



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**GERALDO HENRIQUE COSTA**

**ESTUDO DOS IMPACTOS DA PENETRAÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA  
FOTOVOLTAICA EM UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO O SOFTWARE  
OPENDSS**

**FORTALEZA**  
**2023**

GERALDO HENRIQUE COSTA

ESTUDO DOS IMPACTOS DA PENETRAÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA  
FOTOVOLTAICA DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO O SOFTWARE  
OPENDSS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Daher

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

C872e Costa, Geraldo Henrique.

Estudo dos impactos da penetração da geração distribuída fotovoltaica em uma rede de distribuição utilizando o software OpenDSS / Geraldo Henrique Costa. – 2023.

39 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Sérgio Daher.

1. Sistema de distribuição de energia. 2. Geração distribuída fotovoltaica. 3. OpenDSS. 4. Fator de potência. 5. Curto-circuito. I. Título.

CDD 621.3

---

GERALDO HENRIQUE COSTA

ESTUDO DOS IMPACTOS DA PENETRAÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA  
FOTOVOLTAICA DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO O SOFTWARE  
OPENDSS

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Graduação em  
Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia  
da Universidade Federal do Ceará, como  
requisito parcial à obtenção do grau de  
bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Daher

Aprovado em: 12/07/2023

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Sérgio Daher (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará

---

Prof. Dr. Lucas Silveira Melo  
Universidade Federal do Ceará

---

Eng. Philipe Romão da Silva  
Universidade Federal do Ceará

## **AGRADECIMENTOS**

A todos que estiveram presentes em minha história até agora. Todos que confiaram, que apoiaram e que me deram um ombro quando precisei.

Agradecimento especial aos meus pais e minhas irmãs por tudo. Ao professor Sérgio Daher que teve paciência de acompanhar o trabalho mesmo com a demora.

## RESUMO

A geração fotovoltaica vem tendo um grande crescimento em sua tecnologia, tanto em eficiência quanto em longevidade. A projeção de sua adoção vem crescendo, no mundo e no Brasil. Porém esse crescimento precisa ser acomodado pela rede brasileira, por isso, esse estudo vem a focar nos impactos do crescimento da penetração da geração distribuída (GD). Utilizando do software *Open Distribution System Simulator* (OpenDSS) foi simulado uma rede equivalente a um grande centro urbano, contando com mais de 4800 barras. Estudar os impactos gerados pela GD é um campo de estudo importante para propor adequações à rede. Com a elevação da penetração de GDs na rede, observa-se uma melhora no perfil de tensão, diminuição das perdas técnicas e um aumento considerável na corrente de curto-circuito. A contínua elevação de unidades de geração distribuída pode provocar fenômenos a rede não adaptada, como a presença de fluxo reverso, a geração quase exclusiva de reativo pela fonte e um aumento na corrente de curto-circuito. Por fim, pode-se concluir que para evitar obsolescência antecipada, projetos de atualização e expansão da rede devem levar em consideração a futura penetração das GDs na rede.

**Palavras-chave:** sistema de distribuição de energia; openDSS; python; geração distribuída fotovoltaica; fator de potência; curto-circuito.

## ABSTRACT

Photovoltaic generation has seen great growth in its technology, both in efficiency and longevity. The projection of its adoption has been growing, in the world and in Brazil. However, this growth needs to be accommodated by the Brazilian grid, which is why this study focuses on the impacts of the growth in distributed generation (DG) penetration. Using the Open Distribution System Simulator (OpenDSS) software, a network equivalent to a large urban center was simulated, with more than 4800 bars. Studying the impacts generated by DG is an important field of study to propose adaptations to the Brazilian network. With the increase in the penetration of DGs in the network, an improvement in the voltage profile, a decrease in technical losses and a considerable increase in the short-circuit current can be observed. The continuous rise of distributed generation units can cause phenomena to the non-adapted network, such as the presence of reverse flow, the almost exclusive generation of reactive by the source and an increase in the short-circuit current. Finally, it can be concluded that to avoid early obsolescence, network upgrade and expansion projects must take into account the future penetration of DGs in the grid.

