dentro do sistema. Isso implica em uma investigação detalhada, indo além de uma abordagem genérica.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL. (2012). Resolução Normativa ANEEL N° 482. Disponível em: <[https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2020/08/REN-482\\_2012.pdf](https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2020/08/REN-482_2012.pdf)>. Acesso em: 1 dez. 2023
- ANEEL. (2021). Perdas de Energia Elétrica na Distribuição. Disponível em: [https://antigo.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relat%C3%B3rio+Perdas+de+Energia\\_+Edi%C3%A7%C3%A3o+1-2021.pdf/143904c4-3e1d-a4d6-c6f0-94af77bac02a#:~:text=Em%20montantes%20de%20energia%2C%20as,ilustra%20a%20participa%C3%A7%C3%A3o%20dessas%20perdas.&text=1%20O%20mercado%20de%20baixa,injetada%20no%20Brasil%20em%202020](https://antigo.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relat%C3%B3rio+Perdas+de+Energia_+Edi%C3%A7%C3%A3o+1-2021.pdf/143904c4-3e1d-a4d6-c6f0-94af77bac02a#:~:text=Em%20montantes%20de%20energia%2C%20as,ilustra%20a%20participa%C3%A7%C3%A3o%20dessas%20perdas.&text=1%20O%20mercado%20de%20baixa,injetada%20no%20Brasil%20em%202020). Acesso em: 30 nov. 23.
- ANEEL. (2021). Resolução Normativa ANEEL N° 957. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021957.pdf>. Acesso em: 30 nov. 23.
- ANEEL. (2021). Resolução Normativa ANEEL N° 1.000. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>. Acesso: 30 nov. 23.
- BARBOSA, J. V. F. Impactos da geração distribuída no sistema elétrico de potência. 2022. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/32527>. Acesso em: 17 ago. 2023.
- BARROS, B. F. D.; GEDRA, R. L.; BORELLI, R. Geração, Transmissão, Distribuição e Consumo de Energia Elétrica. [S. l.]: Saraiva Educação S.A., [s. d.].
- BNDES Finem - Geração de energia. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finem-energia>>.
- Brasil ultrapassa marca de 10 GW em micro e minigeração distribuída. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/brasil-ultrapassa-marca-de-10-gw-em-micro-e-minigeracao-distribuida>>.
- CASTANEDA, M.; JIMENEZ, M.; ZAPATA, S.; FRANCO, C. J.; DYNER, I. Myths and facts of the utility death spiral. *Energy Policy*, v. 110, p. 105–116, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.07.063>
- COSENT, R.; OLMOS, L.; GÓMEZ, T.; MATEO, C.; FRÍAS, P. Distribution network costs under different penetration levels of distributed generation. *European Transactions on Electrical Power*, v. 21, n. 6, p. 1869–1888, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/etep.503>
- DANTAS, S. G. Oportunidades e desafios da geração solar fotovoltaica no semiárido do Brasil. [S. l.]: Texto para Discussão, 2020. Working Paper. Disponível em: <https://www.econstor.eu/handle/10419/240736>. Acesso em: 18 ago. 2023.
- DE, N.; RIBEIRO, A. Desafios das distribuidoras de energia elétrica frente à difusão dos recursos energéticos distribuídos. [s. d.].
- EVOLUT. O que são e como funcionam as distribuidoras de energia elétrica? Disponível em: <<https://2wecobank.com.br/o-que-sao-e-como-funcionam-as-distribuidoras-de-energia-eletrica/#:~:text=Podemos%20dizer%20que%20uma%20distribuidora>>. Acesso em: 30 nov. 2023.
- FIUZA, E. L. Custos e benefícios para uma empresa de distribuição de energia elétrica decorrentes da inserção de geração distribuída. 2022. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/6214>. Acesso em: 18 ago. 2023.
- Geração Distribuída. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>>. Acesso em: 30 nov. 2023

GOUVÊA, A. R. UMA VISÃO ESTRATÉGICA DO SETOR DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA FRENTE AOS DESAFIOS DA EXPANSÃO DE RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS NO BRASIL. [s. d.].

KERSTING, W. H. Radial distribution test feeders. IEEE Transactions on Power Systems, v. 6, n. 3, p. 975–985, ago. 1991.

Linha de crédito energia solar: conheça 5 alternativas. Disponível em: <<https://blog.intelbras.com.br/linha-de-credito-energia-solar-alternativas/>>. Acesso em: 1 dez. 2023

MERLIN, A.; BACK, H. Search for a Minimal-Loss Operating Spanning Tree Configuration for an Urban Power Distribution System. Proc. of 5th PSCC, 1975, v. 1, p. 1–18, 1975.

PICCIARIELLO, A.; RENESES, J.; FRIAS, P.; SÖDER, L. Distributed generation and distribution pricing: Why do we need new tariff design methodologies? Electric Power Systems Research, v. 119, p. 370–376, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.10.021>

Plano Decenal de Expansão de Energia 2030. . [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2030>. Acesso em: 25 ago. 2023a.

Plano Decenal de Expansão de Energia 2030. . [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2030>. Acesso em: 12 set. 2023b.

Portal Clientes Corporativos - Contribuição de Iluminação Pública. Disponível em: <<https://clientescorporativos.neoenergiapernambuco.com.br/poder-publico/Paginas/contribuicao-de-iluminacao-publica.aspx#:~:text=A%20Contribui%C3%A7%C3%A3o%20de%20Ilumina%C3%A7%C3%A3o%20P%C3%BAblica>>. Acesso em: 30 nov. 2023.

Regulamentação da Lei no 14.300/2022 pela ANEEL: quais as principais alterações? - Greener. Disponível em: <[https://www.greener.com.br/greener\\_artigos/regulamentacao-da-lei-no-14-300-2022-pela-aneel-quais-as-principais-alteracoes/](https://www.greener.com.br/greener_artigos/regulamentacao-da-lei-no-14-300-2022-pela-aneel-quais-as-principais-alteracoes/)>. Acesso em: 20 dez. 2023.

ROY, N. K.; POTA, H. R. Current Status and Issues of Concern for the Integration of Distributed Generation Into Electricity Networks. IEEE Systems Journal, v. 9, n. 3, p. 933–944, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2014.2305282>

SANTOS JR, G. S. DOS. Estudo da capacidade de hospedagem de geradores distribuídos fotovoltaicos em redes de distribuição de baixa tensão: uma abordagem probabilística utilizando simulações de Monte Carlo. 2022. Disponível em: <http://repositorio.ifg.edu.br:8080/handle/prefix/909>. Acesso em: 18 ago. 2023.

SIOSHANSI, R. Retail electricity tariff and mechanism design to incentivize distributed renewable generation. Energy Policy, v. 95, p. 498–508, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.12.041>

Tarifas. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas>>. ANEEL. (2023). Resolução Normativa ANEEL N° 1.059. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>. Acesso: 30 nov. 23.

WAENGA, A. F. C.; PINTO, D. A. F. Impactos da geração distribuída fotovoltaica no sistema de distribuição de energia elétrica. 2016. bachelorThesis - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [s. l.], 2016. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/handle/1/9955>. Acesso em: 18 ago. 2023.