

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

Anderson Kiniti Yamassaki Sussuki

**Simulação e Análise do Impacto da Geração Distribuída em um Sistema de
Distribuição de Energia Elétrica Utilizando o OpenDSS**

São Carlos

2021

Anderson Kiniti Yamassaki Sussuki

**Simulação e Análise do Impacto da Geração Distribuída em um Sistema de
Distribuição de Energia Elétrica Utilizando o OpenDSS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Sistema de Energia e Automação, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Asada Nobuhiro

São Carlos

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Y964s	Yamassaki-Sussuki, Anderson Kiniti Simulação e Análise do Impacto da Geração Distribuída em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando o OpenDSS / Anderson Kiniti Yamassaki-Sussuki; orientador Eduardo Nobuhiro Asada. São Carlos, 2021. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2021. 1. Geração distribuída. 2. OpenDSS. 3. Fluxo de Potência. I. Título.
-------	--

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Anderson Kiniti Yamassaki Sussuki

Título: “Simulação e Análise do Impacto da Geração Distribuída em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando o OpenDSS”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 16 / 12 / 2021,

com NOTA 8,0 (oito,zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Associado Eduardo Nobuhiro Asada - Orientador -
SEL/EESC/USP

Mestre Felipe Markson dos Santos Monteiro - Doutorando -
SEL/EESC/USP

Mestre Antônio Eduardo Ceolin Momesso - Doutorando -
SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Wiliian e Neusa, por terem me criado, por terem me apoiado, por terem me incentivado nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Agradeço ao meu irmão, Massayuki, por sempre trazer momentos de diversão e alegria.

Agradeço a meu professor e orientador, Eduardo, por ter sido o meu orientador durante o desenvolvimento desse trabalho, e pela ajuda e paciência com a qual guiaram o meu aprendizado.

Agradeço aos meus amigos do curso, com quem convivi até hoje, pelo companheirismo e pela troca de experiências que me permitiram crescer.

RESUMO

SUSSUKI, A. K. Y. **Simulação e Análise do Impacto da Geração Distribuída em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando o OpenDSS**. 2021. 73 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo, realizar análises e simulações do impacto da geração distribuída em um sistema de distribuição de energia elétrica real. Para realizar as simulações, informações de uma rede elétrica serão retiradas do banco de dados de uma distribuidora, localizada no interior de São Paulo. Essas informações, serão armazenadas e organizadas no Excel e posteriormente convertida pelo Matlab para a linguagem do OpenDSS. Além destes, será apresentada a modelagem de cada elemento no OpenDSS e suas principais funções para realizar as simulações desejadas. Para melhor compreensão do conteúdo, também será apresentado os conceitos acerca da geração distribuída e os impactos que essa modalidade pode causar na rede elétrica. Além disso, a partir das análises dos resultados das simulações, será verificado que o impacto da geração distribuída está de acordo com a teoria apresentada no capítulo 3. Assim, será simulado e analisado o impacto da geração distribuída em uma rede de distribuição de energia elétrica real, dando foco no fluxo de potência, perdas técnicas e variação do nível de tensão.

Palavras-chaves: Geração distribuída, OpenDSS, Fluxo de Potência

ABSTRACT

SUSSUKI, A. K. Y. Simulation and Analysis of the Impact of Distributed Generation on an Electric Power Distribution System Using OpenDSS 2021 73 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

In recent years, distributed generation continues to grow at a very fast pace. This course conclusion work aims to carry out analyzes and simulations of the impact of distributed generation on a real electrical energy distribution system. To carry out the simulations, information from an electrical network will be taken from the database of a distributor located in the interior of São Paulo. This information will be stored and organized in Excel and later converted by Matlab into the OpenDSS language. In addition to these, the modeling of each element in OpenDSS and its main functions to carry out the desired simulations will be presented. For a better understanding of the content, concepts about distributed generation and the impacts that this modality can cause on the electricity grid will also be presented. In addition, from the analysis of the simulation results, it will be verified that the impact of distributed generation is in accordance with the theory presented in chapter 3. Thus, the impact of distributed generation on an electricity distribution network will be simulated and analyzed real, focus without power flow, giving techniques and voltage level variation.

Keywords: Distributed generation, OpenDSS, Power flow

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Utilização de fontes renováveis e não renováveis para a geração de energia elétrica no Brasil e no mundo para o ano de 2018	21
Figura 2 - Diagrama unifilar de um sistema de distribuição de energia elétrica	25
Figura 3 - Potência instalada da geração distribuída	34
Figura 4 - Rede de distribuição de Energia Elétrica	40
Figura 5 - Fluxograma da ferramenta computacional	43
Figura 6 - Exemplo das coordenadas dos condutores declaradas na sintaxe.....	47
Figura 7 – Localização do capacitor na rede (ponto preto)	53
Figura 8 – Geração eólica média horária de cada mês de 2021 - Brasil.....	57
Figura 9 - Rede de distribuição com a GD (ponto verde)	58
Figura 10 – Fluxo de potência da rede distribuição com GD	60
Figura 11 – Gráfico do fluxo de potência da rede de distribuição	61
Figura 12 – Perdas das potências ativas e reativas em função da potência ativa gerada pela GD	62
Figura 13 – Máxima e mínima tensão em p.u da rede elétrica	63
Figura 14 – Circuit Summary para GD gerando 172 kW	63
Figura 15 – Tensão da linha em função da distância da Subestação	64
Figura 16 – Gráfico do fluxo de potência da rede de distribuição	66
Figura 17 – Fluxo de potência da rede distribuição com GDs	67
Figura 18 – Perdas das potências ativas e reativas da rede elétrica com GDs	68
Figura 19 – Máxima e mínima tensão em p.u da rede elétrica	69
Figura 20 – Tensão da linha em função da distância da Subestação	69
Figura 21 – Curva de carga dos consumidores.....	71
Figura 22 – Curva de carga para as GDs	71
Figura 23 – Fluxo de potência ativa na entrada da rede de distribuição – modo diário	73

Figura 24 – Fluxo de potência reativa na entrada da rede de distribuição – modo diário.....	74
Figura 25 – Tensão de fase na entrada da rede de distribuição – modo diário.....	75
Figura 26 – Valor máximo (azul) e mínimo (verde) de tensão na rede de distribuição – modo diário.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Unidades consumidoras com geração distribuída, março de 2019	34
Tabela 2 – Limites da variação das tensões em regime permanente	37
Tabela 3 - Limite dos indicadores do desequilíbrio de tensão	38
Tabela 4 - Parâmetros do Alimentador (Subestação)	44
Tabela 5 - Parâmetros da linha definido pelo Linecode	45
Tabela 6 – Definição das características dos condutores pelo Wiredata	45
Tabela 7 – Definição das características dos condutores pelo Wiredata	46
Tabela 8 – Definição das linhas	48
Tabela 9 – Parâmetros do Transformador	48
Tabela 10 – Parâmetros da curva de carga	49
Tabela 11 – Modelos de cargas	50
Tabela 12 – Parâmetros das cargas (consumidores)	51
Tabela 13 – Parâmetros do Capacitor	52
Tabela 14 – Dados do banco de capacitores	53
Tabela 15 – Parâmetros do Gerador	54
Tabela 16 – Dados da GD	58
Tabela 17 – Carregamento total do sistema	59
Tabela 18 – Maior fator de desequilíbrio de tensão	65
Tabela 19 – Dados das GDs	65
Tabela 20 – Carregamento total do sistema	66
Tabela 21 - Maior fator de desequilíbrio de tensão	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	–	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABGD	–	Associação Brasileira de Geração Distribuída
ABRADEE	–	Associação Brasileira de Distribuição de Energia Elétrica
Celesc	–	Centrais Elétricas de Santa Catarina
CGE	–	Central Geradora Eoelétrica
CGF	–	Central Geradora Fotovoltaica
CGH	–	Central Geradora Hidrelétrica
DSS	–	Distribution System Simulator
EIA	–	Energy Information Administration
EPRI	–	Electric Power Research Institute
EPE	–	Empresa de Pesquisa Energética
FD	–	Fator de desequilíbrio de tensão
GD	–	Geração Distribuída
GW	–	Giga Watts
Hz	–	Hertz
Km	–	Quilômetro
kV	–	Quilovolt
kVA	–	Quilo Volt Ampére
kVar	–	Quilo volt-ampere reativo
kW	–	Quilowatts
LabTIME	–	Laboratório de Tecnologia da Informação e Mídias Educacionais
Matlab	–	MATrix LABoratory
MVA	–	Mega Volt Ampére
MW	–	Mega Watts
NOS	–	Operado Nacional do Sistema Elétrico
OpenDSS	–	The Open Distribution System Simulator
PRODIST	–	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
Pu	–	Sistema por unidade
REN	–	Resolução Normativa
RMG	–	Raio médio Geométrico

SDAT	–	Sistema de Distribuição de Alta Tensão
SDBT	–	Sistema de Distribuição de Baixa Tensão
SDMT	–	Sistema de Distribuição de Média Tensão
SEP	–	Sistema Elétrico de Potência
UFG	–	Universidade Federal de Goiás
UTE	–	Usina Termelétrica de Energia
UTM	–	Universal Transversa de Mercator
V	–	Volt

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 OBJETIVO	22
1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	23
2 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	24
2.1 SISTEMA DE SUBTRANSMISSÃO	25
2.2 SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO	26
2.3 REDES DE DISTRIBUIÇÃO	27
2.3.1 REDES PRIMÁRIAS	27
2.3.3 TIPOS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO	28
2.3.3.1 REDE DE DISTRIBUIÇÃO AÉREA CONVENCIOAL	28
2.3.3.2 REDE DE DISTRIBUIÇÃO AÉREA COMPACTA.....	28
2.3.3.3 REDE DE DISTRIBUIÇÃO AÉREA ISOLADA OU MULTIPLEXADA	29
2.3.3.4 REDE DE DISTRIBUIÇÃO SUBTERRÂNEA	29
2.4 TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO	30
2.5 OUTROS ELEMENTOS DA REDE ELÉTRICA	30
3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	32
3.1 RESOLUÇÃO NORMATIVA N°482.....	32
3.2 CRESCIMENTO DA GD	33
3.3 IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO	35
3.3.1 FLUXO DE POTÊNCIA	35
3.3.2 VARIAÇÃO NO NÍVEL DE TENSÃO	36
3.3.2.1 ELEVAÇÃO DO NÍVEL DE TENSÃO.....	37
3.3.2.2 QUEDA DE TENSÃO	38
3.3.3 DESEQUILÍBRIO NO NÍVEL DE TENSÃO.....	38
3.3.4 PERDAS TÉCNICAS	39

4 METODOLOGIA.....	40
4.1 DESCRIÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO	40
4.2 MODELAGEM DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO.....	42
4.3 SOFTWARE OPENDSS	43
4.3.1 DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS.....	43
4.3.1.1 BARRAMENTO DO ALIMENTADOR	44
4.3.1.2 PARÂMETROS DAS LINHAS: LINECODE.....	44
4.3.1.3 PARÂMETROS DAS LINHAS: WIREDATA E LINEGEOMETRY	45
4.3.1.4 DEFINIÇÃO DAS LINHAS	47
4.3.1.5 TRANSFORMADORES.....	48
4.3.1.6 CURVA DE CARGA.....	49
4.3.1.7 CARGAS (CONSUMIDORES).....	50
4.3.1.8 CAPACITOR	52
4.3.1.9 GERADORES	53
4.3.2 FUNÇÕES PARA ANÁLISE	54
4.4 SIMULAÇÃO.....	55
5 ANALISE E RESULTADO DA SIMULAÇÃO	58
5.1 UMA GD TRIFÁSICA CONECTADA NA REDE PRIMÁRIA	58
5.1.1 ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA	59
5.1.2 ANÁLISE DAS PERDAS	62
5.1.3 ANÁLISE DAS TENSÕES	63
5.2 GDs INSTALADAS PRÓXIMA AS CARGAS	65
5.2.1 ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA.....	66
5.2.2 ANÁLISE DAS PERDAS	68
5.2.3 ANÁLISE DAS TENSÕES	68
5.3 GDs INSTALADAS PRÓXIMA AS CARGAS – MODO DIÁRIO	70
5.3.1 ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA.....	72

5.3.2 ANÁLISE DAS TENSÕES	75
6 CONCLUSÃO.....	78
REFERÊNCIAS	80
Apêndice A – Código do OpenDSS para a seção 5.1	83
Apêndice B – Código do OpenDSS para o a seção 5.2	84
Apêndice C – Código do OpenDSS para o a seção 5.3	85

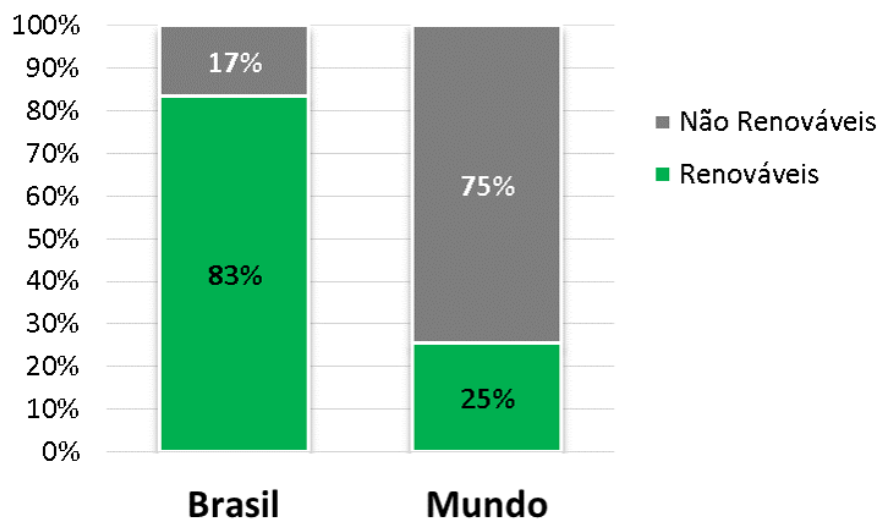
1 INTRODUÇÃO

Atualmente, é impossível de imaginar um mundo sem energia elétrica. Desde da segunda revolução industrial, relacionamos a energia elétrica com o desenvolvimento socioeconômico de um país. De fato, a substituição da energia a vapor pela elétrica fez com que as indústrias desenvolvessem diversos instrumentos, possibilitando a produção em massa. Além disso, a eletricidade possibilitou o desenvolvimento de sistemas de iluminação, transportes elétricos e causou grandes avanços no campo de comunicação.

No entanto, muitos países estão preocupados com os recursos energéticos que são finitos já que o crescimento da demanda de energia elétrica é diretamente proporcional ao crescimento da sociedade (FINKLER .A *et al.*, 2016).

Neste contexto, além da questão do aumento da demanda de energia elétrica, há também a preocupação com os efeitos de poluição causados, principalmente pelos combustíveis fósseis. Logo, diversos países estão buscando transformar a sua matriz energética para continuar a crescer de maneira sustentável.

Figura 1 - Utilização de fontes renováveis e não renováveis para a geração de energia elétrica no Brasil e no mundo para o ano de 2018



Fonte: (EPE, 2021)

A Figura 1 mostra como a matriz elétrica brasileira é muito mais limpa que a matriz elétrica mundial. Verifica-se que 83% de toda a produção de energia elétrica do Brasil é de origem de recursos renováveis. Devido ao grande potencial hídrico, a maior parte da energia elétrica é produzida em usinas hidrelétricas. Entretanto, desde o racionamento de energia

ocorrido em 2001, o Brasil vem procurando diversificar a sua matriz elétrica. Naquela época, o país era muito dependente das usinas hidrelétricas, e com a crise hídrica, foi revelado como o sistema de geração brasileira era frágil (DIAS, BORTONI e HADDAD, 2005). Sendo assim, a geração distribuída é um dos fatores importantes para a diversificação da matriz elétrica a fim de diminuir a dependência de fontes hídricas.

Geração distribuída é o termo utilizado para se referir à energia elétrica gerada em pequenas centrais geradoras localizadas juntas ou próximas aos consumidores. Desde a publicação da Resolução Normativa (REN) ANEEL nº 482/2012, o consumidor é permitido gerar sua própria energia elétrica e fornecer o excedente de energia para a rede de distribuição local. Após a norma entrar em vigor, a geração distribuída expandiu-se de forma muito lenta, pois a tecnologia era bastante recente para a população (EPE, 2016).

A geração distribuída (GD) começou a crescer recentemente porque os consumidores perceberam que essa é uma forma de reduzir as contas de energia, que encarecem em épocas de seca. No Brasil, a matriz com maior destaque na GD é a energia solar, pois ela é limpa e renovável. Além disso, o país possui um enorme território para instalação de placas solares e um excelente potencial de captação de energia solar (EPE, 2019).

1.1 OBJETIVO

Tendo como motivação a geração distribuída, o objetivo principal deste trabalho de conclusão de curso é estudar o comportamento de uma rede de distribuição real, ao adicionar as mini e micro gerações que continua a crescer no país.

A maioria das redes elétricas não foram projetadas para suportar grandes quantidades de micro e minigerações distribuídas. Quando o consumidor gerar mais do que o necessário, o excedente de energia é injetada na rede elétrica surgindo fluxos de potência reversos (SHAYANI, 2010).

Deste modo, pretende-se analisar os impactos causados pela GD em diferentes níveis de potência e situações, verificando os seguintes itens:

- A intensidade e sentido do fluxo de potência na rede elétrica;

- As perdas técnicas;
- A variação do nível de tensão ao longo da rede;
- O nível de desbalanço de tensão;

Para a simulação da rede de distribuição será utilizada a ferramenta computacional OpenDSS (Open Distribution System Simulator) versão 9.0.0.3 e os dados da rede serão retirados de um sistema elétrico real.

1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este trabalho de conclusão de curso está estruturado em 6 capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução, descrevendo o cenário da matriz elétrica brasileira e um breve resumo sobre a geração distribuída.

O segundo capítulo apresenta as principais características do sistema de distribuição de energia elétrica abordando os componentes que formam o sistema.

No terceiro capítulo, são apresentadas as principais características da geração distribuída e alguns dos seus impactos sobre a rede elétrica. Também apresenta a norma que regulamentou a geração distribuída e o seu crescimento nesses últimos anos.

O quarto capítulo apresenta a metodologia de simulação computacional utilizada para simulação do sistema.

No quinto capítulo são apresentados os resultados das simulações computacional e as análises dos mesmos.

Por fim no sexto capítulo são apresentadas as principais conclusões do estudo realizado.

2 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O sistema de distribuição de energia elétrica é a última infraestrutura do sistema elétrico de potência (SEP), sendo responsável por carregar energia de forma segura, estável e com qualidade até os consumidores finais. Esse sistema está localizado após os sistemas de transmissão, cuja função é transportar a energia gerada até as subestações do sistema de distribuição.