**Keywords:** power distribution system; openDSS; python; photovoltaic distributed generation; power factor; short circuit.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício.....	16
Figura 2 - Circuito equivalente a célula fotovoltaica.....	17
Figura 3 - Mapa brasileiro de irradiação solar em média anual.....	18
Figura 4 - Triângulo de Potência.....	21
Figura 5 - New Circuit.....	24
Figura 6 - Linecode.....	24
Figura 7 - Line.....	25
Figura 8 - Transformador.....	25
Figura 9 - Pvsystem.....	26
Figura 10 - Fluxo de potência 8500-nodes.....	27
Figura 11 - Curva de carga típica residencial.....	28
Figura 12 - Perfil de tensão por distância.....	29
Figura 13 - Local da GD instalada.....	30
Figura 14 - Curva de penetração vs geração.....	31
Figura 15 - Curva de Penetração vs perdas.....	31
Figura 16 - Curva de Penetração vs valor de tensão em PU.....	32
Figura 17 - Perfil ideal.....	33
Figura 18 - Perfil não ideal.....	33



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sintaxe.....	23
Tabela 2 - Correntes de curto-circuito.....	29
Tabela 3 - Correntes de curto-circuito para penetração de 3800 kW.....	34

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
C.C.	Curto-Circuito
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
COM	Component Object Model
DLL	Dynamic Link Library
DPCFA	Dispositivos de Proteção Contra Falha de Aterramento
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
EPRI	Electric Power Research Institute
FP	Fator de Potência
GD	Geração Distribuída GD
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
KM	Quilômetro
KW	Quilowatts
MW	Megawatts
NREL	Estados Unidos a National Renewable Energy Laboratory
OpenDSS	Open Distribution System Simulator
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Sistema Elétrico Nacional
PV	Painel Fotovoltaico
RN	Resoluções Normativas
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Integrado Nacional
TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>1.1 Motivação e justificativa</b> .....	13
<b>1.2 Objetivo Geral</b> .....	14
<b>1.3 Objetivos Específicos</b> .....	14
<b>1.4 Metodologia</b> .....	14
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO</b> .....	15
<b>2.1 Introdução</b> .....	15
<b>2.2 Geração Fotovoltaica</b> .....	15
<b>2.3 Irradiação Solar</b> .....	17
<b>2.4 Geração Distribuída</b> .....	18
<b>2.5 Inversores</b> .....	19
<b>2.6 Fator de Potência</b> .....	19
<b>2.7 Bancos de capacitores</b> .....	20
<b>3. SOFTWARE DE SIMULAÇÃO - PYTHON &amp; OPENDSS</b> .....	22
<b>3.1 Introdução</b> .....	22
<b>3.2 Linguagem Python</b> .....	22
<b>3.3 Open Distribution Simulator (OpenDSS)</b> .....	22
<b>3.4 Sintaxe e programação do OpenDSS</b> .....	22
<b>3.4.1 Elemento Circuit</b> .....	23
<b>3.4.2 Parâmetros Linecode e Line</b> .....	24
<b>3.4.3 Elemento Transformer</b> .....	25
<b>3.4.4 Elemento Load</b> .....	26
<b>3.4.5 Elemento PVsystem</b> .....	26
<b>4. SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA</b> .....	27
<b>4.1 Introdução</b> .....	27
<b>4.2 Circuito simulado</b> .....	27