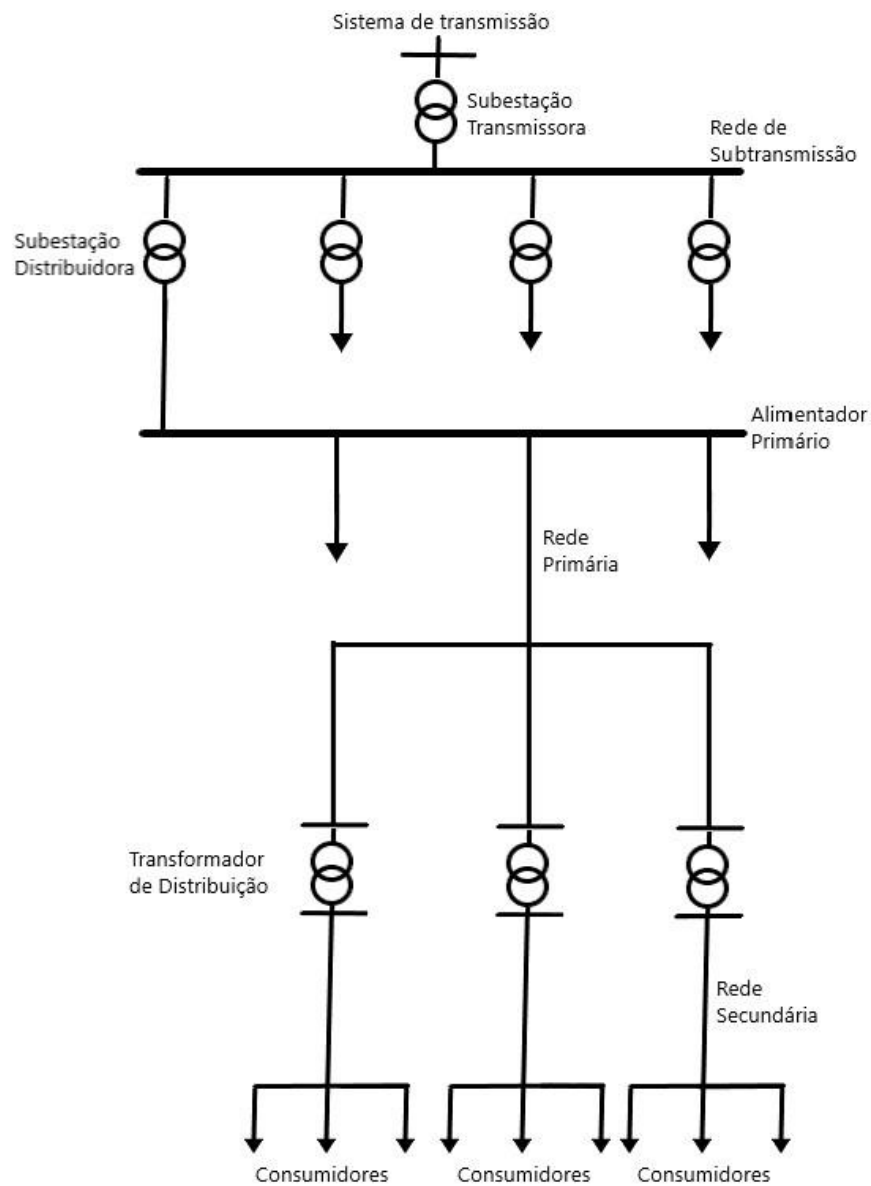
Definido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), um sistema de distribuição é o conjunto de instalações e equipamentos elétricos que levam eletricidade até os consumidores, podendo operar em níveis de tensão alta, média e baixa (ANEEL, 2018b). No módulo 1 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), as faixas de tensão de cada nível estão definidas da seguinte maneira:

- Sistema de distribuição de alta tensão (SDAT): Redes elétricas de distribuição que operam em tensões iguais ou superiores a 69 kV e inferiores a 230 kV, ou instalações em tensão igual ou superior a 230 kV quando definidas especificamente pela ANEEL;
- Sistema de distribuição de média tensão (SDMT): Redes elétricas de distribuição que operam em tensões superiores a 1 kV e inferiores a 69 kV;
- Sistema de distribuição de baixa tensão (SDBT): Redes elétricas de distribuição que operam em tensões nominais inferiores ou iguais a 1 kV;

Conforme o diagrama unifilar da Figura 2, o sistema de distribuição possui estruturas importantes para ligar a rede de transmissão às unidades consumidoras. Esse sistema é formado pelas seguintes estruturas:

- Sistema de subtransmissão;
- Subestação de distribuição;
- Redes primárias;
- Transformadores de distribuição;
- Redes secundárias;

Figura 2 - Diagrama unifilar de um sistema de distribuição de energia elétrica



Fonte: Elaborada pelo Autor

2.1 SISTEMA DE SUBTRANSMISSÃO

As linhas do sistema de subtransmissão são circuitos que se encontram depois da rede de transmissão. Em geral, essas linhas operam na faixa de tensão de 69 a 138 kV e possuem alta capacidade de transferência de potência, podendo chegar a 150 MW. Sua principal função é alimentar as subestações de distribuição, mas também podem ser utilizadas para suprir

grandes consumidores industriais e aumentar o desempenho da rede, melhorando a regulação de tensão e aumentando a capacidade de manobra do sistema elétrico de distribuição (ANEEL, 2018c).

O sistema de subtransmissão pode ser construído em configuração radial, que é simples e barato. Contudo, essa configuração tem baixa confiabilidade, pois ocorre o risco de uma falha na rede de subtransmissão interromper o fornecimento de energia em muitas subestações de distribuição. Assim, as linhas de subtransmissão também podem ser operadas em configurações diferentes, tais como: radiais redundantes, anel e em malha (GARCIA e DUZZI JUNIOR, 2012). Essas configurações são complexas, caras e de alta confiabilidade quando comparadas com a configuração radial. Necessitam de uma rede mais sofisticada e precisa elaborar cuidadosamente o sistema de proteção para manobrar o sistema quando for preciso.

2.2 SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO

As subestações de distribuição são as unidades localizadas entre as linhas de subtransmissão e as redes primárias. Nessas instalações, o nível de tensão da energia elétrica vinda das linhas de subtransmissão é reduzido para valores de média tensão, pelos transformadores de força localizados no pátio da subestação. Após reduzir o nível de tensão, a energia elétrica será distribuída pelas redes primárias (ANEEL, 2018d).

Na subestação de distribuição, encontram-se um conjunto de componentes elétricos responsáveis pelo controle do fluxo de energia, seccionamento, proteção e medição. Por meio desses componentes, a subestação de distribuição busca garantir o fornecimento de energia de forma contínua e segura aos centros consumidores.

Normalmente, as subestações de distribuição são construídas próximas aos centros consumidores, já que são elas que distribuem a energia para as redes primárias. No entanto, as distribuidoras de energia estão constantemente preocupadas com o espaço necessário para a implantação de novas subestações de distribuição. Atualmente, com o avanço da tecnologia, existem algumas soluções para tornar a estrutura da subestação compacta, reduzindo o custo e o espaço necessário para sua instalação (ABRADEE).

2.3 REDES DE DISTRIBUIÇÃO

A maioria das entregas de energia elétrica até os consumidores, são realizadas pelas redes de distribuição primárias e secundárias. Essas redes operam, respectivamente, em média e baixa tensões, fornecendo energia aos pequenos e médios consumidores.

2.3.1 REDES PRIMÁRIAS

As redes primárias são circuitos elétricos trifásicos, normalmente a três fios, vindos de uma subestação de distribuição que reduz as tensões de subtransmissão em tensões de distribuição primárias, variando de 2,3 kV a 34,5 kV. Apesar da legislação ter padronizado os níveis de tensão para 13,8 kV e 34,5 kV, outros níveis de tensão continuam a existir e operar normalmente (GARCIA e DUZZI JUNIOR, 2012). Essas redes podem ser encontradas facilmente nas áreas urbanas e rurais, usualmente são redes aéreas trifásicas sustentadas por cruzetas de madeira em postes de concreto.

Na grande maioria, essas redes operam na configuração radial, tendo seus fluxos de potência unidirecional no sentido fonte para carga. As redes primárias transportam energia elétrica até os transformadores de distribuição dispostos ao longo da rede de distribuição, e atende indústrias, conjuntos comerciais e outros consumidores de média tensão.

Nas redes de distribuição primárias, equipamentos auxiliares, como banco de capacitores e reguladores de tensão, costumam ser instalados para corrigir anomalias na rede (ABRADEE). Ambos são, frequentemente, utilizados para resolver problemas de queda de tensão e minimizar perdas de energia.

2.3.2 REDES SECUNDÁRIAS

O sistema de distribuição de energia elétrica é completado pelas redes de distribuição secundárias. Essas redes operam em baixos níveis de tensão, sendo responsáveis por levarem a energia elétrica até as residências, comércio e pequenas indústrias. As redes secundárias são conectadas às redes de distribuição primárias por transformadores de distribuição, geralmente instalados nos postes das redes aéreas. No Brasil, essas redes operam com tensões padronizadas de 220/127 V ou 380/220 V, com linhas de ordem de algumas centenas de metros (ANEEL, 2018d).

As redes secundárias podem ser construídas em topologias radiais ou em malha. A maioria das redes secundárias são inicialmente construídas em malha. Quando a carga instalada atinge o limite, a rede é dividida em redes radiais, instalando outros transformadores de distribuição.

2.3.3 TIPOS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Existem quatro tipos de redes de distribuição de energia elétrica que são, aérea convencional, aérea compacta, aérea isolada e subterrânea.

2.3.3.1 REDE DE DISTRIBUIÇÃO AÉREA CONVENCIONAL

A rede de distribuição aérea convencional é o tipo de rede mais comum no Brasil. Sua principal característica é que os condutores nus de alumínio ou cobre são dispostos horizontalmente e apoiados nos isoladores fixados na cruzeta. A disposição horizontal permite uma maior distância entre os cabos, contribuindo para segurança dos funcionários, pois facilita a montagem de estruturas, instalação de equipamentos e os serviços de manutenção (CELESC, 2020).

Os condutores nus são cabos sem proteção ou isolamento. Em instalações aéreas, esses cabos são bastante vulneráveis a fenômenos naturais. Um animal ou uma árvore pode fechar curto ao tocar na rede, descargas atmosféricas e tensões induzidas podem produzir surtos de tensão de valores elevados, e tempestades podem causar acidentes envolvendo a rede elétrica. Portanto, a rede aérea convencional necessita de serviços de manutenção constante, de modo a evitar um possível problema capaz de danificar os equipamentos da rede e os consumidores.

2.3.3.2 REDE DE DISTRIBUIÇÃO AÉREA COMPACTA

Surgida no Brasil na década de 1990, as redes aéreas compactas são redes de distribuição formadas por cabos protegidos e disposto em um arranjo triangular compacto. Nessa rede, os condutores de fase possuem uma cobertura polimérica e ficam apoiados em espaçadores lonsangulares sustentados por um cabo mensageiro (CELESC, 2020).

Esse tipo de rede apresenta melhor robustez e confiabilidade quando comparada com a rede aérea convencional. Graças a isolação, a rede fica protegida contra eventos de toque de vegetação e animais, evitando curtos-circuitos. Além disso, a estrutura compacta permite a construção de circuitos múltiplos num mesmo poste, já que ocupam pouco espaço no poste.

Portanto, as redes compactas são aplicadas em regiões arborizadas onde há risco de toque, e na saída de subestações ou locais que requeiram mais de um alimentador por poste. Entretanto, não é recomendado utilizar essa estrutura em regiões com alto grau de salinidade ou poluição corrosiva, pois o material polimérico não é apropriado para esses tipos de ambientes.

2.3.3.3 REDE DE DISTRIBUIÇÃO AÉREA ISOLADA OU MULTIPLEXADA

A rede aérea isolada é bastante protegida e tem o maior custo de instalação comparada com as outras estruturas aéreas. Esse tipo de rede utiliza condutores multiplexados que são cabos de fase isolados, blindados e enrolados em volta de um cabo mensageiro de liga de alumínio que serve de sustentação (CELESC, 2020).

Apesar de ser cara, esse tipo de rede apresenta a melhor confiabilidade entre as redes aéreas. Graças a isolação, a rede fica completamente protegida contra eventos de toque de vegetação ou animais sendo desnecessário realizar a poda de árvore. Além disso, diferente da rede aérea compacta, os materiais isolantes dessa rede permitem a aplicação em ambientes com alto grau de salinidade e poluição. Em relação aos eventos de descargas atmosféricas, os condutores multiplexados possuem blindagem metálica aterrada cuja função é ser um condutor para transporte de correntes induzidas e de curto-circuito.

2.3.3.4 REDE DE DISTRIBUIÇÃO SUBTERRÂNEA

Apesar do alto custo, as redes subterrâneas oferecem o maior nível de confiabilidade e também o melhor resultado estético, pois ficam enterradas. Nesse tipo de rede, os condutores isolados e blindados são colocados dentro de eletrodutos corrugados enterrados. A rede subterrânea pode ser semienterrada, quando possui os cabos enterrados e os equipamentos instalados sobre o solo, ou totalmente enterrada onde todos os equipamentos elétricos são totalmente enterrados. A escolha do arranjo depende da área e do limite de custo disponível (CELESC, 2020).

Diferente das linhas aéreas, a rede subterrânea está praticamente protegida contra eventos climáticos, toques de vegetação e animais. Os materiais isolantes dessa rede permitem a aplicação em qualquer ambiente, tornando menor o custo de manutenção da rede. Entretanto, a rede subterrânea apresenta desvantagem em momentos de falhas, pois a rede enterrada dificulta a localização do defeito.

Portanto, as redes subterrâneas são bem mais caras que as demais redes, sendo comum utilizar em regiões com densidade de carga superior a 10 MVA/km² ou onde há restrições para a instalação das redes aéreas.

2.4 TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

Os transformadores de distribuição são responsáveis por reduzir a tensão primária (média tensão) para tensão secundária (baixa tensão). Normalmente, os transformadores de distribuição são trifásicos, com enrolamento primário na conexão delta e enrolamento secundário na conexão estrela aterrada. Apesar de não ser uma solução muito usual, em alguns casos, utilizam-se transformadores monofásicos, sendo restrita a algumas empresas de distribuição (CASSEL, 2012).

Diferente dos transformadores de subestações, os transformadores de distribuição são instalados diretamente nos postes. A partir do transformador de distribuição, derivam, as redes de distribuição secundárias atendendo os pequenos consumidores. Desse modo, esses transformadores, geralmente, são encontrados próximos ao local de consumo.

2.5 OUTROS ELEMENTOS DA REDE ELÉTRICA

Além dos elementos responsáveis pela distribuição da energia elétrica, existem equipamentos responsáveis pela qualidade de energia e proteção do sistema. A qualidade de energia e o sistema de proteção são fatores importantes para a operação segura do sistema de distribuição de energia elétrica. Com os equipamentos dimensionados corretamente, os dispositivos elétricos da rede terão uma vida útil maior e o risco de danos elétricos nos aparelhos dos consumidores será pequeno.

A seguir são apresentados os principais equipamentos responsáveis pelo sistema de proteção e qualidade de energia.

- **Bancos de Capacitores:** equipamento utilizado para corrigir o fator de potência ou compensar o uso de energia reativa, melhorando os níveis de tensão na rede de distribuição. Os capacitores podem ser instalados em série ou em paralelo conforme a necessidade do sistema.
- **Chave Fusível:** equipamento destinado para a proteção contra sobrecorrentes nas redes primárias.
- **Chaves Seccionadoras:** equipamento com a função de isolar partes da rede elétrica. Em geral, são utilizadas pelas permissionárias para realizar manobras/manutenção no sistema.
- **Regulador de Tensão:** equipamento instalado em redes de distribuição aérea e subestações. São autotransformadores com a finalidade de manter constante a tensão de saída de um circuito elétrico, independente da tensão de entrada.
- **Religador:** equipamento com a função de proteger a rede elétrica contra surtos de energia e problemas transitórios. Tipicamente são instalados em redes aéreas, e buscam reduzir o tempo de interrupção de fornecimento de energia em casos de problemas temporários.

3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Geração distribuída é o termo utilizado para se referir à energia elétrica gerada em pequenas centrais geradoras localizadas juntas ou próximas aos consumidores. Esse tipo de geração é conectada à rede de distribuição, e de maneira geral, a produção de energia elétrica é realizada por cogeração qualificada ou por fontes de energia renováveis, tais como solar, eólica, hídrica e biomassa (ANEEL, 2018a).

Desde a publicação da Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o consumidor ganhou liberdade para gerar sua própria energia elétrica e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. Após a norma entrar em vigor, a geração distribuída expandiu-se de forma muito lenta, pois a tecnologia era bastante recente para a população. O crescimento mais intenso dessa modalidade, e de forma rápida, aconteceu recentemente, tendo como principal destaque a geração distribuída solar fotovoltaica (EPE, 2016).

No entanto, o crescimento da geração distribuída pode causar grandes impactos no sistema de distribuição. A maioria das redes de distribuição foram projetadas para operar de forma radial, isto é, transportam a energia da subestação até os consumidores. Com a inserção da geração distribuída, tornou-se possível injetar potência nas redes de distribuição convencionais, tendo a possibilidade de prejudicar ou auxiliar o funcionamento do sistema (GONÇALVES, BALLERINI e FREITAS, 2016).

3.1 RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº482

Em 2004, a geração distribuída foi descrita pela primeira vez no Artigo 14º do Decreto Lei nº 5.163/2004, que regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica. Mais tarde, surgiram várias resoluções normativas que abordaram aspectos da geração distribuída, até que surgiu a REN nº 482 (SILVA, SANTOS, *et al.*, 2020).

Publicada pela ANEEL em 17 de abril de 2012, a REN nº 482/2012 “estabeleceu 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 outras providências” (ANEEL, 2012). Posteriormente, surgiram as REN nº 687/2015 e REN nº 786/2017, atualizando a REN nº 482. Segundo essas resoluções, os conceitos de microgeração e minigeração distribuída ficaram definidos como:

- Microgeração: central geradora de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 75kW;
- Minigeração: central geradora de energia elétrica com potência instalada entre 75kW a 5MW;

A REN nº 482/2012 também aborda o sistema de compensação de energia elétrica que permite ao consumidor de micro e minigeração de energia, injetar o excedente de energia de sua autoprodução na rede distribuidora local (ANEEL, 2012). A energia injetada na rede não é convertida em dinheiro, mas o consumidor recebe um crédito de energia que pode ser utilizado para abater as faturas dos próximos meses ou em outras unidades consumidoras. Atualmente, esses créditos de energia ficam válidos por 60 meses (ANEEL, 2018a).

Em 2015, surgiram duas novas modalidades na geração distribuída: a geração compartilhada e autoconsumo remoto. Criada pela ANEEL na REN nº 687/2015, a geração compartilhada possibilita o compartilhamento da energia gerada por micro ou minigeração entre grupo de consumidores, desde que todos os participantes estejam localizados na mesma área de concessão ou permissão (ANEEL, 2015).

Criado na mesma resolução, o autoconsumo remoto permite o consumo da energia gerada por micro e minigeração em outro estabelecimento ou residência, além do local de geração. Para utilizar a energia gerada em locais diferentes, é necessário que todos os lugares estejam cadastrados no mesmo CPF ou CNPJ e que estejam na mesma área de concessão ou permissão (ANEEL, 2015).

3.2 CRESCIMENTO DA GD

No mercado brasileiro, o crescimento mais intenso da geração distribuída aconteceu a partir de 2015. O enorme potencial da energia renovável, a qualidade dos recursos energéticos do país, o encarecimento da conta de energia para os consumidores e o sistema de compensação de créditos extremamente favorável, são os principais motivos pelos quais os consumidores adotam a geração distribuída (EPE, 2016).

Desde a época em que a REN nº 482/2012 entrou em vigor, a geração solar fotovoltaica tem dominado o mercado de geração distribuída no Brasil. O interesse dos consumidores pela energia solar é devido ao aumento das tarifas de energia elétrica nesses últimos anos, a

facilidade de instalação dos painéis solares em qualquer área e a redução do custo médio das placas fotovoltaicas (SILVA, SANTOS, *et al.*, 2020). Somado a isso, a crise hídrica de 2020-2021 vem impulsionado fortemente o mercado de energia solar no Brasil (CASTRO, 2021). De acordo com a Tabela 1, a geração distribuída fotovoltaica representou 84,4% de potência instalada em 2019. Já em quantidade de instalações, 99,6% das unidades são centrais geradoras fotovoltaica.

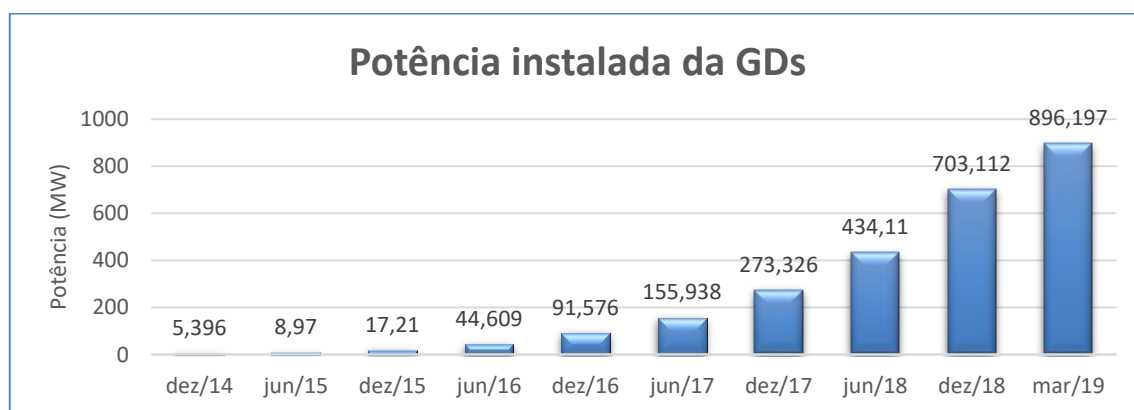
Tabela 1 - Unidades consumidoras com geração distribuída, março de 2019

Tipo	Quantidade	% do total	Potência Instalada (kW)	% do total
Central Geradora Hidrelétrica (CGH)	86	0,1	84.923	9,5
Usina Termelétrica de Energia (UTE)	159	0,2	44.703	5,0
Central Geradora Eolétrica (CGE)	87	0,1	10.314	1,2
Central Geradora Fotovoltaica (CGF)	72.504	99,6	756.257	84,4
Total	72.806	100	896.197	100

Fonte: (ANEEL, 2019b)

No gráfico da Figura 3, é possível observar a evolução da potência instalada da geração distribuída no Brasil. Observa-se que a partir do ano de 2016 (Dez/16) até ano de 2017 (Dez/17), a geração distribuída teve um aumento de 181.750 kW (aproximadamente 200%). Já do ano de 2017 (Dez/17) ao ano de 2018 (Dez/18), o crescimento foi mais expressivo, com um aumento de 429.786 kW (aproximadamente 157%).

Figura 3 - Potência instalada da geração distribuída



Fonte: Elaborado pelo Autor com base na (ANEEL, 2019b)

De acordo com a ANEEL, o Brasil ultrapassou a marca de 1 GW de potência instalada em micro e minigeração distribuída de energia elétrica em junho de 2019. Segundo a entidade, 82,6 mil instalações são CGFs, com cerca de 870 MW de potência instalada ao total (ANEEL, 2019a).

Recentemente, o Brasil atingiu os 7 GW de potência instalada em geração distribuída. A fotovoltaica continua a dominar o mercado, representando mais de 95% do total, com capacidade instalada de 6,82 GW. Em seguida temos a biomassa com 1,6%, centrais geradoras hidrelétricas com 0,94% e energia eólica com 0,22% (PORTAL SOLAR, 2021).

3.3 IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

A maioria das redes de distribuição operam radialmente, com fluxo de potência unidirecional no sentido fonte à carga. Quando pequenas quantidades de GDs são conectadas na rede, o impacto é insignificante. Entretanto, quando a potência gerada pelas GDs começa a superar a potência da carga, a energia sobrada é injetada na rede local. A sobra de energia injetada na rede elétrica produz fluxos de potência com sentido reverso. As redes de distribuição passam a receber a potência dos geradores distribuídos, podendo trazer vantagens e desvantagens para o sistema (GONÇALVES, BALLERINI e FREITAS, 2016).

Nesta seção, serão apresentados os possíveis impactos que a geração distribuída pode vir a causar na rede elétrica.

3.3.1 FLUXO DE POTÊNCIA

Com o crescimento acelerado da geração distribuída, vários pontos de geração interligados à rede de distribuição estão surgindo em diversos locais. Entretanto, as distribuidoras não têm controle sobre as GDs, pois elas podem gerar mais ou menos energia que o necessário. Devido essas características dessa modalidade, as distribuidoras de energia não podem tratar os geradores que estão espalhados pela rede como uma segunda entrada de energia. É necessário analisar cuidadosamente os efeitos que a geração distribuída pode causar no sistema de distribuição (SHAYANI, 2010).

No sistema de distribuição convencional, o fluxo de potência é unidirecional. Resumidamente, a energia elétrica é gerada por grandes centrais de geração de energia,

transportada pela linha de transmissão e distribuída para os consumidores através do sistema de distribuição. Neste contexto, o fluxo de potência que sai da subestação distribuidora deve ser igual à soma dos fluxos de potência que atendem os consumidores, mais as perdas dissipadas durante a distribuição.

Com a instalação da geração distribuída juntas ou próximas aos consumidores, o fluxo de potência poder ter um comportamento bastante diferente do sistema de distribuição convencional. A instalação de GDs próximas às cargas podem contribuir na redução da demanda de potência na subestação. No entanto, além das GDs atenderem os consumidores, também podem injetar o excedente de energia na rede de distribuição, produzindo um fluxo de potência no sentido reverso (sentido carga à fonte). Em grande escala, esse fluxo de potência pode acabar fornecendo energia para a subestação (SHAYANI, 2010).

O excesso de GDs na rede de distribuição pode causar problemas na regulação de tensão, aumentando a complexidade de operação do sistema, e comprometendo a vida útil de cabos e equipamentos de proteção e controle de tensão. Nos reguladores de tensão, por exemplo, o fluxo de potência reverso pode afetar negativamente a coordenação de proteção e operação, podendo violar o limite de tensão determinado pelo órgão regulador (KATIRARE e AGUERO, 2011).

3.3.2 VARIAÇÃO NO NÍVEL DE TENSÃO

A regulação de tensão é um dos parâmetros importante na qualidade de energia. Nos sistemas de distribuição convencional, sem a instalação da geração distribuída, o fluxo de potência diminui à medida que se distancia da subestação, pois parte da energia é dissipada pelos condutores e equipamentos elétricos da rede. Consequentemente, o nível de tensão também diminui ao longo da rede, conforme se distancia da subestação (TARANTO, FALCÃO, *et al.*, 2017). Para realizar o controle de tensão, as distribuidoras utilizam diversos equipamentos, tais como banco de capacitores, reguladores de tensão, compensadores estáticos, entre outros. No entanto, a operação e proteção desses equipamentos devem ser analisado ao instalar GDs na rede elétrica. Os bancos de capacitores, por exemplo, podem aumentar o nível de tensão acima dos limites estabelecidos pela ANEEL quando operarem juntos com as GDs.

Dependendo da quantidade de energia gerada, a presença da geração distribuída nas redes de distribuição pode complicar os problemas relacionados a variação de tensão. Essas variações devem ser pequenas para não danificar ou diminuir a vida útil dos equipamentos

elétricos da rede. Além disso, grandes variações de tensão também prejudicam a qualidade de energia podendo danificar os aparelhos elétricos dos consumidores (PALUDO, 2014).

O módulo 8 do PRODIST determina o limite de variação das tensões em regime permanente. A tabela 2 mostra os limites da variação para três faixas de tensões. Essas faixas são apresentadas, pois, a rede elétrica que será simulada possui linhas operando nessas três faixas.

Tabela 2 – Limites da variação das tensões em regime permanente

Tensão	Adequada	Precária	Crítica
Média tensão 1kV < V < 69kV	$0,93 \text{ pu} \leq V \leq 1,05 \text{ pu}$	$0,90 \text{ pu} \leq V < 0,93 \text{ pu}$	$V < 0,90 \text{ pu}$ ou $V > 1,05 \text{ pu}$
Baixa tensão 230/115V 220/127V	$0,92 \text{ pu} \leq V \leq 1,05 \text{ pu}$	$0,87 \text{ pu} \leq V < 0,92 \text{ pu}$ ou $1,05 \text{ pu} < V \leq 1,06 \text{ pu}$	$V < 0,87 \text{ pu}$ ou $V > 1,06 \text{ pu}$

Fonte: (ANEEL, 2021)

3.3.2.1 ELEVAÇÃO DO NÍVEL DE TENSÃO

A inserção da geração distribuída em um ponto da rede elétrica eleva as tensões no ponto de conexão e nos pontos arredores a este. A elevação do nível de tensão acontece quando a GD começa a gerar energia para suprir a carga. Nesse contexto, a GD injeta potência no sistema de distribuição, aumentando a tensão das barras, podendo causar sobretensão em determinados pontos da rede (TARANTO, FALCÃO, *et al.*, 2017).

No entanto, a GD pode ser utilizada para ajudar em momentos de subtensão, isto é, quando as quedas de tensão ao longo da rede são extremas. Assim, as GDs podem agir como reguladores de tensão, alimentando o sistema de distribuição em horários de alto consumo de energia (SHAYANI, 2010). Nesta situação, é necessário monitorar as tensões para que não ultrapassem os limites estabelecidos pela ANEEL.

3.3.2.2 QUEDA DE TENSÃO

Como visto anteriormente, as GDs podem agir como reguladora de tensão, reduzindo as quedas de tensão ao longo do alimentador. De maneira geral, o aumento de tensão na rede apresenta aspectos positivos já que melhora o perfil da tensão no alimentador. Entretanto, quando a GD abastece uma parcela considerável das cargas, seu desligamento imprevisto fará com que a corrente necessária para manter o sistema em funcionamento seja totalmente fornecida pela subestação, aumentando instantaneamente a queda de tensão no ramal (SHAYANI, 2010). Dependendo da situação, a queda de tensão pode ser drástica, causando problemas de subtensão.

3.3.3 DESEQUILÍBRIO NO NÍVEL DE TENSÃO

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes e/ou na defasagem elétrica de 120° entre às três tensões de fase de um determinado sistema trifásico (ANEEL, 2021). A expressão para o cálculo do desequilíbrio de tensão é:

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} 100 \quad (1)$$

- FD%: fator de desequilíbrio de tensão
- V-: Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa
- V+: Magnitude da tensão eficaz de sequência positiva

Os limites do indicador de desequilíbrio de tensão estão na Tabela 3.

Tabela 3 - Limite dos indicadores do desequilíbrio de tensão

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
FD95%	3,0 %	2,0%

Fonte: (ANEEL, 2021)

Na geração distribuída, existem geradores monofásicos e bifásicos que injetam energia apenas nas fases conectadas. Antes de inserir esses tipos de GDs, é importante analisar se o desequilíbrio de tensão será afetado pela ligação desses geradores, já que eles injetam potência apenas nas fases conectadas.

A tensão desequilibrada causará consequências prejudiciais na operação de certos equipamentos elétricos principalmente de outros consumidores, comprometendo o seu desempenho e sua vida útil. Além disso, o desequilíbrio de tensão também causa o aumento das perdas elétricas, contribuindo para o desperdício de energia elétrica (PAULILO, 2013).

3.3.4 PERDAS TÉCNICAS

As perdas técnicas são inerentes à atividade de distribuição de energia elétrica. No processo de distribuição, parte da energia é perdida pelo efeito Joule, isto é, transformação da energia elétrica em energia térmica nos condutores. Além disso, há perdas no núcleo do transformador causada pelas correntes parasitas, e perdas dielétricas causada pelo material isolante (ANEEL, 2019c).

Com a GD, a energia gerada próxima dos consumidores não precisa percorrer toda linha de distribuição. Consequentemente, haverá menos fluxo de potência circulando sobre a rede elétrica, reduzindo as perdas técnicas.

No entanto, um fluxo de potência reverso pode surgir com o excesso de geração de energia elétrica, aumentando as perdas técnicas nas linhas de distribuição e podendo danificar ou diminuir a vida útil dos equipamentos elétricos da rede (KATIRARE e AGUERO, 2011).

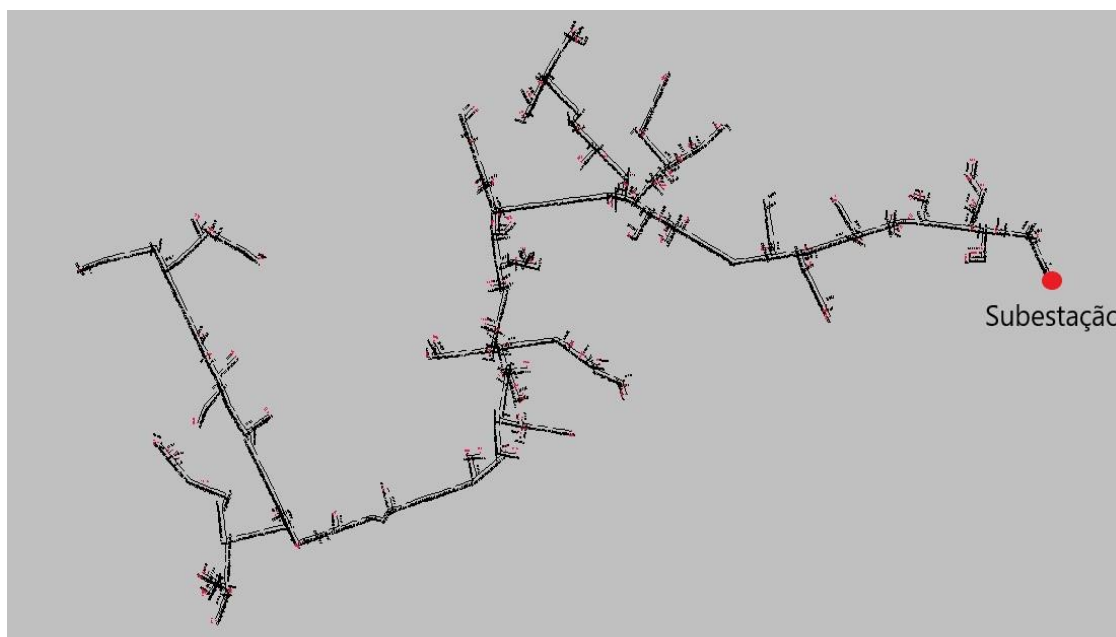
4 METODOLOGIA

Neste capítulo será abordada a descrição da rede de distribuição disponibilizado pela permissionária. Também será apresentado a ferramenta computacional utilizada para modelagem do sistema de distribuição de energia elétrica, e a descrição dos parâmetros de cada elemento utilizado no OpenDSS. Por fim, é descrito as simulações que serão realizadas para análise.

4.1 DESCRIÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

O sistema de distribuição a ser simulado neste trabalho é baseado em uma rede elétrica real apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Rede de distribuição de Energia Elétrica



Fonte: Elaborado pelo Autor

A rede possui uma extensão de aproximadamente 58km, tem 124 consumidores bifásicos e trifásicos, e a carga total instalada é de 166kW. A topologia da rede é radial, isto é, foi projetada para operar com fluxos de potência unidirecional no sentido da fonte (subestação) à carga (consumidores). A rede primária opera com tensão de linha de 13,8kV, sendo formado

por redes aéreas convencionais. Já as redes secundárias operam com tensão de linha de 220V ou 230V, e são formadas por redes aéreas convencionais e isoladas.

Para simular a rede de distribuição foi retirado o máximo de informações possíveis do banco de dados da empresa. A seguir está a lista dos arquivos retirados do banco de dados.

- **Subestação.xlsx**

Contém a tensão de base, a barra (poste) em que está conectado, o valor da tensão em p.u, e as resistência e reatâncias de curto-circuito de sequência positiva e zero.

- **Consumidores.xlsx**

Contém os dados de cada consumidor. Estes dados são: o tipo de fase (trifásica, bifásica ou monofásica), a barra em que está conectado, o tipo de conexão, tensão de fornecimento, a energia média consumida e o tipo da curva de carga.

- **Curva de Carga.xlsx**

Contém os dados das curvas de carga diária para os consumidores rural, comercial, poder público e industrial. Estes dados são fatores multiplicativos de potência com um intervalo de uma hora.

- **Rede Primária.xlsx**

Contém os dados de cada linha da rede primária. Estes dados são: as barras em que está conectada, o comprimento da linha, o tipo de fase (trifásica, bifásica ou monofásica) e o condutor utilizado.

- **Rede Secundária.xlsx**

Contém os dados de cada linha da rede secundária. Estes dados são: as barras em que está conectada, o comprimento da linha, o tipo de fase (trifásica, bifásica ou monofásica) e o condutor utilizado.

- **Condutor.xlsx**

Contém os dados de cada condutor. Os dados retirados para os condutores multiplexados são: o número de linhas, ampacidade, e resistência e reatância de sequência positiva e zero.

Já para os condutos das redes convencionais, os dados retirados são: resistência do cabo por quilômetro, raio médio geométrico, diâmetro e ampacidade.

- **Estrutura dos Postes.xlsx:**

Contém os dados dos postes (barras) da rede elétrica. Estes dados são: as estruturas dos postes (configuração das linhas) e as localizações dos postes em coordenadas UTM.

- **Transformadores.xlsx**

Contém os dados dos transformadores. Estes dados são: a potência nominal, o número de enrolamentos, o tipo de fase (trifásica, bifásica ou monofásica), a impedância do transformador, a barra em que está instalado, o tipo de conexão e os valores das tensões no primário e secundário.

- **Banco de capacitores.xlsx**

Contém os dados dos capacitores. Estes dados são: potência reativa do capacitor, barra em que está instalado, número de fases e a tensão nominal do local instalado.

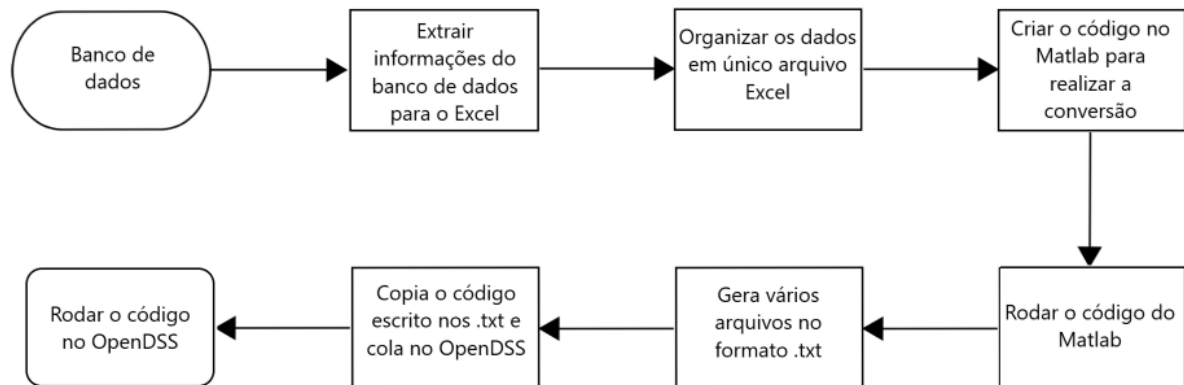
4.2 MODELAGEM DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

A simulação e análise do sistema de distribuição será realizada pelo software The Open Distribution System Simulator (OpenDSS). Esse software utiliza a linguagem script, baseada em linhas de comando, através das quais todos os elementos do sistema de potência são adicionados e parametrizados.

Com as informações dos bancos de dados da permissionária, a modelagem de redes elétricas reais na linguagem do OpenDSS se torna muito complicada devido à imensa quantidade de elementos que existem nela. Como o OpenDSS trabalha com a linguagem script, programar manualmente irá demandar muito tempo. Sendo assim, é necessário utilizar outros softwares para auxiliar na modelagem do sistema de distribuição.

A Figura 5 mostra o fluxograma de processos para elaboração do código que simulará a rede de distribuição no OpenDSS. O documento (LANES e ROSSONI) menciona a utilização do Excel e Matlab para facilitar a modelagem do sistema de distribuição real. O Excel é utilizado para organizar os dados da rede elétrica, e o Matlab converte os dados armazenados no Excel em um arquivo txt com a sintaxe apropriada do OpenDSS. Por fim, o programa escrito no arquivo txt é copiado e colado no programa do OpenDSS.

Figura 5 - Fluxograma da ferramenta computacional



Fonte: Elaborada pelo Autor

4.3 SOFTWARE OPENDSS

O software OpenDSS (Open Distribution System Simulator) é um programa livre, de código aberto, capaz de simular sistemas elétricos de potência. Este programa pode ser customizado conforme as necessidades do programador, sendo possível adicionar novos recursos de forma contínua (ANEEL, 2011).

Em 1997, Roger Dugan e Thomas McDemontt iniciaram o desenvolvimento do Distribution System Simulator (DSS) na Electrotek Concepts, Inc. Naquela época, os principais motivos pelo desenvolvimento do software eram dar suporte às análises de redes elétricas com presenças de GDs, ser uma ferramenta flexível com capacidade de realizar análises que outras ferramentas não conseguiam fazer e ter um desenvolvimento contínuo para solucionar novos problemas relacionados aos sistemas elétricos (DUGAN e MONTENEGRO, 2020).

Em 2004, a DSS foi comprada pelo EPRI Solutions que se uniu a EPRI em 2007. Em 2008, o EPRI lançou o software OpenDSS sob licença de código aberto, a fim de promover o desenvolvimento da área de smart grid (DUGAN e MONTENEGRO, 2020).

4.3.1 DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS

Nesta seção serão apresentadas as definições dos elementos da rede elétrica, com base nos dados da rede elétrica real.

4.3.1.1 BARRAMENTO DO ALIMENTADOR

Todo sistema de distribuição representado no OpenDSS deve ser inicializado com o comando *New Circuit*. Essa função define o alimentador responsável pelo fornecimento de potência na rede elétrica. Os dados utilizados são do arquivo “Subestação.xlsx” e os parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros do Alimentador (Subestação)

Parâmetro	Descrição
Basekv	Tensão de linha nominal em kV
Bus1	Barra (Poste) em que está ligado a Subestação
Pu	Tensão de base do alimentador
Phases	Número de fases
R1	Resistência de sequência positiva (Ohms)
X1	Reatância de sequência positiva (Ohms)
R0	Resistência de sequência zero (Ohms)
X0	Reatância de sequência zero (Ohms)

Fonte: Elaborado pelo Autor com base (DUGAN e MONTENEGRO, 2020)

Sintaxe do elemento:

```
New circuit.Subestacao
~ basekv=13.8 Bus1=6955A pu=1 Phases=3 R1=0.7002 X1=1.042 R0=2.973 X0=4.1186
```

4.3.1.2 PARÂMETROS DAS LINHAS: LINECODE

A função *Linecode* define as características de impedância para linhas e cabos utilizados no circuito. Pode-se armazenar as impedâncias em um único objeto *Linecode*, e quando a linha for especificada, o comando busca as informações da linha contida na biblioteca do *Linecode*. Os dados utilizados são dos arquivos “Rede Primaria.xlsx”, “Rede Secundaria.xlsx” e “Condutor.xlsx”, que contêm os dados dos condutores. Os parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros da linha definido pelo *Linecode*

Parâmetro	Descrição
nphases	Quantidade de fases
BaseFreq	Frequência base em que os valores de impedâncias são especificados
Units	Unidade de comprimento
Normamps	Corrente nominal da linha
R1	Resistência de sequência positiva por unidade de comprimento
X1	Reatância de sequência positiva por unidade de comprimento
R0	Resistência de sequência zero por unidade de comprimento
X0	Reatância de sequência zero por unidade de comprimento

Fonte: Elaborado pelo Autor com base (DUGAN e MONTENEGRO, 2020)

Sintaxe do elemento:

*New Linecode.Conductor7 nphases=4 BaseFreq=60 Units=km Normamps=125
~ R1=1.6 X1=0.4 R0=1.79 X0=2.2*

4.3.1.3 PARÂMETROS DAS LINHAS: WIREDATA E LINEGEOMETRY

A função *Wiredata* define as características dos condutores que são usados para calcular a matriz de impedância para uma geometria de linha. Já a função *Linegeometry* define o tipo de condutor, declarado em *Wiredata*, e as posições dos mesmo em um tipo de construção de linha. Os dados utilizados são dos arquivos “Rede Primaria.xlsx”, “Rede Secundaria.xlsx”, “Poste.xlsx” e “Condutor.xlsx”, que contêm as estruturas dos postes e os dados dos condutores. Os parâmetros usados na definição das características dos cabos estão na Tabela 6.