<b>4.3 Simulação inicial do sistema sem a introdução da GD.....</b>	<b>28</b>
<b>4.4 Introdução da Geração Fotovoltaica.....</b>	<b>30</b>
<b>4.4.1 Local escolhido.....</b>	<b>30</b>
<b>4.4.2 Objetivos a serem observados com a GD.....</b>	<b>30</b>
<b>4.4.3 Resultado da simulação.....</b>	<b>31</b>
<b>4.4.4 Perfil de tensão.....</b>	<b>32</b>
<b>4.4.5 Nova Corrente de Curto-Circuito.....</b>	<b>34</b>
<b>5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>35</b>
<b>5.1 Conclusão.....</b>	<b>35</b>
<b>5.2 Trabalhos Futuros.....</b>	<b>36</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>37</b>
<b>ANEXO A – SCRIPT DO PYTHON UTILIZADO PARA FAZER O LOOP.....</b>	<b>39</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento socioeconômico de uma nação está diretamente ligado ao consumo de energia elétrica. Em 2002, o consumo total de energia (direta e indireta) das famílias foi de 119,594 milhões de toneladas equivalente de petróleo (tep). Em 2008, este valor aumentou 25,7% (152,366 milhões de tep). Logo, somando o crescimento esperado e novas tecnologias, a demanda energética continua a aumentar (WEISS, 2021). Necessitando atender a crescente demanda de energia elétrica, a resposta é construir cada vez mais unidades geradoras. A matriz de geração do Brasil tem como base a geração hidráulica, correspondendo a 56,8% da produção total segundo a EPE (Empresa de Pesquisas Energéticas) em 2021. No entanto, esse potencial está quase totalmente saturado para expansão de grandes usinas geradoras, apesar de existir mais potencial a se extrair com otimizações e tecnologias mais eficientes (BEN, 2021).

Essa crescente demanda energética entra em conflito com a necessidade de preservação de nosso planeta. A geração de energia pelo consumo de combustíveis fósseis não é mais vista como uma alternativa viável, apesar de sua relativa facilidade de extração e grande densidade energética, os impactos globais ameaçam vida humana na terra como existe hoje (FONTINELE DOS SANTOS; PEREIRA LOBO; MARTINS DE CARVALHO, 2021). A solução que atende essas preocupações e que traz impactos positivos para o sistema elétrico de potência (SEP) é a implementação da GD. A GD apresenta para o mercado de energia um potencial imenso, tendo como seus maiores representantes a eólica, que utiliza dos ventos para girar as pás de um gerador, convertendo energia mecânica em elétrica, e o painel fotovoltaico (PV), que utiliza do efeito fotoelétrico, fenômeno que acontece quando determinados materiais, normalmente metálicos, diante a exposição à radiação solar em frequências específicas, são capazes de emitir um grande número de elétrons (BARBOSA FILHO; SOARES DE AZEVEDO, 2013).

O crescimento de PV no Brasil vem sendo acompanhado por incentivos fiscais e melhoria da tecnologia, o que o torna uma opção mais atrativa para o cidadão (ABSOLAR, 2019). A Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) mostra um crescimento do mercado de PV que, em 2019, ultrapassou a geração

nuclear com 2.000 megawatts (MW) de potência operacional, e este potencial tende a continuar crescendo (ABSOLAR, 2019).

### **1.1 Motivação e justificativa**

Além dos benefícios ambientais, o crescimento de GDs traz como impactos positivos um melhor perfil de tensão e redução nas perdas técnicas nos cabos condutores (OLIVEIRA et al., 2016). No entanto, o aumento da penetração de PV também traz alguns desafios e impactos negativos que devem ser mitigados, sendo eles: injeção de harmônicos na corrente, perdas devido ao fluxo reverso, risco de faltas à terra em corrente contínua (CC) que são difíceis de detectar pois geralmente são menores do que a sensibilidade mínima do dispositivos de Proteção Contra Falha de Aterramento (DPCFA), oscilação de tensão que acarretam problemas para troca de TAPs em reguladores de tensão com a passagem de obstruções aos painéis como grandes massas de nuvem, aumento da capacidade de curto-circuito (C.C.), dentre outros (BORDIM, 2019).

A rede elétrica brasileira é composta em sua maioria por redes de topologia radial e passiva, projetadas com o fluxo de corrente unidirecional, do alimentador para a carga (CARVALHO et al., 2021). Com a injeção de GDs a rede, ocorre a inserção de uma carga com diferente fator de potência (FP), visto que o painel gera energia elétrica com FP igual a um, o que causa distorção na rede e pode sair dos parâmetros estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a qual determina que o valor mínimo deva ser de 0,92 a fim de garantir a eficiência energética da rede (ANEEL, 2021). A variação no Fluxo gerados pela GD também impacta o sentido e magnitude de corrente de curto-circuito.