Tabela 6 – Definição das características dos condutores pelo *Wiredata*

Parâmetro	Descrição
Runits	Unidade de comprimento da resistência (Ohms/unidade)

Rac	Resistência a 60Hz por unidade de comprimento
GMRunits	Unidade do raio médio geométrico (RMG)
GMRac	RMG a 60Hz
Radunits	Unidade do raio externo
Diam	Diâmetro do cabo
Normamps	Corrente nominal do cabo

Fonte: Elaborado pelo Autor com base (DUGAN e MONTENEGRO, 2020)

Sintaxe do elemento:

*New wiredata.Conductor3 Runits=km Rac=1.044 GMRunits=m GMRac=0.00269
~ Radunits=m Diam=0.0074 Normamps=190*

Os parâmetros utilizados para definição da geometria das linhas estão apresentados na Tabela 7.

*Tabela 7 – Definição das características dos condutores pelo *Wiredata**

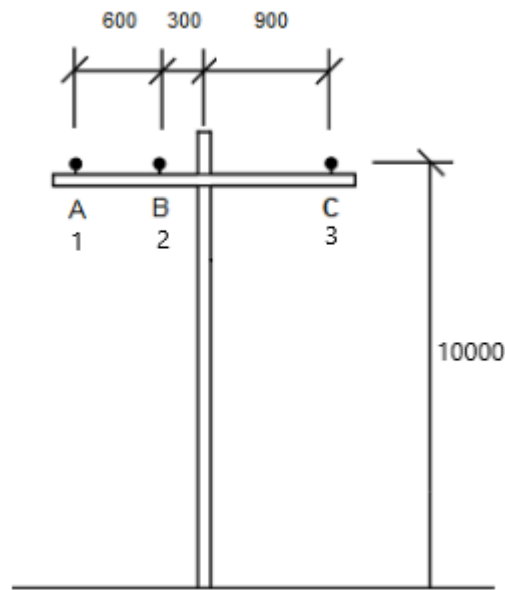
Parâmetro	Descrição
Nconds	Quantidade de condutores
Nphases	Número de fases
Cond	Aponta qual o número do condutor que deseja definir
Wire	Tipo do condutor definido pelo <i>Wiredata</i>
Units	Unidade de x e h
X	Coordenada do condutor em relação a um ponto de referência.
H	Altura em que se localiza o condutor

Fonte: Elaborado pelo Autor com base (DUGAN e MONTENEGRO, 2020)

Sintaxe do elemento:

```
New linegeometry.7208A-ABC nconds=3 nphases=3
~ cond=1.000000 wire=Condutor2 units=m x=-0.9 h=10
~ cond=2.000000 wire=Condutor2 units=m x=0.3 h=10
~ cond=3.000000 wire=Condutor2 units=m x=0.9 h=10
```

Figura 6 - Exemplo das coordenadas dos condutores declaradas na sintaxe



Fonte: Adaptado de (LIMA, 2021)

4.3.1.4 DEFINIÇÃO DAS LINHAS

A função *Line* é responsável pela modelagem das linhas. Para definir este elemento, são necessários os valores das impedâncias que podem ser declarados por componentes simétricos ou por matriz. Alternativamente, pode-se simplesmente referir-se a um objeto “LineCode” o qual os valores de impedância já estão definidos. Além disso, pode-se também especificar um objeto “Geometria” existente e as impedâncias da linha serão calculadas automaticamente.

Os dados utilizados são dos arquivos “Rede Primaria.xlsx” e “Rede Secundaria.xlsx” e os parâmetros utilizados para definição estão na Tabela 8.

Tabela 8 – Definição das linhas

Parâmetro	Descrição
Linecode ou Geometry	Parâmetros da linha armazenada declarada em “linecode” ou “linegeometry”
Length	Comprimento da linha
Units	Unidade de comprimento
Bus1	Nome do barramento do terminal 1
Bus2	Nome do barramento do terminal 2

Fonte: Elaborado pelo Autor com base (DUGAN e MONTENEGRO, 2020)

Sintaxe do elemento com “Geometry”:

New line.6814B-6815B Geometry=6814B-ABN Length=42.35 Units=m Bus1=6815B.1.2.0 Bus2=6814B.1.2.0

Sintaxe do elemento com “Linecode”:

New line.8944B-7050B linecode=Condutor7 Length=34.18 Units=m Bus1=7050B.1.2.3.0 Bus2=8944B.1.2.3.0

4.3.1.5 TRANSFORMADORES

A função *transformer* é responsável pela modelagem dos transformadores. Os dados utilizados são do arquivo “Transformadores.xlsx” e os parâmetros utilizados para definição estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros do Transformador

Parâmetro	Descrição
Phases	Número de fases
Windings	Número de enrolamentos
XHL	Reatância do primário em relação ao secundário (%)

XHT	Reatância do primário em relação ao terciário (%)
XLT	Reatância do secundário em relação ao terciário (%)
%R	Resistência do enrolamento (%)
Wdg	Número do enrolamento que receberá os parâmetros
Bus	Barra em que “wdg” está conectada
Conn	Tipo de conexão do transformador (estrela ou delta)
kVA	Potência nominal do transformador
kV	Tensão nominal do enrolamento

Fonte: Elaborado pelo Autor com base (DUGAN e MONTENEGRO, 2020)

Sintaxe do elemento:

*New transformer.1109T109 phases=3 Windings=2 XHL=2.97 %R=1.85
 ~ wdg=1 bus=9444A.1.2.3 conn=delta kVA=15 kV=13.8
 ~ wdg=2 bus=9444B.1.2.3.0 conn=weye kVA=15 kV=0.22*

4.3.1.6 CURVA DE CARGA

A função *LoadShape* é responsável pela definição das curvas de carga que consiste em uma série de multiplicadores, que normalmente variam de 0 a 1. Esses fatores podem ser aplicados nas potências dos geradores e das cargas, permitindo a simulação diária, anual ou de outros tipos de ciclo.

Os dados utilizados são do arquivo Curva de Carga.xlsx e os parâmetros utilizados para definição estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros da curva de carga

Parâmetro	Descrição
Npts	Número de pontos da curva
Interval	Intervalo de tempo dos dados

Mult	Vetor com os fatores de multiplicação
------	---------------------------------------

Fonte: Elaborado pelo Autor com base (DUGAN e MONTENEGRO, 2020)

Sintaxe do elemento:

```
New LoadShape.Rural npts=24 interval=1
~ mult = ( 0.43037 0.38682 0.3885 0.36594 0.37616 0.37928 0.39572 0.4602 0.45257
0.55526 0.56898 0.5825 0.55798 0.60229 0.46197 0.41935 0.56641 0.78686 1 0.96552
0.63586 0.57464 0.47322 0.43546)
```

4.3.1.7 CARGAS (CONSUMIDORES)

A função *load* é responsável pela definição das cargas (consumidores). Para caracterizar a carga no OpenDSS, é necessário definir o valor de um dos seguintes pares:

- Potência ativa nominal e fator de potência
- Potência ativa nominal e potência reativa nominal
- Potência aparente nominal e fator de potência

Atualmente, o OpenDSS disponibiliza 8 modelos de carga para simulação, permitindo o usuário modelar de acordo com as necessidades. A Tabela 11 mostra de forma resumida os 8 modelos.

Tabela 11 – Modelos de cargas

Parâmetro	Descrição
Modelo 1	Potência ativa e reativa constantes
Modelo 2	Impedância constantes
Modelo 3	Potência ativa constante e potência reativa quadrática
Modelo 4	Potência ativa e reativa variando exponencialmente
Modelo 5	Corrente constante
Modelo 6	Potência ativa constante e potência reativa fixa

Modelo 7	Potência ativa constante, potência reativa quadrática e impedância fixa
Modelo 8	Modelo ZIP contendo os expoentes de potência ativa e reativa para os três modelos de carga (impedância constante, corrente constante e potência constante)

OBS: “Constantes” podem ser modificadas pela curva de carga (loadshape)

Fonte: Elaborado pelo Autor com base (DUGAN e MONTENEGRO, 2020)

O modelo utilizado para simular as cargas conectadas ao SDMT e ao SDBT é denominado ZIP, composto por 100% de impedância constante para parcela reativa e de 50% potência constante e 50% impedância constante para a parcela ativa da carga (ANEEL, 2011).

Os dados utilizados são do arquivo “Consumidores.xlsx”, e os parâmetros utilizados para definição estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros das cargas (consumidores)

Parâmetro	Descrição
Phases	Número de fases
bus1	Barra em que está conectada
Conn	Tipo de conexão
kV	Tensão de base
kW	Potência nominal ativa
Pf	Fator de potência
Model	Modelo de carga
ZIPV	Coeficiente do ZIP
Daily	Nome da curva de carga diária

Fonte: Elaborado pelo Autor com base (DUGAN e MONTENEGRO, 2020)

Sintaxe do elemento:

New Load.C14341 phases=2 bus1=7204B.1.2.0 conn=Delta kV=0.23 kW=0.70278 pf=0.92 model=8 ZIPV=[0.5 0 0.5 1 0 0] daily=Rural

Como pode-se observar na Tabela 12, a função *load* necessita do valor da potência nominal ativa para definição da carga. Entretanto, o arquivo “Consumidores.xlsx” fornece apenas o consumo médio de energia mensal de cada consumidor. Logo, a equação 2 foi utilizado para converter o consumo médio de energia mensal para potência ativa nominal.

$$P = \frac{E_m}{24 * 30} \quad (2)$$

- P: potência ativa nominal
- Em: consumo médio de energia mensal

4.3.1.8 CAPACITOR

A função *capacitor* é responsável pela modelagem dos capacitores. Os dados utilizados são do arquivo “Banco de Capacitores.xlsx” e os parâmetros utilizados para definição estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Parâmetros do Capacitor

Parâmetro	Descrição
bus1	Barra em que está conectada
Phases	Número de fases
Kvar	Potência reativa do capacitor
Kv	Tensão nominal do capacitor

Fonte: Elaborado pelo Autor com base (DUGAN e MONTENEGRO, 2020)

Sintaxe do elemento:

New capacitor.Capacitor-7206A bus1=7206A phases=3 kvar=75 kv=13.8

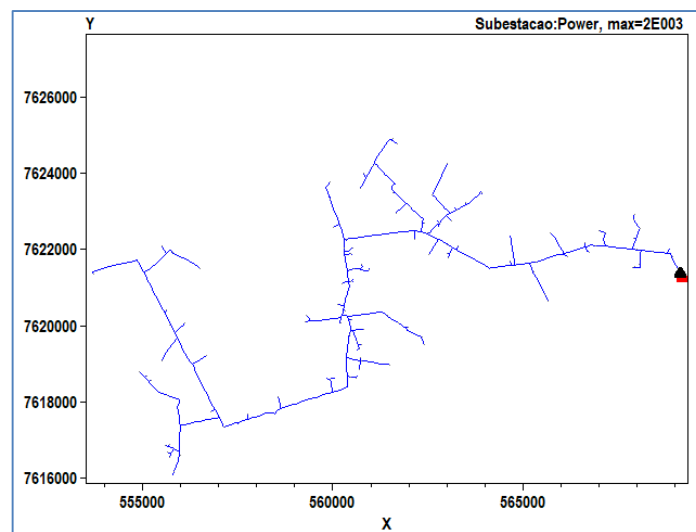
O sistema de distribuição a ser simulado apresenta apenas 1 banco de capacitores. Os dados desse elemento estão apresentados na Tabela 14 e a localização na rede pode ser observada na Figura 7.

Tabela 14 – Dados do banco de capacitores

Nome	Capacitor-7206A
Barra	7206A
Fases	3
Potência (kVar)	25
Tensão (kV)	13,8

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 7 – Localização do capacitor na rede (ponto preto)



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.3.1.9 GERADORES

A função *generator* é responsável pela modelagem dos geradores. Essa função será utilizada para simular a geração distribuída na rede elétrica. A tabela 15 apresenta os parâmetros utilizados para definição.

Tabela 15 – Parâmetros do Gerador

Parâmetro	Descrição
bus1	Barra em que está conectada
kW	Potência ativa gerada
kV	Tensão de base
pf	Fator de potência
conn	Resistência do enrolamento (%)
phases	Tipo de conexão
model	Modelo
Daily	Curva de carga para o gerador

Fonte: Elaborado pelo Autor com base (DUGAN e MONTENEGRO, 2020)

Sintaxe do elemento:

```
New Generator.C13901GG bus1=6966B kW=0.39444 kV=0.22 pf=1.00 conn=Wye
phases=3 model=1 Daily=Shape_01
```

Na simulação, será utilizado o modelo 1, isto é, potência ativa e reativa constante para os geradores. Além disso, os geradores terão fator de potência igual a 1, ou seja, gera apenas potência ativa.

4.3.2 FUNÇÕES PARA ANÁLISE

O OpenDSS apresenta diversos modos de solução para atender às necessidades do programador, sendo eles: fluxo de potência instantâneo (Snapshot Power Flow), fluxo de potência diário (Daily Power Flow) fluxo de potência anual (Yearly Power Flow), harmônicos (Harmonics), dinâmico (Dynamic), estudo de faltas (Faultstudy) e Monte Carlo Faultstudy (ANEEL, 2011).

No OpenDSS existem dois elementos de medição: *Energymeter* e *Monitor*. O *EnergyMeter* é um medidor inteligente conectado a um terminal de um elemento do circuito. Este elemento simula o comportamento de um medidor de energia real e tem capacidade de acessar valores em outros locais do circuito, longe do local em que está instalado. Além de medir os valores de potência e energia em sua localização, também fornece as perdas e os valores de sobrecarga em uma outra região do circuito (DUGAN e MONTENEGRO, 2020).

O *Monitor*, assim como o *Energymeter*, é conectado a um terminal de outro elemento do circuito e funciona como um monitor de energia real. Quando instruído, ele tira uma amostra registrando o tempo e os valores de tensão e corrente, ou potência ativa e reativa, de todas as fases. Outras amostras também podem ser salvas dependendo da configuração do *Monitor*. Os dados do arquivo podem ser convertidos para o formato CSV utilizando os comandos *Show monitor* ou *Export monitor* (DUGAN e MONTENEGRO, 2020).

Após inserir todos os elementos da rede elétrica no OpenDSS, e ter escolhido o modo de solução, definem-se os principais comandos de saída utilizados para análise.

- *Show voltage LN*: mostra as componentes simétricas de tensão de fase-neutro
- *Show Power kVA elem*: mostra as potências ativas e reativas de cada elemento
- *Show Losses*: mostra as perdas de cada elemento
- *Plot pprofile*: plota a variação da tensão em função da distância do alimentador
- *Plot circuit*: plota o circuito simulado, mostrando o fluxo de potência, tensão, corrente ou perdas. Para plotar o circuito, é preciso das coordenadas das barras (postes) e aplicar a função *BusCoords*.
- *Plot monitor*: mostra os valores definidos na configuração do monitor em função do tempo.
- *Export overloads*: exporta os elementos que estão com sobrecarga
- *Export meter*: exporta os dados lidos pelo medidor inteligente

4.4 SIMULAÇÃO

A fim de analisar o impacto da geração distribuída em um sistema de distribuição de energia elétrica, diversas simulações serão realizadas para três casos. Para cada situação, o fluxo de potência, tensão e perdas do sistema serão analisadas através das funções apresentadas anteriormente. As simulações os quais serão realizadas são:

- **Uma GD trifásica conectada na rede primária – modo snapshot**

Uma GD trifásica será instalada no meio da rede de distribuição. Várias simulações serão realizadas variando a potência ativa gerada pela GD. O objetivo dessa simulação é analisar o comportamento da rede em função da potência gerada pela GD.

- **GDs instaladas próximas às cargas – modo snapshot**

A fim de verificar o impacto do crescimento da geração distribuída instalada próximo aos consumidores, várias simulações serão realizadas variando a quantidade das GDs. As simulações serão realizadas com: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 115 e 124 GDs instaladas.

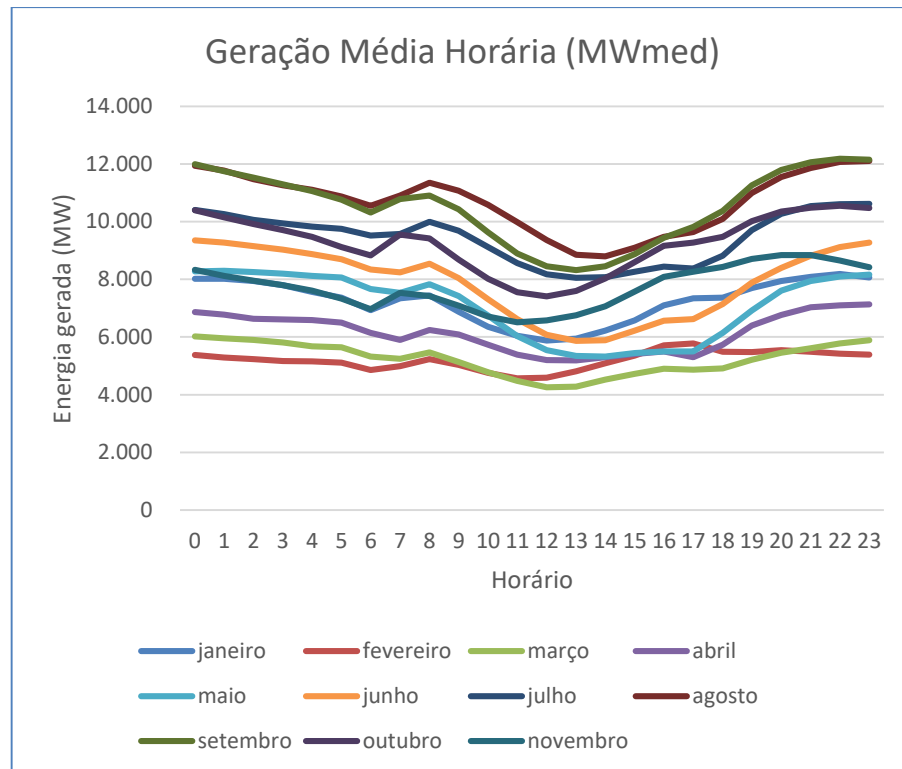
Por ser uma rede na área rural, a rede de distribuição possui somente consumidores trifásicos e bifásicos. Sendo assim, somente geradores distribuídos trifásicos e bifásicos serão utilizados na simulação, e a potência gerada pelas GDs é igual à potência nominal ativa da carga que estão suprindo.

- **GDs instaladas próximas às cargas – modo diário**

Neste último caso, será adicionado a curva de carga diária retirada do banco de dados da empresa. Para as GDs, três curvas de carga serão criadas pelo próprio autor, pois não foi possível obter a curva dos consumidores com mini e microgeração. A primeira curva é a “Shape_01”, baseada na geração distribuída solar. A segunda curva é a “Shape_02” que tem seus valores constantes.

A última curva é a “Shape_03” baseada na energia eólica. Os dados para criar essa curva foram obtidos no site da ONS (Operado Nacional do Sistema Elétrico). A curva diária “Shape_03” será a média das curvas de geração média horária da Figura 8 dividido pelo maior valor médio das curvas.