Assim, nasce a necessidade de ferramentas de estudo e de um engenheiro eletricitista para fazer uma melhor implementação, preparado para mitigar os impactos negativos e explorar as vantagens. Esse trabalho tem como objetivo de estudo, o impacto do crescimento da penetração de GD no perfil de tensão, nas perdas técnicas e nas correntes de curto-circuito.

## 1.2 Objetivo Geral

O objetivo deste estudo é analisar os impactos causados pela geração distribuída de PV na rede elétrica usando do software livre Open Distribution System Simulator (OpenDSS) com auxílio do Python.

## 1.3 Objetivos Específicos

- Identificar um dos modelos existentes disponibilizados pela IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) para melhor estudar de maneira mais geral os impactos na rede.
- Adaptar o modelo para peculiaridades do Brasil, como a definição dos cabos que são usados para transmissão, curvas de consumo de energia e inserir a geração fotovoltaica.
- Analisar dados de perdas técnicas, fator de potência, característica de tensão em PU.
- Identificar melhor penetração para o sistema apresentado através de várias interações feitas pelo Python.

## 1.4 Metodologia

A metodologia deste trabalho constitui-se em:

- Identificar um exemplo de rede e adaptar para que melhor simular a realidade brasileira.
- Criar curvas de temperatura, carga consumida e incidência solar que se aproximem da realidade.
- Implementar um script para as GD que leva em consideração a temperatura e incidência solar desejada.
- Criar um script no Python para gerar um loop que modifique nossa rede implementando cada vez valores maiores de GD.
- Interpretar os resultados obtidos para observar e estudar os impactos que os diferentes valores de GD geram no sistema.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO

### 2.1 Introdução

Esse capítulo é dedicado a apresentar e discutir temas que serão abordados durante o trabalho, tais como geração distribuída com foco na geração fotovoltaica, o sistema elétrico brasileiro e suas peculiaridades, a importância do fator de potência para rede, faltas de curto-circuito e perdas técnicas.

### 2.2 Geração Fotovoltaica

A energia emitida pelo sol pode ser convertida diretamente em energia elétrica através do painel solar. A energia emitida pelo sol através de radiação eletromagnética é absorvida pelas células fotovoltaicas presentes no painel. Essas células são feitas de material semicondutor, geralmente de silício, na qual uma parte é enriquecida com fósforo, que tem mais elétrons do que o silício. Esse excesso de elétrons torna a camada mais condutiva, que se dá o nome tipo N, e outra camada enriquecida com boro, que tem menos elétrons que se chama tipo P, essas camadas são separadas por um semicondutor, como exemplificado na figura 1. Quando fótons são absorvidos pelo tipo N eles excitam os elétrons com energia suficiente para sair de sua camada de valência, se conectarmos tipo N com o tipo P, assim, é possível extrair trabalho do movimento desses elétrons livres (PINHO; GALDINO, 2014).

A célula é modelada como descrito na figura 2, a corrente gerada por esse circuito pode ser calculada como a soma da corrente de uma junção PN no escuro (diodo semicondutor) com a corrente gerada pelos fótons absorvidos. Essa corrente gerada no dispositivo é chamada de curva característica ou curva  $I$ - $V$ , ela é descrita pela equação (1) do diodo ideal.

Observando a equação (1) temos que na ausência de luz ( $I_L=0$ ) a célula fotovoltaica se comporta exatamente como um diodo.



$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Onde:

$I_L$  - Corrente foto gerada (A);

$I_0$  - Corrente de saturação reversa do diodo (A);

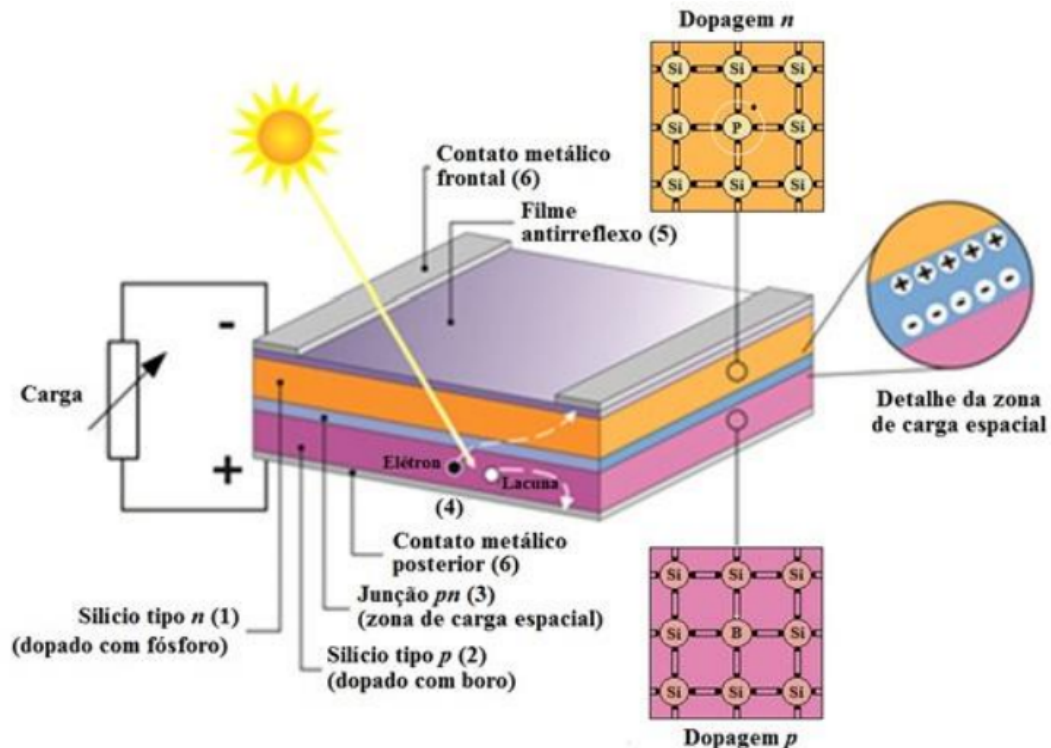
$n$  - Fator de idealidade do diodo, valor adimensional entre 1 e 2;

$q$  - Carga do elétron ( $1,6 \times 10^{-19}$  C);

$k$  - Constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K);

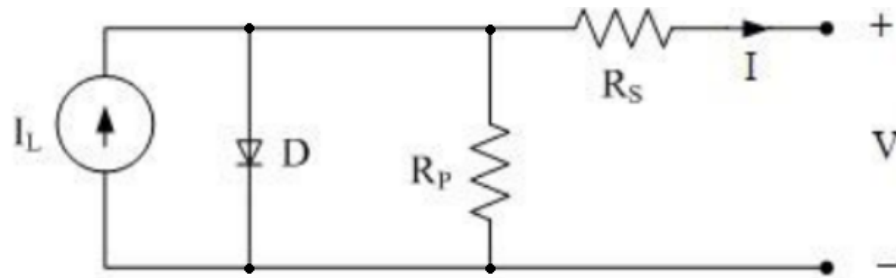
$T$  - Temperatura absoluta (K).

Figura 1 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício



Fonte: Pinho e Galdino (2014)

Figura 2 - Circuito equivalente a célula fotovoltaica



Fonte: Pinho e Galdino (2014)