Figura 8 – Geração eólica média horária de cada mês de 2021 - Brasil



Fonte: (ONS, 2021)

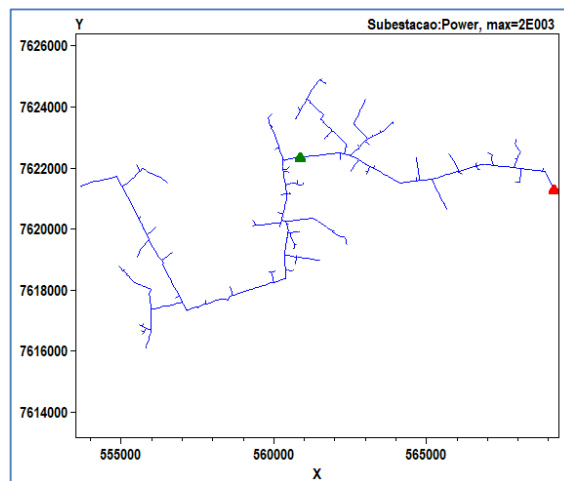
5 ANALISE E RESULTADO DA SIMULAÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas as análises e resultados das simulações realizadas, em conformidade com a metodologia de simulação apresentada no capítulo anterior.

5.1 UMA GD TRIFÁSICA CONECTADA NA REDE PRIMÁRIA

A fim de verificar o impacto de uma geração distribuída trifásica, foi instalada uma GD no meio da rede de distribuição. Na Figura 9, o ponto verde é o local em que foi instalada a GD e o ponto vermelho é a subestação da rede.

Figura 9 - Rede de distribuição com a GD (ponto verde)



Fonte: Elaborado pelo Autor

Os dados da GD estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Dados da GD

Gerador	G1
Barra	7244 ^a
Fases	3
Potência (kW)	Varia (Tabela 17)
Tensão (kV)	13,8
Fator de potência	1
Conexão	Estrela
Modelo	1 (P e Q constante)

Fonte: Elaborado pelo Autor

A Tabela 17 apresenta as potências da GD utilizada para simulação e o seu respectivo valor de carregamento total do sistema.

Tabela 17 – Carregamento total do sistema

Gerador (kW)	0	15	30	50	80	100	115	130	140	150	172
Carregamento total do sistema (kW)	126.8	127	127.2	127.5	127.9	128.1	128.3	128.5	128.7	128.8	129.1

Fonte: Elaborado pelo Autor

5.1.1 ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA

A Figura 10 mostra o fluxo de potência na rede elétrica em função da potência ativa gerada pela GD conectada na Barra 7224A (ponto verde). Na Figura 10.(a), todo o sistema de distribuição é alimentado pela subestação. Observa-se que o fluxo de potência diminui (a linha fica mais delgada) à medida que se distancia da subestação. Ao instalar a GD, nota-se que o fluxo de potência à montante ao ponto de conexão diminui conforme a GD aumenta sua produção.

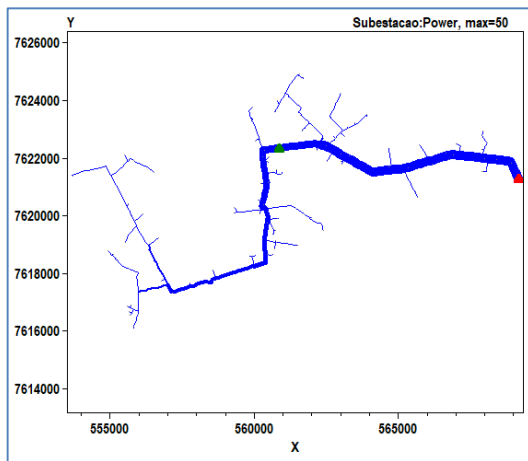
Quando a GD gera mais de 80kW, ela tem potência suficiente para suprir as cargas à jusante do ponto de conexão. Nesta situação, observa-se o surgimento do fluxo de potência reverso causado pelo excesso de geração de energia da GD.

Na Figura 10.(e) já se observa um fluxo de potência reverso, em grande escala, alcançando a subestação de energia. Praticamente, toda a rede elétrica está sendo suprida pela GD. Entretanto, o fluxo de potência que alimenta as cargas localizadas à montante do ponto de conexão, é reverso.

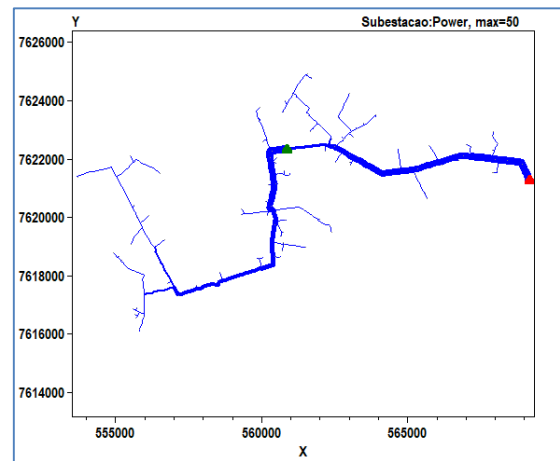
Enquanto o fluxo de potência varia nas linhas à montante da conexão, o valor do fluxo de potência das linhas à jusante da conexão continuou constante, pois as demandas de potência das cargas à jusante da GD continuaram a ser as mesmas.

A Figura 10.(f) mostra a GD gerando 172 kW, condição em que se observa sobretensão no sistema. A maneira de como foi determinado o ponto de sobretensão será descrita na seção 5.1.3.

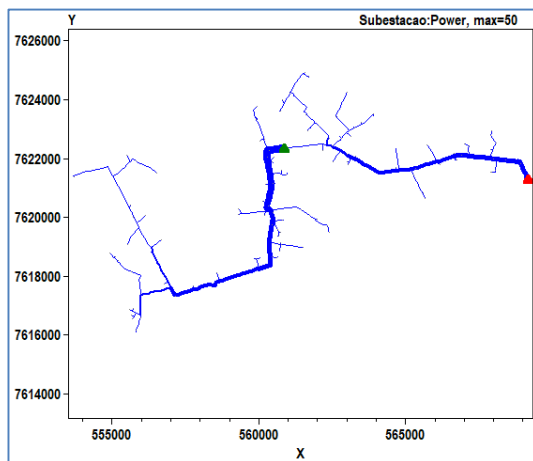
Figura 10 – Fluxo de potência da rede distribuição com GD



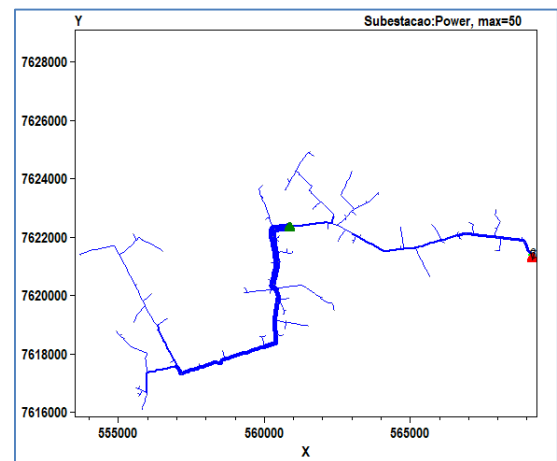
(a) Sem GD



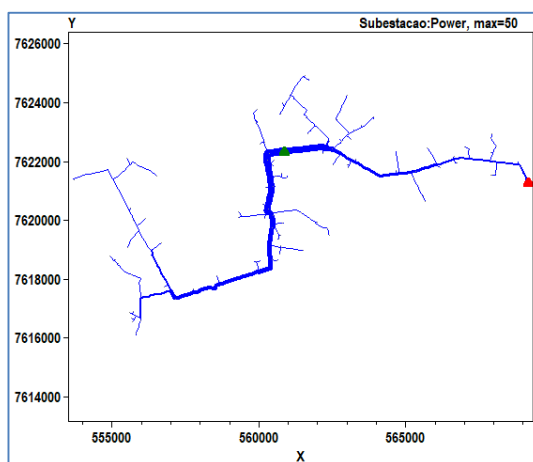
(b) GD de 50 kW



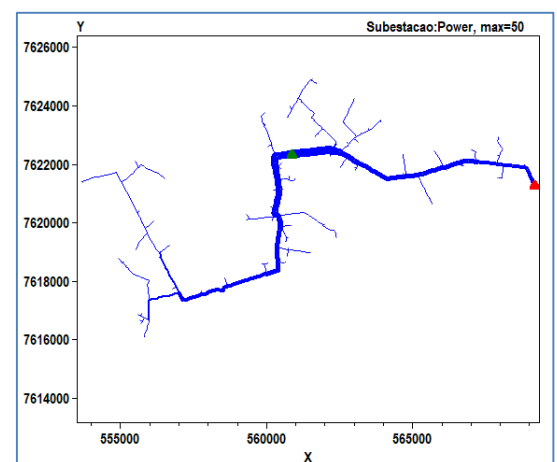
(c) GD de 80kW



(d) GD de 100kW



(e) GD de 150kW

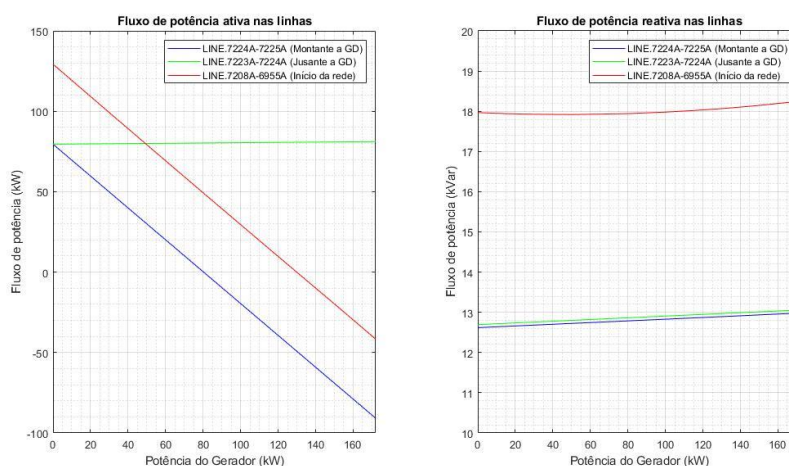


(f) GD de 172kW (sobretensão)

Fonte: Elaborada pelo Autor

A Figura 11, mostra o fluxo de potência ativa e reativa de três linhas da rede em função da potência ativa gerada pela GD. Ao analisar o gráfico azul, pode-se notar que o fluxo de potência reverso surgiu aproximadamente a partir dos 80 kW de potência gerada, momento em que o fluxo de potência na linha montante a GD fica negativo.

Figura 11 – Gráfico do fluxo de potência da rede de distribuição



Fonte: Elaborada pelo Autor

Além disso, ao analisar o gráfico vermelho, nota-se que o fluxo de potência reverso chega na subestação aos 130 kW de potência gerada. A partir dos 130 kW, a rede toda será alimentada pela GD e o excesso de energia será injetado na subestação. Já o gráfico verde mostra o fluxo de potência da linha jusante a GD, que é constante para todas as potências geradas pela GD.

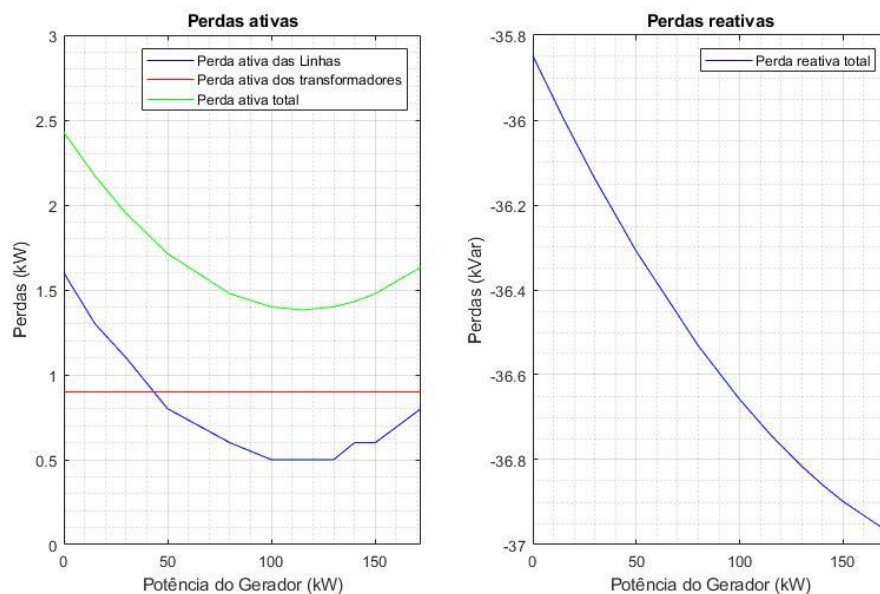
A GD instalada tem fator de potência unitário. Ou seja, a GD fornece somente potência ativa na rede. Na Figura 11, observa-se que o fluxo de potência reativa fornecida pela subestação (linha vermelha) aumenta levemente conforme a GD gera mais potência ativa.

Pela Figura 11, nota-se que a injeção de potência ativa reduz o fator de potência das instalações que estão à montante do ponto de instalação. Apesar de não haver alguma alteração no consumo de energia reativa, a GD causa a redução do fator de potência, pois diminui o fluxo de potência ativa da rede montante. Portanto, a GD não deve gerar enormes quantidade de energia, pois antes de acontecer a reversão do fluxo de potência, alguns pontos da rede terão o fator de potência abaixo de 0,92.

5.1.2 ANÁLISE DAS PERDAS

A Figura 12, mostra as perdas ativas e reativas da rede elétrica em função da potência ativa gerada pela GD. Inicialmente, a perda ativa total foi diminuindo até os 115 kW de potência gerada. Esse ponto é o momento em que circula menos fluxo de potência pela rede, e consequentemente as perdas por efeito Joule nas linhas são mínimas. Quando a GD gera 115kW, a GD está suprindo totalmente a rede jusante e parcialmente a rede montante. Como a intensidade da corrente é um dos fatores que influenciam nas perdas, a rede montante terá menor perda quando as cargas forem atendidas pela fonte (GD ou Subestação) mais próxima.

Figura 12 – Perdas das potências ativas e reativas em função da potência ativa gerada pela GD



Fonte: Elaborada pelo Autor

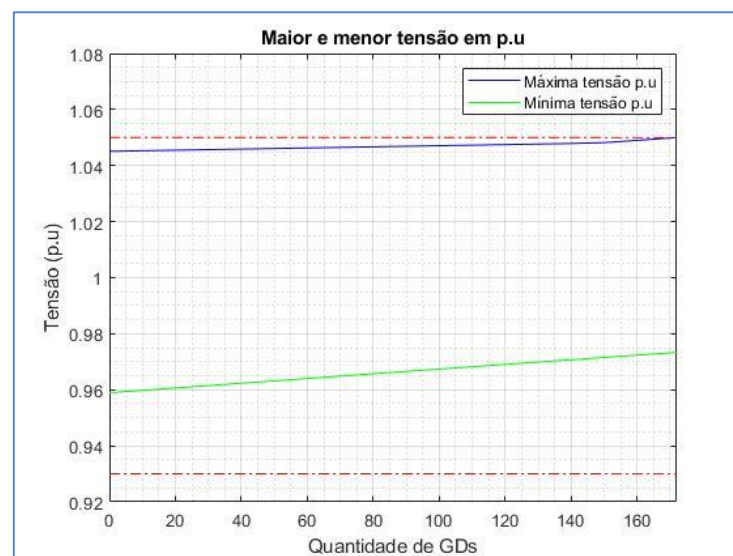
Após os 115kW de potência gerada, as perdas ativas começam a aumentar, pois, a GD começa a injetar mais energia nas redes montantese a conexão da GD. Já as perdas dos transformadores continuaram constantes, porque não teve alterações nas demandas de potência nas cargas.

As cargas capacitivas injetam potência reativa nas redes como perda de potência reativa negativa. Diferente da perda ativa, a perda reativa é negativa e continua a diminuir a medida que a GD gera mais potência ativa.

5.1.3 ANÁLISE DAS TENSÕES

O gráfico da Figura 13 mostra os valores máximos e mínimos da tensão em p.u da rede elétrica, em função da potência gerada pela GD. Pelo gráfico, é possível verificar o aumento do nível de tensão na rede elétrica em função da potência gerada pela GD. A partir da análise de tensões da rede elétrica, foi determinado que o limite de geração de energia da GD, para não causar problemas de sobretensão, é de 172kW. A verificação das tensões máximas e mínimas foi realizada pelo *Circuit Summary* do OpenDSS mostrado na Figura 14.

Figura 13 – Máxima e mínima tensão em p.u da rede elétrica



Fonte: Elaborado pelo Autor

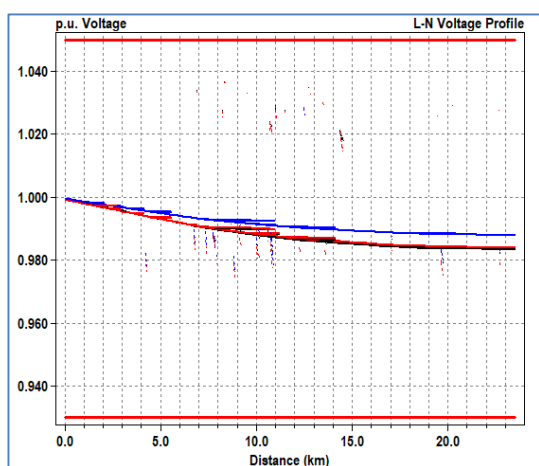
Figura 14 – Circuit Summary para GD gerando 172 kW

```
- Circuit Summary -
Year = 0
Hour = 0
Max pu. voltage = 1.05
Min pu. voltage = 0.97337
Total Active Power: -
0.0413545 MW
Total Reactive Power:
0.0182522 Mvar
Total Active Losses:
0.00163357 MW, (-3.95 %)
Total Reactive Losses: -
0.0369707 Mvar
Frequency = 60 Hz
Mode = Snap
Control Mode = STATIC
Load Model = PowerFlow
-----
```

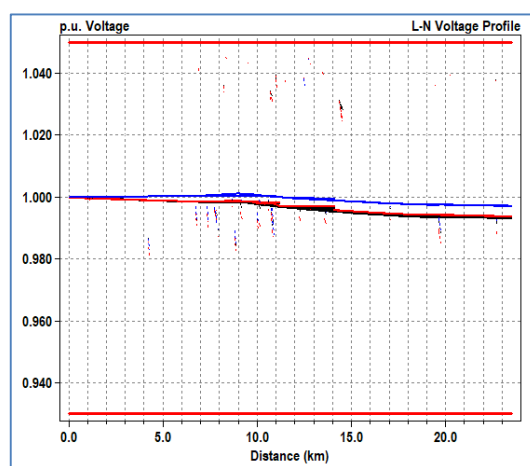
Fonte: Elaborada pelo Autor

Os gráficos da Figura 15 mostra todos os valores de tensão em p.u da rede elétrica em função da distância até a subestação. Pelos gráficos, é possível observar com mais clareza a elevação dos níveis de tensão em relação à potência gerada pela GD. A partir dos gráficos, nota-se que a GD está localizada a 9 km da subestação e o problema de sobretensão ocorre bem antes da sobrecarga.

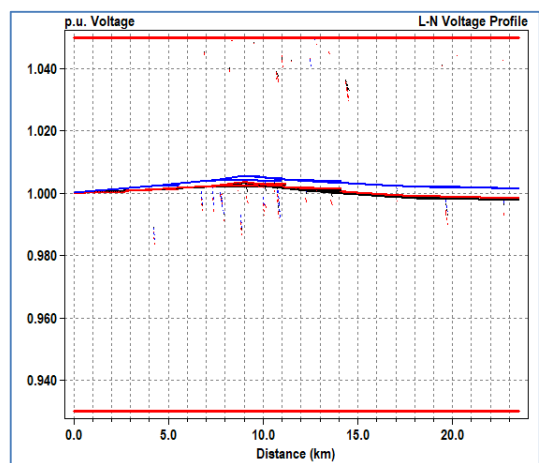
Figura 15 – Tensão da linha em função da distância da Subestação



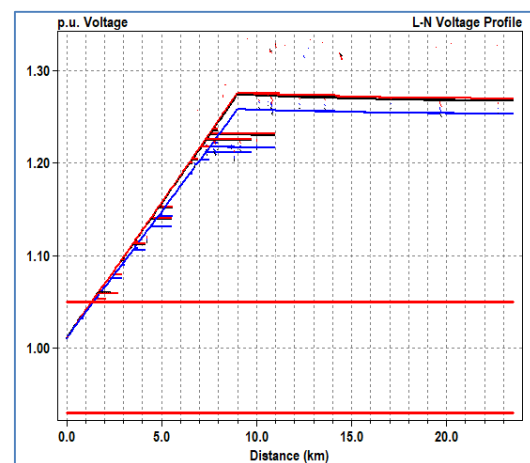
(a) Sem GD



(b) GD de 115kW



(c) GD de 172kW (sobretensão)



(d) GD de 3267W (sobrecarga)

OBS: Tensão fase A – preto; Tensão fase B – vermelho; Tensão fase C – azul

Fonte: Elaborado pelo Autor

Utilizando a função *Export Overloads*, foi determinado que a potência de geração da GD para não causar problemas de sobrecarga é de 3267kW. Entretanto, como pode ser observado na Figura 15.(d), as tensões ficam em situações críticas e o fluxo de potência reverso é extremamente enorme. Logo, o valor máximo para a GD não atingir os limites de sobretensão e sobrecarga é de 172 kW.