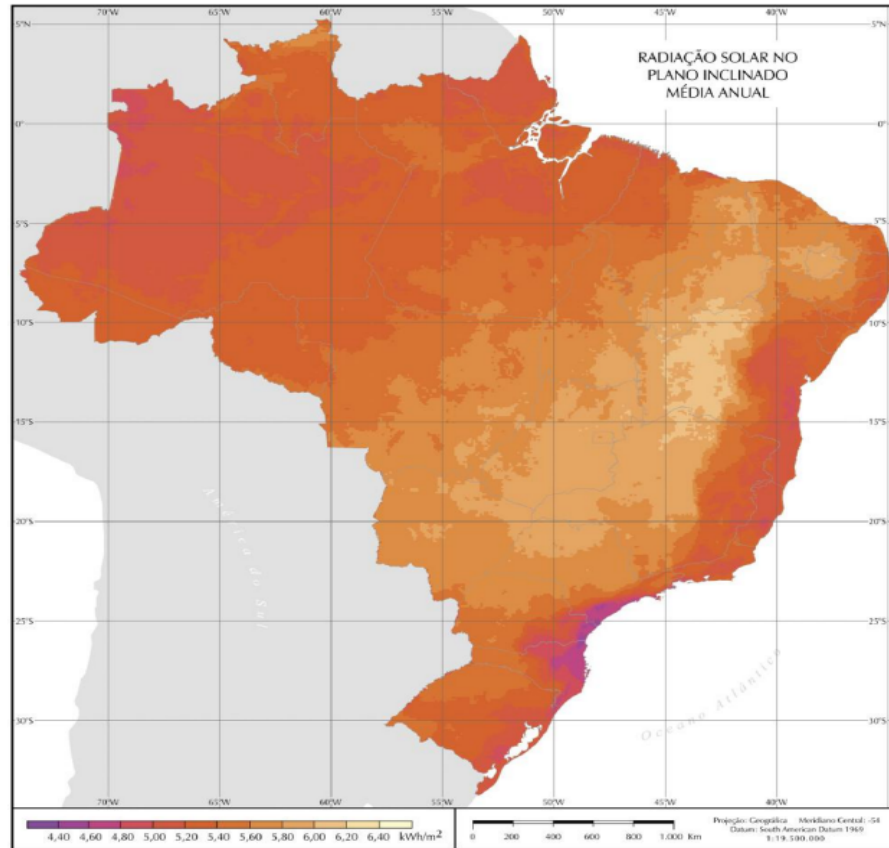
### 2.3 Irradiação Solar

O processo de fusão nuclear que ocorre no sol gera uma quantidade imensa de energia. Essa energia é liberada por radiação eletromagnética, fótons liberados pelo processo que viajam a velocidade da luz em diferentes comprimentos de onda. Porém, nem todos esses comprimentos de onda são absorvidos pelo nosso módulo fotovoltaico. O comprimento de onda visível é de 400nm a 700nm e o comprimento que a célula de silício absorve é próxima ao do infravermelho, qualquer radiação com comprimento de onda maior não tem energia suficiente para excitar os elétrons valentes (IBRAHIM; OMER, 2020).

Parte da radiação também é dispersa pela nossa atmosfera, a camada de ozônio que nos protege da irradiação ultravioleta realiza essa filtragem de comprimento de onda menores que causam não só danos à saúde, mas também a equipamentos elétricos sensíveis (WATANABE, 1958).

Outro destaque importante é o ângulo de incidência dos raios solares na superfície, devido a curvatura da terra e seu eixo de rotação em relação ao sol, diferentes regiões têm diferentes níveis de incidência solar, como mostrado na figura 3. O Brasil, em especial, tem tamanho territorial em escala continental, levando a variações de projeto de região para região, levando em conta o nível de incidência. As simulações feitas levam em conta a incidência solar no Brasil, como mostrado na figura 3, que demonstra o grande potencial fotovoltaico brasileiro (PEREIRA, 2006).

Figura 3 - Mapa brasileiro de irradiação solar em média anual



Fonte: PEREIRA (2006)

## 2.4 Geração Distribuída

A geração distribuída no Brasil é regulada pela PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), dentro da seção 3.7 do Módulo 3, e as resoluções normativas (RN) 482/2012, 687/2015 e 786/2017 (ANEEL, 2019). Esses documentos regulam a micro e minigeração de energia elétrica distribuída e conectadas à rede. A ANEEL diferencia a micro geração como menor ou igual a 75 quilowatts (kW) de potência instalada, já a minigeração tem valor superior a 75 kW e menor ou igual a 5 megawatt (MW) (ANEEL, 2016). Considerando a geração fotovoltaica, serão analisados casos nos quais as somas dos valores individuais das GDs de uma região passam dessa estimativa, porém esse valor é somente para simulação simplificada que concentra em um ponto o valor de várias micros e mini gerações conectadas.