Por fim, utilizando a função *Show Voltages*, foi verificado que a rede de distribuição não tem problemas de desequilíbrio de tensão. A Tabela 18 mostra o maior fator de desequilíbrio para cada simulação. Pela tabela, nota-se que o valor de FD diminui conforme aumenta a potência da GD.

Tabela 18 – Maior fator de desequilíbrio de tensão

Gerador (kW)	0	15	30	50	80	100	115	130	140	150	172
Max FD (%)	0.428	0.424	0.421	0.416	0.409	0.404	0.402	0.398	0.395	0.393	0.388

Fonte: Elaborada pelo Autor

5.2 GDs INSTALADAS PRÓXIMA ÀS CARGAS

A fim de verificar o impacto do crescimento da geração distribuída instalada próximas aos consumidores, várias simulações foram realizadas variando a quantidade das GDs. As simulações realizadas são com 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 115 e 124 GDs instaladas, e a potência gerada pelas GDs é igual à potência nominal ativa da carga que estão suprindo.

Os dados da GD estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Dados das GDs

Gerador	Dados
Fases	Quantidade de fase do consumidor
Potência (kW)	Potência nominal ativa do consumidor
Tensão (V)	Tensão do consumidor
Fator de potência	1
Conexão	Conexão do consumidor
Modelo	1 (P e Q constante)

Fonte: Elaborado pelo Autor

A Tabela 20 apresenta as quantidades de GDs utilizadas para simulação e o seu respectivo valor de carregamento total do sistema.

Tabela 20 – Carregamento total do sistema

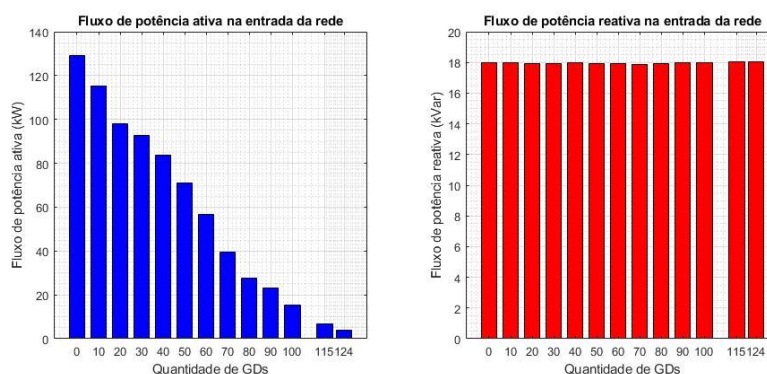
Quantidade de consumidores com GDs	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	115	124
Carregamento do Sistema (kW)	126.8	127.3	127.7	127.8	128	128.4	128.7	129.2	129.5	129.6	129.7	130	130.1

Fonte: Elaborado pelo Autor

5.2.1 ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA

A Figura 16, mostra o fluxo de potência ativa e reativa na entrada da rede de distribuição (saída da subestação) em função da quantidade das GDs. Enquanto o fluxo de potência ativa diminui, o fluxo de potência reativa continuou constante à medida que aumenta o número de GDs.

Figura 16 – Gráfico do fluxo de potência da rede de distribuição

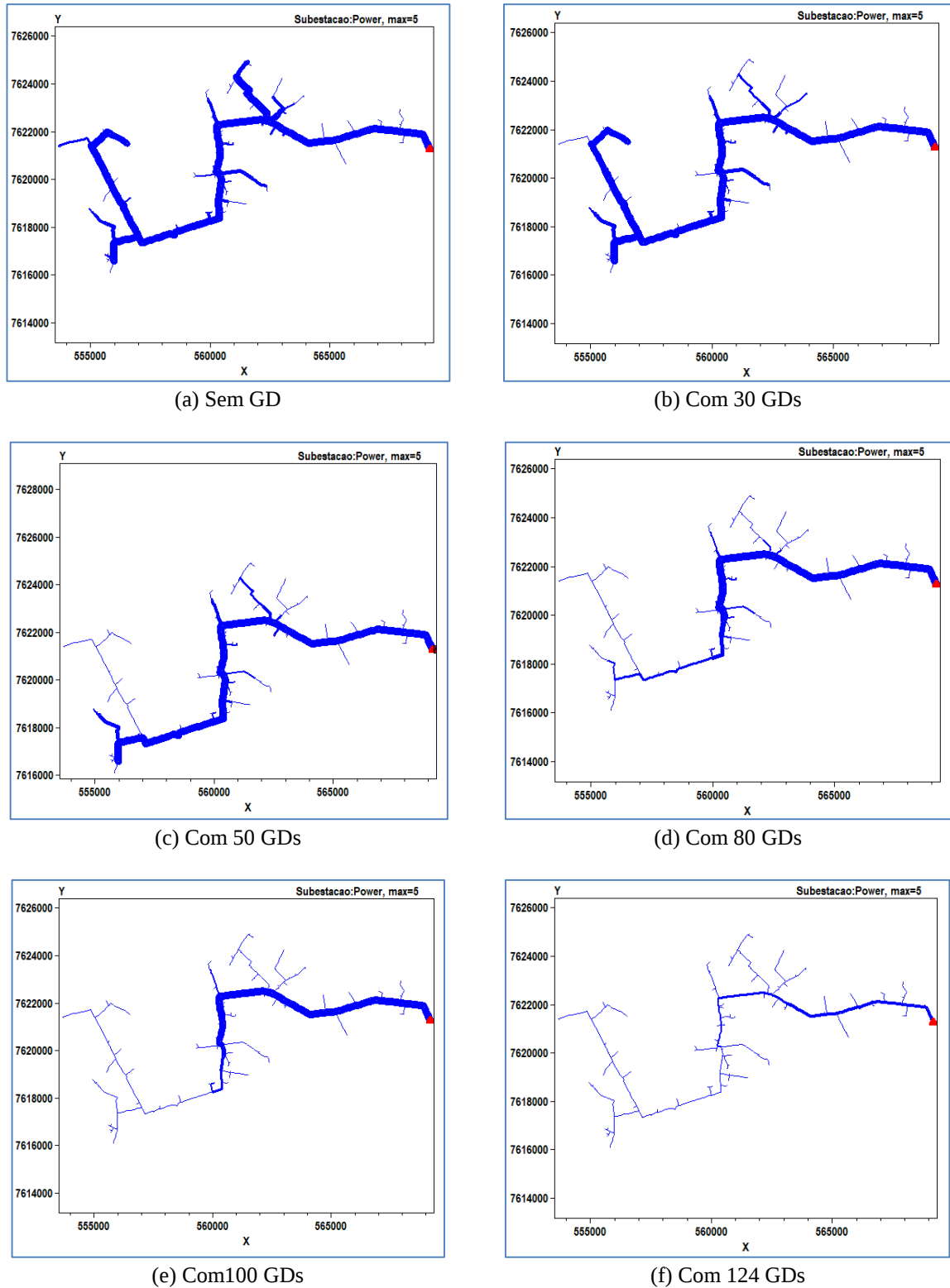


Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 17 mostra o fluxo de potência na rede elétrica em função da quantidade de GDs instaladas próximas às cargas. Ao plotar a rede, definiu-se $Power\ max=5$ na configuração do plot para melhorar a visualização dos fluxos de potência. A partir da Figura 17, é possível observar a redução do fluxo de potência na rede elétrica conforme aumenta o número de GDs instaladas próximas às cargas. À medida que são instalados GDs, o tronco e os ramais ficam delgados indicando que há pouco fluxo de potência na rede.

Portanto, as GDs injetam potência ativa e causam redução do fator de potência na rede, apesar de não haver alteração no consumo de energia pela carga.

Figura 17 – Fluxo de potência da rede distribuição com GDs

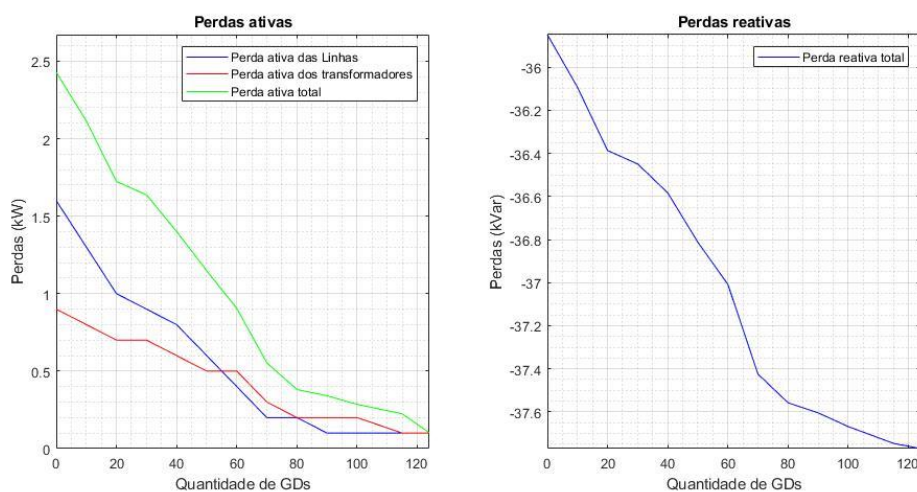


Fonte: Elaborado pelo Autor

5.2.2 ANÁLISE DAS PERDAS

A Figura 18, mostra as perdas ativas e reativas da rede elétrica em função da quantidade de GD conectadas na rede. A medida que aumenta o número de GDs na rede, menos corrente elétrica estará percorrendo o sistema de distribuição, reduzindo as perdas técnicas. Já a perda reativa é negativa e continua aumentando (ficando mais negativo) conforme aumenta o número de GDs instaladas.

Figura 18 – Perdas das potências ativas e reativas da rede elétrica com GDs



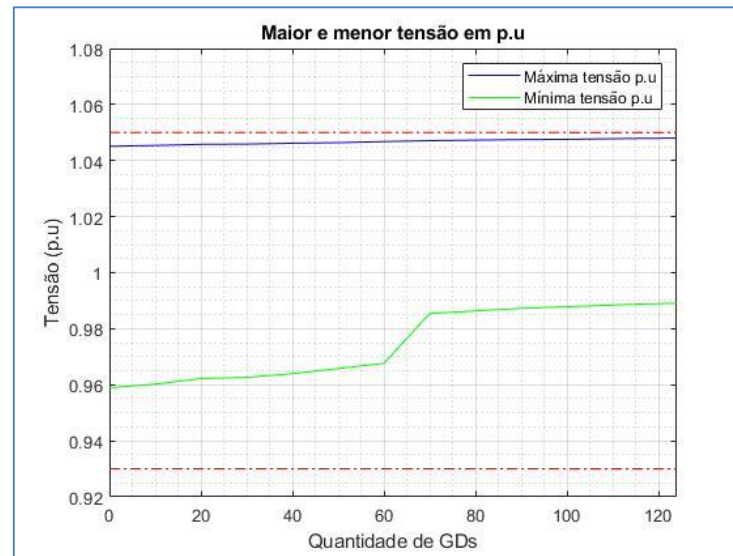
Fonte: Elaborado pelo Autor

Como as GDs geram apenas a energia necessária para suprir a carga, não há surgimento de fluxo de potência reverso. Logo, o acréscimo de GDs próximas às cargas contribuem para redução das perdas ativas no sistema.

5.2.3 ANÁLISE DAS TENSÕES

O gráfico da Figura 19 mostra os valores máximos e mínimos da tensão em p.u da rede elétrica, em função da potência gerada pela GD. Pelo gráfico, é possível verificar o aumento do nível de tensão na rede elétrica em função da potência gerada pela GD. Nota-se que a rede elétrica não tem problemas de sobretensão, mesmo com todas cargas sendo supridas pelas GDs.

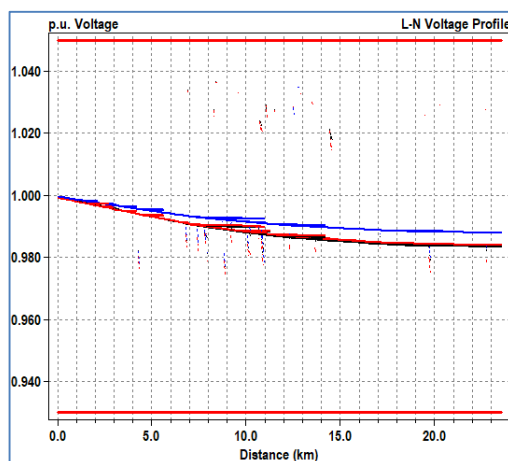
Figura 19 – Máxima e mínima tensão em p.u da rede elétrica



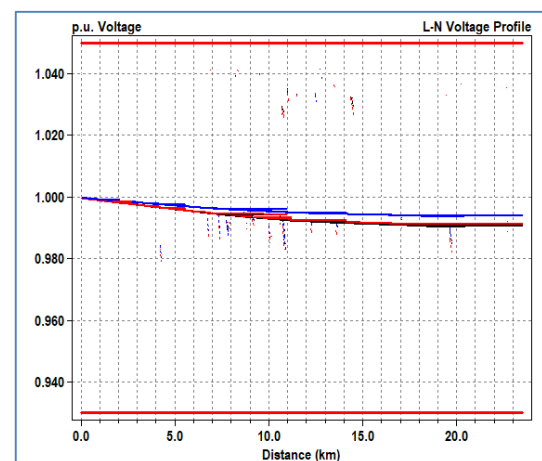
Fonte: Elaborado pelo Autor

Os gráficos da Figura 20 mostra todos os valores de tensão em p.u da rede elétrica em função da distância até a subestação. Nota-se que a elevação do nível de tensão é pequena e existem linhas que estão próximos ao limite de sobretensão. No entanto, de acordo com o gráfico da Figura 19, a rede elétrica não atinge o limite de sobretensão em nenhuma simulação realizada. Além disso, utilizando a função *Export Overloads*, também foi verificado que a rede de distribuição não tem problemas de sobrecarga para todas as simulações.

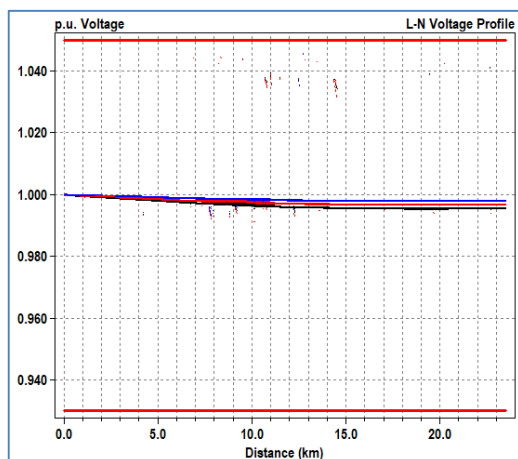
Figura 20 – Tensão da linha em função da distância da Subestação



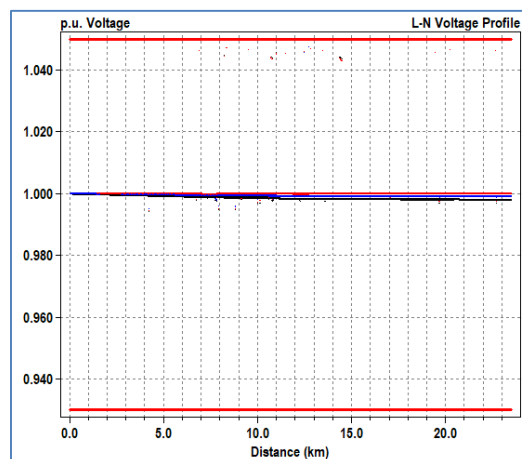
(a) Sem GD



(b) Rede com 50 GDs



(c) Rede com 80 GDs



(d) Rede com 124 GDs

OBS: Tensão fase A – preto; Tensão fase B – vermelho; Tensão fase C – azul;

Fonte: Elaborado pelo Autor

Por fim, utilizando a função *Show voltages*, foi verificado que a rede não tem problemas de desequilíbrio de tensão. A Tabela 21 mostra o maior fator de desequilíbrio para cada simulação. Pela tabela, nota-se que o valor de FD diminui conforme aumenta a quantidade das GDs.

Tabela 21 - Maior fator de desequilíbrio de tensão

Quantidade de GDs	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	115	124
Max FD (%)	0.43	0.42	0.42	0.41	0.37	0.37	0.33	0.32	0.33	0.31	0.32	0.27	0.18

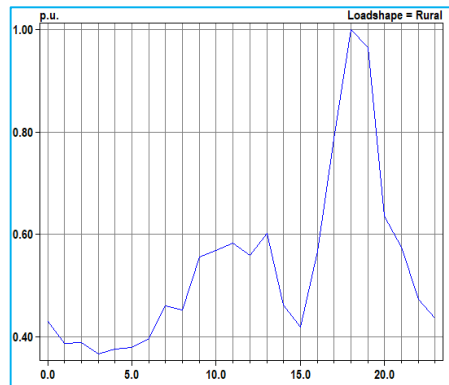
Fonte: Elaborado pelo Autor

5.3 GDs INSTALADAS PRÓXIMA ÀS CARGAS – MODO DIÁRIO

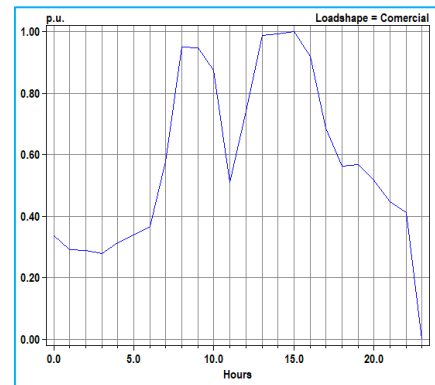
A fim de verificar o impacto do crescimento da geração distribuída instalada próximos aos consumidores, várias simulações foram realizadas variando a quantidade das GDs. Nesta seção, serão apresentadas os resultados e análises com as curvas de carga diária.

A Figura 21 mostra as curvas diária para quatro tipos de consumidores. Nota-se que a grande parte da energia é consumida no horário de almoço e no horário de ponta (18 às 21 horas). Já a Figura 22 mostra os três tipos de curvas diária criadas para as GDs.

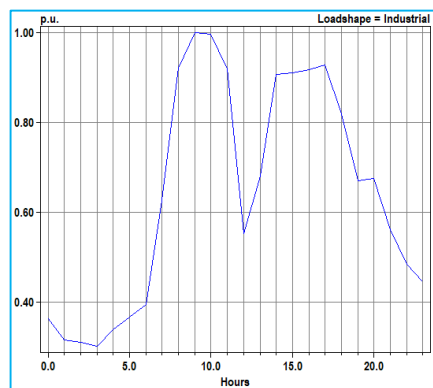
Figura 21 – Curva de carga dos consumidores



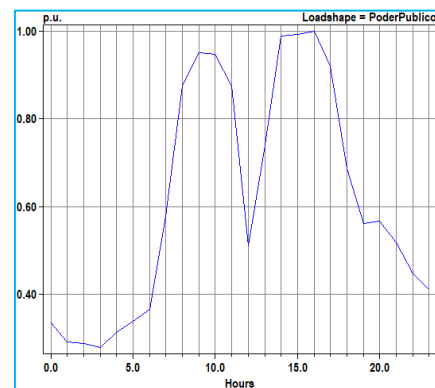
(a) Rural



(b) Comercial



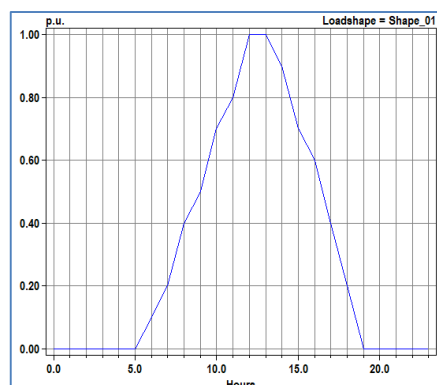
(c) Industrial



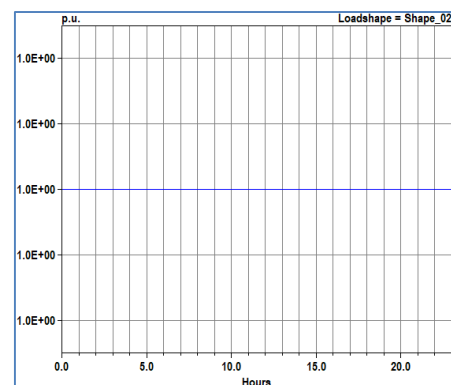
(d) Poder Público

Fonte: Elaborado pelo Autor

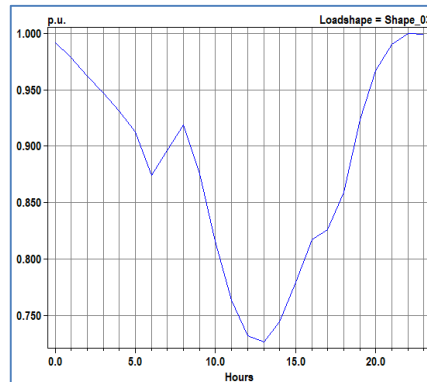
Figura 22 – Curva de carga para as GDs



(a) Shape_01
(baseada na energia solar)



(b) Shape_02
(constante)



(c) Shape_03
(baseada na energia eólica)

Fonte: Elaborado pelo Autor

5.3.1 ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA

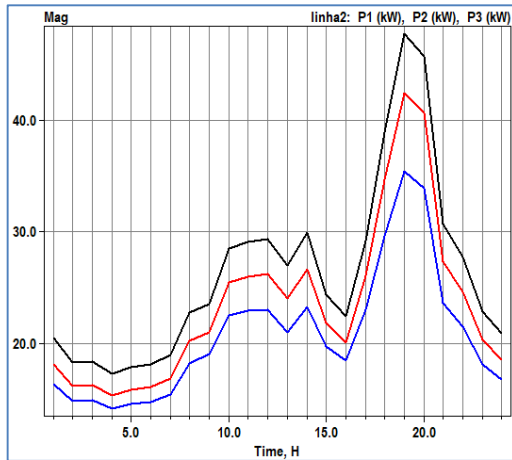
As Figura 23 e 24 mostram o fluxo de potência ativa e reativa na entrada da rede de distribuição no período de um dia. A partir da Figura 23.(a), observa-se que o horário com a maior demanda de potência é entres 19 e 20 horas, momento em que as pessoas chegam em casa para tomar banho, acenderem as luzes de casa, entre outros.

Na maioria dos consumidores, foram instaladas GDs com a curva “Shape_01” para simular a GD fotovoltaica. Como a grande parte da energia é gerada durante o dia, as GDs vão injetar os excedentes de energia na rede de distribuição durante este período. Consequentemente, a energia injetada produz o fluxo de potência reverso podendo chegar até a subestação. Na Figura 21.(c), já é possível verificar que o fluxo de potência reverso atingiu a subestação entres 13 e 15 horas.

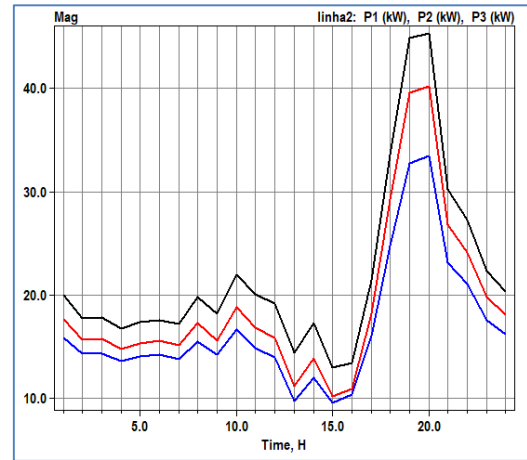
Enquanto o horário de almoço sofreu alterações conforme aumenta a quantidade de GDs, o horário de pico não teve modificações significativas. Como não há grande quantidade de geração de energia no horário de pico, o consumo de energia continuou alto nesse período.

Portanto, a maioria dos consumidores geram grande quantidade de energia no horário de almoço, obtendo créditos de energia para compensar a energia consumida nos outros períodos.

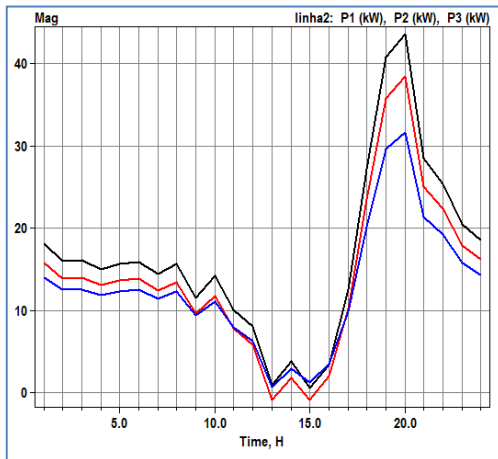
Figura 23 – Fluxo de potência ativa na entrada da rede de distribuição – modo diário



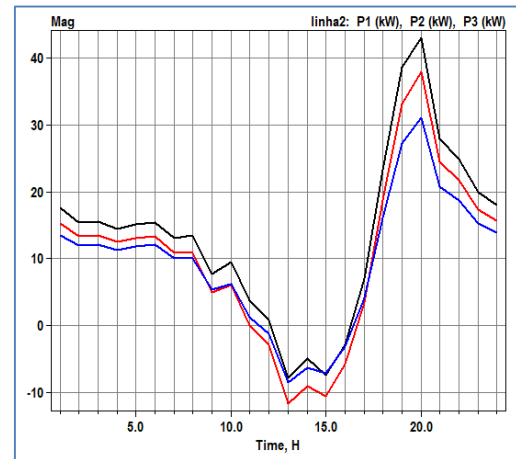
(a) Sem GD



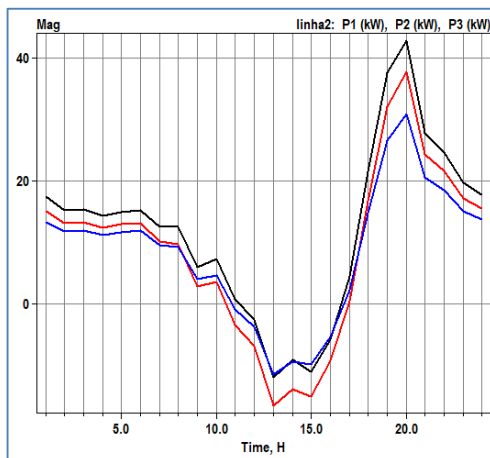
(b) Com 30 GDs



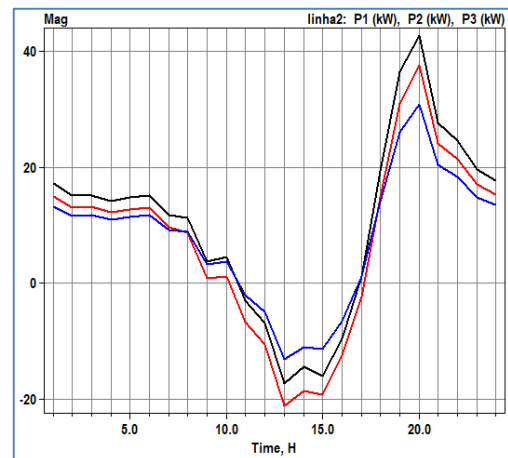
(c) Com 60 GDs



(d) Com 80 GDs



(e) Com 100 GDs

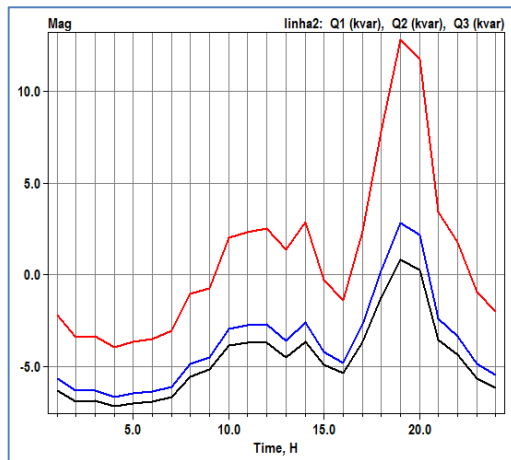


(f) Com 124 GDs

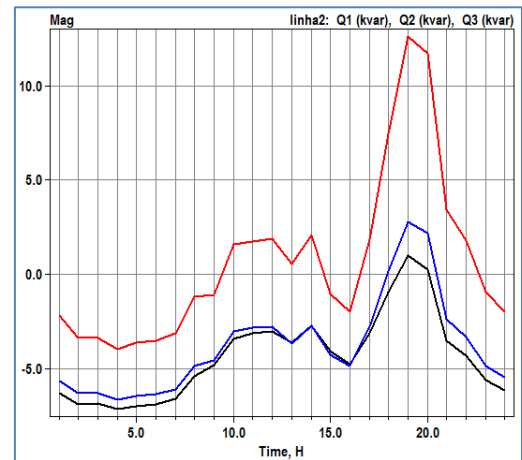
OBS: P1 – preto; P2 – vermelho; P3 – azul;

Fonte: Elaborado pelo Autor

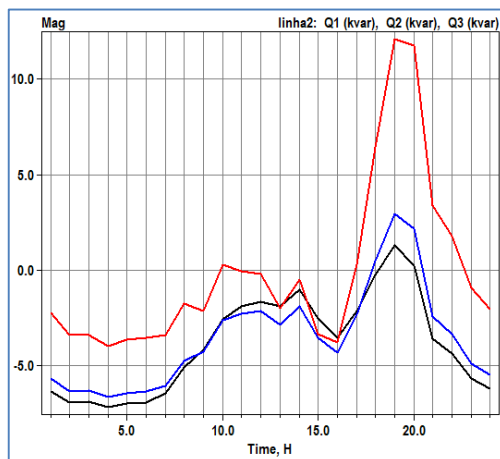
Figura 24 – Fluxo de potência reativa na entrada da rede de distribuição – modo diário



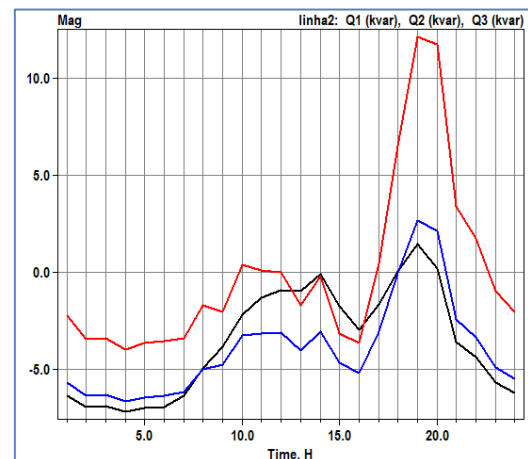
(a) Sem GD



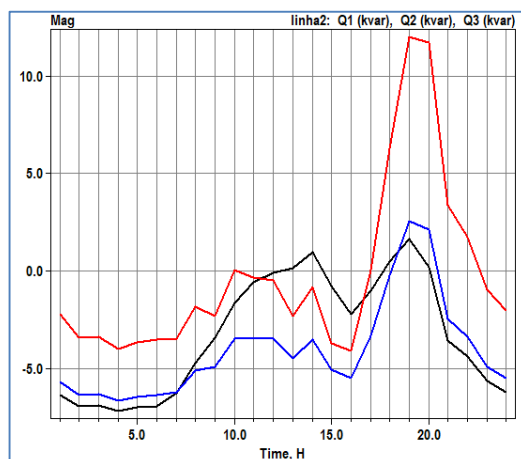
(b) Com 30 GDs



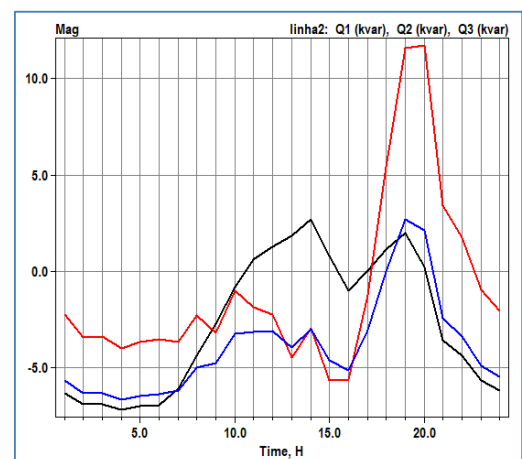
(c) Com 60 GDs



(d) Com 80 GDs



(e) Com 100 GDs



(f) Com 124 GDs

OBS: Q1 – preto; Q2 – vermelho; Q3 – azul;

Fonte: Elaborado pelo Autor

As GDs instaladas no sistema de distribuição têm fator de potência unitário, isto é, geram apenas energia ativa. Na Figura 24, verifica-se que não houve alterações significativas conforme aumenta a quantidade de GDs.

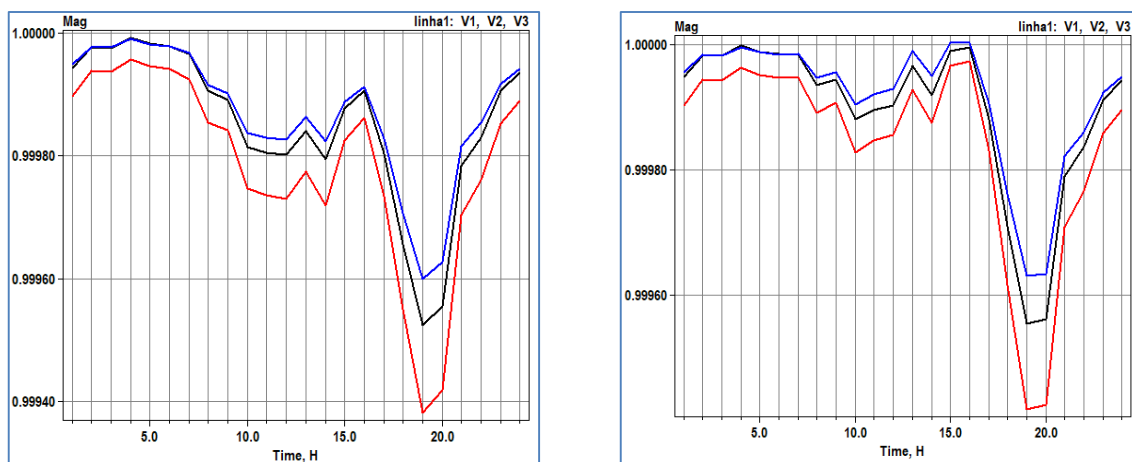
Apesar de não haver alteração no consumo de energia nos consumidores, há preocupação com o fator de potência do sistema. As GDs suprem uma parcela da potência ativa, reduzindo a potência ativa fornecida pela subestação. Consequentemente, o fator de potência da rede decai conforme aumenta a geração de energia ativa pelas GDs, pois o fornecimento de energia reativa pela subestação continua sendo a mesma de antes.

5.3.2 ANÁLISE DAS TENSÕES

Os gráficos da Figura 25 mostram os valores da tensão na entrada da rede durante um dia em função da quantidade de GDs. Nota-se que o nível de tensão está dentro do limite estabelecida pela ANEEL. Com a instalação das GDs, verifica-se um pequeno aumento no nível de tensão no horário de almoço. Além disso, é possível também observar uma pequena queda de tensão no horário de pico em que ocorre o maior consumo de energia elétrica.

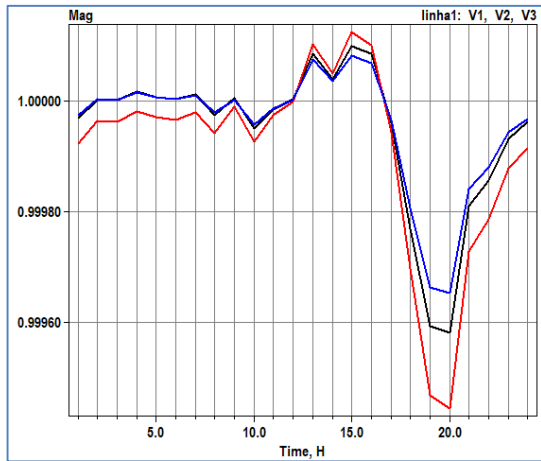
Apesar de estarem dentro dos limites, também se verifica uma pequena variação no desequilíbrio de tensão na Figura 25. A causa da variação no desequilíbrio de tensão é devida as GDs bifásicas na rede elétrica que injetam potência nas fases em que estão conectadas.

Figura 25 – Tensão de fase na entrada da rede de distribuição – modo diário

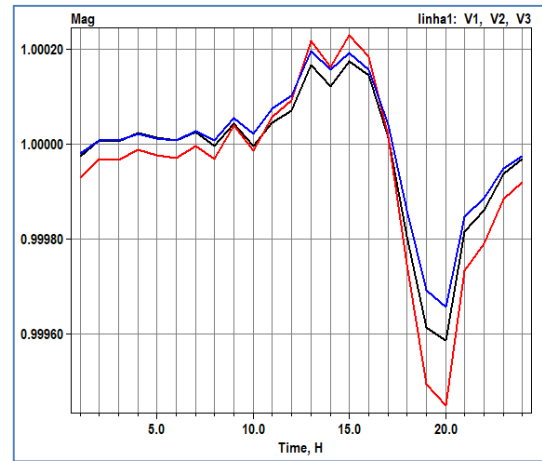


(a) Sem GD

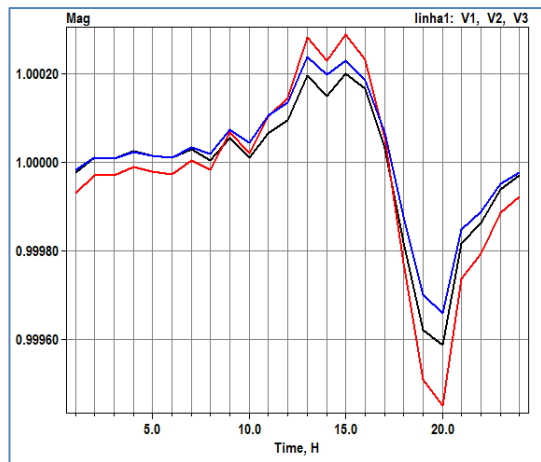
(b) Com 30 GDs



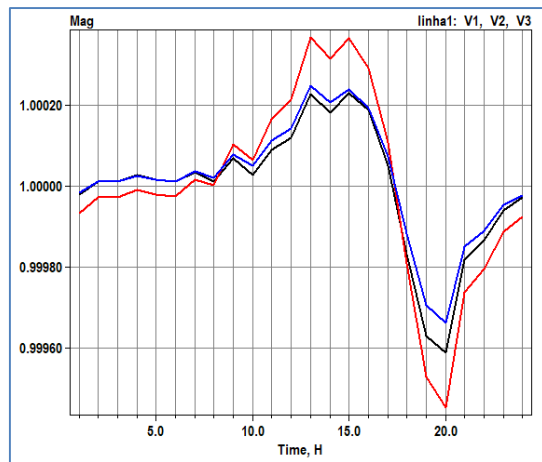
(c) Com 60 GDs



(d) Com 80 GDs



(e) Com 100 GDs



(f) Com 124 GDs

OBS: V1(fase a) – preto; V2(fase b) – vermelho; V3(fase c) – azul;

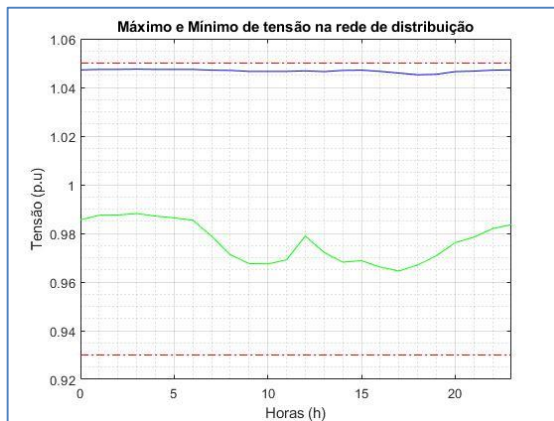
Fonte: Elaborado pelo Autor

Os gráficos da Figura 26 mostram os valores máximos e mínimos das tensões na rede de distribuição para seis simulações. Observa-se que até a Figura 26.(b), as GDs instaladas não causam problemas de sobretensão na rede elétrica.

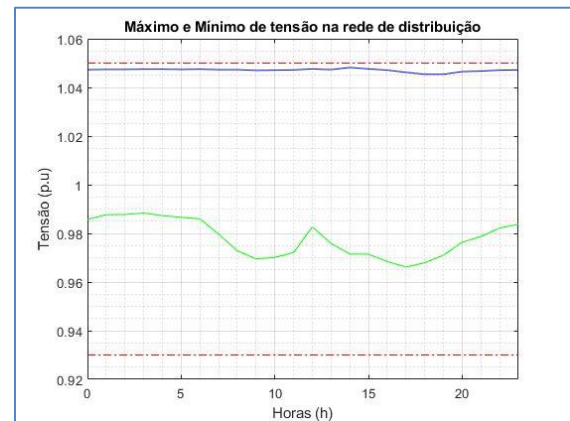
Já na Figura 26.(c), o problema de sobretensão começa a surgir no horário de almoço. Este horário é o momento em que ocorre a maior geração de energia elétrica e como o consumo de energia é bem menor que a gerada, grande parte da energia produzida é injetada na rede aumentando o nível de tensão do mesmo.

Por fim, utilizando a função *Export Overloads* para todas as simulações, foi verificado também que a rede de distribuição não tem problemas de sobrecarga.

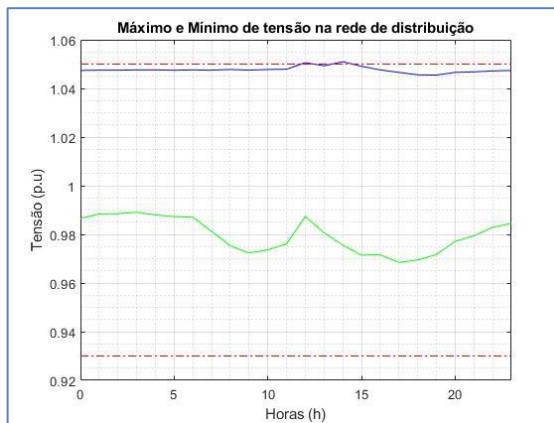
Figura 26 – Valor máximo (azul) e mínimo (verde) de tensão na rede de distribuição – modo diário



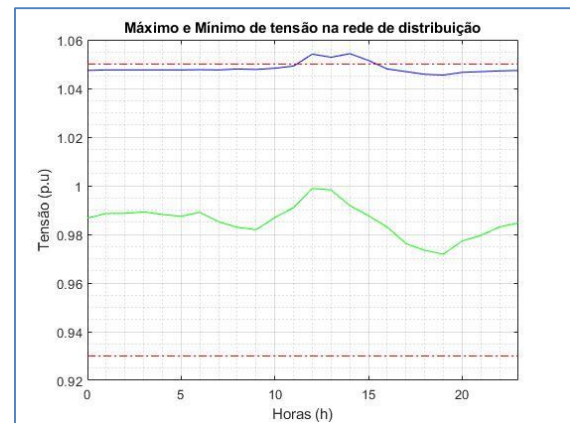
(a) Sem GD



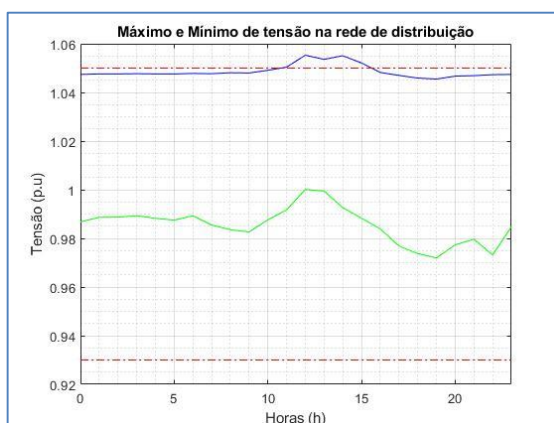
(b) Com 30 GDs



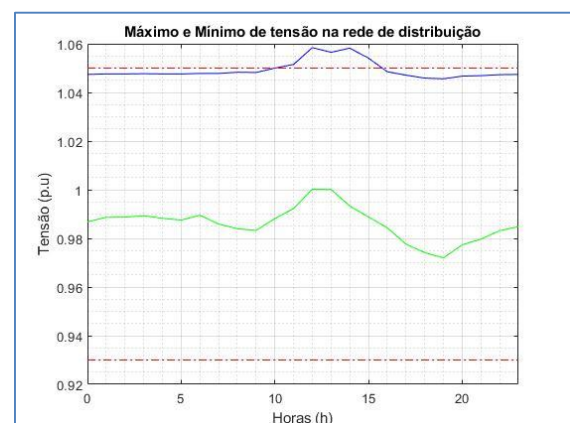
(c) Com 60 GDs



(d) Com 80 GDs



(e) Com 100 GDs



(f) Com 124 GDs

Fonte: Elaborado pelo Autor

6 CONCLUSÃO

Apesar da matriz elétrica brasileira ser uma das mais limpa do mundo, ela é bastante frágil devido a dependência das usinas hidrelétricas. O crescimento da geração distribuída é uma das opções para diversificar a matriz elétrica brasileira. Entretanto, a inserção da geração distribuída pode vir a causar inúmeros impactos nas redes de distribuição de energia elétrica, aumentando a complexidade da rede elétrica.

Deste modo, foram realizadas simulações para analisar os impactos causados pela geração distribuída em uma rede elétrica real, avaliando o fluxo de potência, as perdas técnicas e os níveis de tensão.

A simulação da rede elétrica foi realizada pelo software OpenDSS, tendo como ferramenta auxiliar o Excel e Matlab. Devido à grande quantidade de informações retiradas do banco de dados, necessitou-se do Excel para organizar os dados e do Matlab para converter os dados na linguagem do OpenDSS. Entretanto, não foi possível obter dados de uma mini ou microgeração para simular uma situação mais real. Além disso, houve dificuldades na organização dos dados, pois havia muitas informações desnecessárias e algumas com erros de cadastros. Nos dados retirados, havia cadastros em que o tipo de fase (trifásico, bifásico ou monofásico) do consumidor não coincidia com o tipo de fase da linha a qual está conectado.

Inicialmente, foram realizadas simulações para verificar o impacto de uma geradora na rede de distribuição. A partir das simulações, observou-se que a geração distribuída pode contribuir para a redução de perdas técnicas na rede. Além disso, verificou-se que a inserção da geração distribuída pode elevar os níveis de tensão, podendo atuar como um regulador de tensão para compensar quedas de tensão. Entretanto, enquanto a geração distribuída fornece apenas energia ativa aos consumidores, a energia reativa continua a ser suprida pela subestação. Logo, a geração distribuída reduz o fator de potência da rede e a geração, em grande escala, gera fluxo de potência reversos, podendo danificar os equipamentos da rede.

Após verificar o impacto de uma geração distribuída na rede, foram feitas simulações no “modo diário” do OpenDSS, com as gerações distribuídas próximas aos consumidores. Com a maioria dos geradores simulando uma geração solar, verificou-se que no horário de almoço a energia gerada é alta, podendo produzir fluxos de potência reversos capazes de alcançar a subestação. Além disso, observou-se que a energia consumida no horário de pico continuou alto.

A rede de distribuição simulada no modo diário não tem capacidade de aguentar grandes quantidades de GDs. Dependendo do local de instalação, a rede pode atingir o limite de sobretensão com 60 GDs instaladas nos consumidores.

Portanto, a inserção da geração distribuída nas redes elétricas pode trazer vantagens e desvantagens para as distribuidoras. Para manter a qualidade de energia com a instalação das GDs, são necessárias análises e pesquisas sobre controles de tensão e fator de potência do sistema. Além disso, a proteção e operação das redes tornam-se mais complexa devido ao aparecimento de fluxos de potência reversos oriundos das GDs.

REFERÊNCIAS

ABRADEE. Redes de Energia Elétrica. **Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica**.

Disponível em: <<https://www.abradee.org.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 18 Outubro 2021.

ANEEL. Aprimoramento da metodologia de cálculo de perdas na distribuição regulamentada no Módulo 7 – Cálculo de Perdas na Distribuição do PRODIST. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 11 Junho 2011. Disponível em:

<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2014/026/documento/nota_tecnica_0057_srd.pdf>. Acesso em: 12 Novembro 2021.

_____. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 17 Abril 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 30 Outubro 2021.

_____. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº687, DE 24 DE NOVEMBRO DE 2015. **AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA**, 24 Novembro 2015. Disponível em:

<<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 30 Outubro 2021.

_____. Geração Distribuída. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2018a. Disponível em:

<<https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acesso em: 25 Outubro 2021.

_____. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 1. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 26 Dezembro 2018b. Disponível em:

<https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo1_Revis%C3%A3o10/f6c63d9a-62e9-af35-591e-5fb020b84c13>. Acesso em: 05 Outubro 2021.

_____. Sistema de Subtransmissão. **LabTIME UFG**, 2018c. Disponível em:

<http://www.labtime.ufg.br/modulos/aneel/mod4_uni1_sl12.html>. Acesso em: 15 Outubro 2021.

_____. Subestações de distribuição de energia elétrica. **LabTIME UFG**, 2018d. Disponível em:

<http://www.labtime.ufg.br/modulos/aneel/mod4_uni1_sl13.html>. Acesso em: 17 Outubro 2021.

_____. Brasil ultrapassa marca de 1GW em geração distribuída. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 11 Junho 2019a. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida/656877>. Acesso em: 03 Novembro 2021.

_____. Informações Gerenciais - Março 2019. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, Março 2019b. Disponível em:

<<https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+-+1%C2%BA+trimestre+de+2019/b860054f-79ec-6608-951a-fb2288701434>>. Acesso em: 02 Novembro 2021.

. Perdas de Energia Elétrica na Distribuição. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2019c.

Disponível em:

<https://www.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relat%C3%B3rio+Perdas+de+Energia_+E+di%C3%A7%C3%A3o+1-2019-02-07.pdf/d7cc619e-0f85-2556-17ff-f84ad74f1c8d#:~:text=As%20perdas%20t%C3%A9nicas%20s%C3%A3o%20inerentes,decorr%C3%Aancia%20das%20leis%20da%20f%C3%A9>. Acesso em: 16 Novembro 2021.

_____. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2021. Disponível em:

<https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_12/342ff02a-8eab-2480-a135-e31ed2d7db47>. Acesso em: 16 Novembro 2021.

CASSEL, T. D. O. **Avaliação de Perdas em Sistemas de Distribuição Considerando Modelagem de Carga**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil, p. 188. 2012.

CASTRO, B. Crise hídrica e aumentos na conta de luz impulsionam mercado de energia solar em todo o país. **g1**, 28 Agosto 2021. Disponível em:

<<https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2021/08/27/crise-hidrica-e-aumentos-na-conta-de-luz-impulsionam-mercado-de-energia-solar-em-todo-o-pais.ghtml>>. Acesso em: 01 Novembro 2021.

CELESC. CRITÉRIOS PARA UTILIZAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO. **Celesc Distribuição S. A.**, 2020.

Disponível em: <<https://www.celesc.com.br/arquivos/normas-tecnicas/especificacao-tecnica/I3130021.pdf>>. Acesso em: 20 Outubro 2021.

DIAS, M. V. X.; BORTONI, E. D. C.; HADDAD, J. Geração distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras. **Revista Brasileira de Energia**, p. p.11, 2005.

DUGAN, R. C.; MONTENEGRO, D. **The Open Distribution System Simulation (OpenDSS)**. EPRI. [S.l.]. 2020.

EPE. PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA 2026. **Empresa de Pesquisa Energética**, 2016.

Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf>>. Acesso em: 01 Outubro 2021.

. PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA 2029. Empresa de Pesquisa Energética. 2019.

Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-422/PDE%202029.pdf>>. Acesso em: 17 Novembro 2021.

. Matriz Energética e Elétrica. **Empresa de Pesquisa Energética**, 2021. Disponível em:

<<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 01 Outubro 2021.

FINKLER, A. et al. **RELAÇÃO DO CRESCIMENTO ECONÔMICO E CONSUMO DE ENERGIA**. XXIV Seminário de Iniciação Científica da Unijuí. [S.l.]. 2016.

GARCIA, D. A. A.; DUZZI JUNIOR, F. E. Tópicos de sistemas de transmissão e de distribuição de energia elétrica. **O setor elétrico**, Março 2012. Disponível em: <http://www.osetoelettrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/Ed74_fasc_distribuicao_cap2.pdf>. Acesso em: 17 Outubro 2021.

GONÇALVES, R.; BALLERINI, B. F.; FREITAS, . E. L. **Influência da geração distribuída em redes de distribuição de energia elétrica**. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Poços de Caldas, Brasil. 2016.

KATIRARE, F.; AGUERO, J. R. Solar PV Integration Challenges. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 9, n. 3, p. 62-71, Abril 2011.

LANES, A. L. F.; ROSSONI, A. **FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA MODELAGEM DE ALIMENTADORES REAIS DE DISTRIBUIÇÃO NO OPENDSS**. [S.l.].

LIMA, P. R. G. **DETECÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA REVERSO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: UM ESTUDO DE CASO EM UM SISTEMA TESTE DO IEEE E UM SISTEMA REAL DA CIDADE DE FORMIGA – MINAS GERAIS**. INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS. Formiga. 2021.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. **GERAÇÃO MÉDIA DIÁRIA E HORÁRIA**, 2021. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao-media-diaria-horaria.aspx>>. Acesso em: 21 Dezembro 2021.

PALUDO, J. A. **Avaliação dos impactos de elevados níveis de penetração da geração fotovoltaica no desempenho de sistemas de distribuição de energia elétrica em regime permanente. Tese (Doutorado)**. Universidade de São Paulo. São Carlos. 2014.

PAULILO, G. Desequilíbrios de tensão. **O setor elétrico**, Março 2013. Disponível em: <https://www.osetoelettrico.com.br/wp-content/uploads/2013/03/Ed86_fasc_qualidade_cap3.pdf>. Acesso em: 22 Novembro 2021.

PORTAL SOLAR. Geração distribuída supera 7 GW em operação no território nacional. **PORTAL SOLAR**, 14 Outubro 2021. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/geracao-distribuida/geracao-distribuida-supera-7-gw-em-operacao-no-territorio-nacional.html>>. Acesso em: 07 Novembro 2021.

SHAYANI, R. A. **Método para determinação do limite de penetração da geração**. Universidade de Brasília. Brasília. 2010.

SILVA, L. C. et al. CRESCIMENTO DA GERAÇÃO DISTRIBUIDA NO BRASIL E CORRELAÇÃO ENTRE OS ESTADOS. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade (ISSN 2318-3233)**, v. 10, n. 3, p. 143-158, 2020.

TARANTO, G. N. et al. **Impactos da Difusão da Micro e da Mini Geração no Planejamento, na Operação e na Manutenção do Sistema de Distribuição**. GESEL. Rio de Janeiro. 2017.

Apêndice A – Código do OpenDSS para a seção 5.1

```
//---Rede de Distribuicao---//
//--- Inicio ---//
clear

New circuit.Subestacao
~ basekv=13.8 Bus1=6955A pu=1 Phases=3 R1=0.7002 X1=1.042 R0=2.973 X0=4.1186

//----Dados da Rede-----//
redirect Condutor.dss
redirect LineGeo.dss
redirect Line.dss
redirect Transformer.dss
redirect Capacitor.dss
redirect Load.dss

//-----Novos elemento-----//
!New Generator.G1 bus1=7224A kW=30 kV=13.8 pf=-0.85 conn=Wye phases=3 model=3 !kW varia

//-----Medidor-----//
New Energymeter.medidor element=line.7208A-6955A terminal=1

//-----Tensões de Base-----//
set voltagebases = [13.8, 0.48, 0.38, 0.23, 0.22]
calcVoltagebases

//-----Coordenadas x e y das barras-----//
BusCoords BusCoordenada.csv

//-----Marcadores-----//
AddBusMarker Bus=6955A code=36 color=red size=4 !Local da Subestação
AddBusMarker Bus=7224A code=36 color=green size=4 !Local da GD

//-----Convergencia de parametro-----//
Set tolerance=0.000001
Set maxcontrol=100
Set maxiteration=100

//-----Configuracao pprofile-----//
!Set Emergvmaxpu=1.07
!Set Emergvminpu=0.87
!Set Normvmaxpu=1.05
!Set Normvminpu=0.93

//-----modo de solução -----//
solve mode=direct
solve

//-----Saídas -----//
!Export Overloads
!Show Voltages LN
!Show Currents Elem
!Show Powers kVA Elem
!Show Losses
solve
```

Apêndice B – Código do OpenDSS para o a seção 5.2

```
//---Rede de Distribuição---//
//--- Inicio ---//
clear

New circuit.Subestacao
~ basekv=13.8 Bus1=6955A pu=1 Phases=3 R1=0.7002 X1=1.042 R0=2.973 X0=4.1186

//----Dados da Rede-----//
redirect Conductor.dss
redirect LineGeo.dss
redirect Line.dss
redirect Transformer.dss
redirect Capacitor.dss
redirect Load.dss

//----Novos elemento-----//
!redirect Generator10.dss      ! 10 consumidores com GD
!redirect Generator20.dss     ! 20 consumidores com GD
!redirect Generator30.dss     ! 30 consumidores com GD
!redirect Generator40.dss     ! 40 consumidores com GD
!redirect Generator50.dss     ! 50 consumidores com GD
!redirect Generator60.dss     ! 60 consumidores com GD
!redirect Generator70.dss     ! 70 consumidores com GD
!redirect Generator80.dss     ! 80 consumidores com GD
!redirect Generator90.dss     ! 90 consumidores com GD
!redirect Generator100.dss    ! 100 consumidores com GD
!redirect Generator115.dss    ! 115 consumidores com GD
!redirect Generator124.dss    ! 124 consumidores com GD

//-----Tensões de Base-----//
set voltagebases = [13.8, 0.48, 0.38, 0.23, 0.22]
calcVoltagebases

//-----Coordenadas x e y das barras-----//
BusCoords BusCoordenada.csv

//-----Marcadores-----//
AddBusMarker Bus=6955A code=36 color=red size=4      !Local da Subestação

//-----Convergencia de parametro-----//
Set tolerance=0.000001
Set maxcontrol=100
Set maxiteration=100

//-----Configuracao pprofile-----//
!Set Emergvmaxpu=1.07
!Set Emergvminpu=0.87
!Set Normvmaxpu=1.05
!Set Normvminpu=0.93

//-----modo de solução -----//
!solve mode=snapshot
solve

//-----Saídas -----//
!Show Voltage
!Show Losses
!Show Powers kVA Elem
!Export overloads
Solve
```

Apêndice C – Código do OpenDSS para o a seção 5.3

```
//---Rede de Distribuição---//
//--- Inicio ---//
clear

New circuit.Subestacao
~ basekv=13.8 Bus1=6955A pu=1 Phases=3 R1=0.7002 X1=1.042 R0=2.973 X0=4.1186

//----Dados da Rede-----//
redirect Conductor.dss
redirect LineGeo.dss
redirect Line.dss
redirect Transformer.dss
redirect Capacitor.dss
redirect LoadShape.dss
redirect Load.dss

//----Novos elemento-----//
!redirect Generator10.dss !10 consumidores com GD
!redirect Generator20.dss !20 consumidores com GD
!redirect Generator30.dss !30 consumidores com GD
!redirect Generator40.dss !40 consumidores com GD
!redirect Generator50.dss !50 consumidores com GD
!redirect Generator60.dss !60 consumidores com GD
!redirect Generator70.dss !70 consumidores com GD
!redirect Generator80.dss !80 consumidores com GD
!redirect Generator90.dss !90 consumidores com GD
!redirect Generator100.dss !100 consumidores com GD
!redirect Generator115.dss !115 consumidores com GD
!redirect Generator124.dss !124 consumidores com GD

//-----Medidor-----//
New Energymeter.medidor element=line.7208A-6955A terminal=1

//-----Monitor-----//
New monitor.Monitor1 element=line.7208A-6955A terminal=1 mode=0 ppolar=no !Monitorando as tensões na primeira
linha
New monitor.Monitor2 element=line.7208A-6955A terminal=1 mode=1 ppolar=no !Monitorando a potência na primeira
linha

//-----Tensões de Base-----//
set voltagebases = [13.8, 0.48, 0.38, 0.23, 0.22]
calcVoltagebases

//-----Coordenadas x e y das barras-----//
BusCoords BusCoordenada.csv

//-----Marcadores-----//
AddBusMarker Bus=6955A code=36 color=red size=4 !Subestação
!set marktransformers=yes !Transformadores

Set tolerance=0.000001
Set maxcontrol=100
Set maxiteration=100

!set mode=direct
!Set mode=snapshot
!Set mode=daily 1h 19

set mode = daily
set stepsize = 1h
set number = 24
solve

!Set Emergvmaxpu=1.07
!Set Emergvminpu=0.87
!Set Normvmaxpu=1.05
!Set Normvminpu=0.93
!solve

!Show Voltages LN Nodes
!Show Currents Elem
```

!Show Powers kVA Elem
!Show Losses

!Export Overloads
!Plot Loadshape object=Rural
!Plot Loadshape object=Comercial
!Plot Loadshape object=Industrial
!Plot Loadshape object=PoderPublico
!Plot Loadshape object=Shape_01
!Plot Loadshape object=Shape_02
!Plot Loadshape object=Shape_03

!Export monitors linha1
!Export monitors linha2
!Plot monitor object= Monitor1 channels=(1 3 5) bases = [7967 7967 7967]
!Plot monitor object= Monitor2 channels=(1 3 5)
!Plot monitor object= Monitor2 channels=(2 4 6)