## 2.5 Inversores

A célula fotovoltaica pela natureza do efeito fotovoltaico produz energia em corrente contínua e é preciso fazer a conversão para corrente alternada (CA) na frequência de 60hz utilizada na rede brasileira. Esse processo é feito por chaves transistores, dispositivos semicondutores de potência que constituem chaves elétricas controláveis (PINHO; GALDINO, 2014).

O inversor realiza essa conversão do CC-CA com a comutação das chaves que controla a direção da corrente contínua controlando seu caminho de maneira rápida, assim, a entrada CC se transforma em CA. Filtros de eletrônica de potência são usados para manter a corrente com o mínimo de distorção possível. A comutação do chaveamento define os grupos de inversores, comutados pela rede (comutação natural) e os auto comutados (comutação forçada) (PINHO; GALDINO, 2014).

Nenhum inversor trabalha de maneira ideal, perdas técnicas sempre existirão nessa conversão e também existe a introdução de pequenos harmônicos devido a forma de onda distorcida produzida pelo chaveamento dos transistores de potência. O software e o modelo de simulação escolhido leva em consideração essas pequenas perdas e distorções do FP causado pelos harmônicos, contudo, são simulações (GUSMAN, 2020).

## 2.6 Fator de Potência

O fator de potência é calculado através da potência ativa e reativa presente na rede. As cargas instaladas na rede devem atender os valores de fator de potência estipulados pela ANEEL para garantir a qualidade da energia transmitida e reduzir perdas por efeito Joule, já que em sua grande maioria a carga ativa é a que realiza trabalho e a carga reativa tem como função a geração de campo magnético em indutores, porém não realiza trabalho e sua presença nos cabos de condução acarretam em um maior valor de corrente, o que causa maior perda por efeito Joule, visto que a perda elétrica depende do quadrado da corrente como exemplificado pela equação (2) (ANEEL, 2019).

$$P_j = i^2 \cdot R \cdot t \quad (2)$$

Onde:

$P_j$ - Perda por calor dissipado em Joules(J);

$i$  - Corrente elétrica em Amperes (A);

$R$  - Resistência elétrica ( $\Omega$ );

$t$  - Tempo em segundos (s).

O valor aceitável do FP para a rede brasileira é entre o valor de 0,92 (noventa e dois centésimos) e 1,00 (um) indutivo ou 1,00 (um) e 0,92 (noventa e dois centésimos), de acordo com regulamentação vigente (PRODIST)(ANEEL, 2019).

## 2.7 Bancos de capacitores

São equipamentos de potência utilizados para garantir a qualidade e valor de fator de potência na rede elétrica. São instalados na subestação e em locais que são identificados como necessários na rede. Cargas indutivas, como motores, estão muito presentes na rede e são mais representadas do que cargas capacitivas. Essa carga indutiva gera potência reativa na geração dos campos magnéticos, por esse motivo bancos capacitores são instalados para elevar o fator de potência, reduzindo perdas.

O dimensionamento dos bancos de capacitores para elevação do fator de potência é feito de acordo com o triângulo de potência da carga em questão (MAMEDE, 2003).

$$P_c = P_{at} \cdot [tg(\varphi_1) - tg(\varphi_2)] \quad (3)$$

Onde:

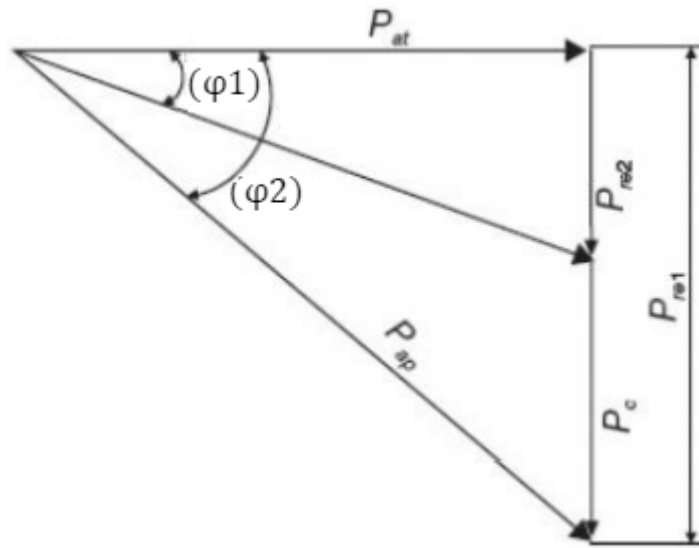
$P_c$ - Potência do banco de capacitores, em (kVAr);

$P_{at}$ - Potência ativa, em kW;

$\varphi_1$  - Atual ângulo do fator de potência atual;

$\varphi_2$ - Novo ângulo do fator de potência.

Figura 4 - Triângulo de Potência



Fonte: Mamede (2003)

### **3. SOFTWARE DE SIMULAÇÃO - PYTHON & OPENDSS**

#### **3.1 Introdução**

Esse capítulo é dedicado à apresentação das ferramentas de simulação, tanto a linguagem de programação Python quanto o software OpenDSS e as sintaxes e scripts utilizados para melhor simular o sistema de potência real.

#### **3.2 Linguagem Python**

A fim de simular centenas de casos, cada um isolando variáveis para melhor entender seus impactos individualmente, fazer manualmente resulta em um processo que levaria dezenas de horas, por isso precisamos de um programa para rodar o simulador OpenDSS dentro de um laço e dessa forma simular de maneira otimizada.

O Python foi escolhido para realizar essa tarefa por possuir um API de integração com o OpenDSS e ser uma linguagem de programação de alto-nível, ou seja, de fácil entendimento do código. O Python também é amplamente adotado por ser um software aberto, além de não precisar de licença para seu uso, diferente de outras linguagens que serviriam para esse processo, como o Matlab.

#### **3.3 Open Distribution Simulator (OpenDSS)**

O software OpenDSS é uma ferramenta de simulação com foco na área de distribuição de energia elétrica (SEXAUER, 2016). O software é grátis e pode ser modificado. Até empresas que não o utilizam diretamente, usam a arquitetura de base aberta podendo modificar o programa. O software foi adquirido pela Electric Power Research Institute (EPRI) que o adquiriu em 2004 com objetivo de manter a licença de código aberto.

Ele pode ser utilizado com sua versão Component Object Model (COM) e como um servidor implementado a partir de uma Dynamic Link Library (DLL). Nesse projeto será utilizado o Python com programação orientada a objeto.

#### **3.4 Sintaxe e programação do OpenDSS**

O software tem sua própria linguagem de programação e definição do circuito a ser simulado. Os principais Sintaxes serão apresentados e discutidos a seguir, alguns exemplos de sintaxe estão presentes na tabela 1.

Toda linha de texto equivale a um comando, exceto quando presente um (~) que indica uma quebra de linha para códigos mais complexos e extensos. Nessa linha de código temos um verbo seguido de seus parâmetros que o modificam.

Tabela 1 - Sintaxe

Verbo	Descrição
New	Cria um novo elemento de circuito
Edit	Edita um elemento de circuito escolhido
Set	Define as opções de solução como, por exemplo, <i>Mode</i>
Solve	Realiza a solução do circuito definido
Show	Apresenta relatórios de resultados em arquivos *.txt
Export	Salva relatórios de resultados em arquivos *.csv
Plot	Plota os resultados do fluxo de potência no circuito

Fonte: Sexauer (2016)

### 3.4.1 Elemento Circuit

Toda simulação começa com a declaração de um novo circuito. Nele é representado o equivalente Thévenin quando visto pela transmissão a jusante. Ele é o ponto inicial do circuito. Nele declaramos sua impedância de sequência positiva e zero, e sua tensão em PU. Caso não seja declarado, o software assume um circuito de 60Hz, assim como sua tensão de base pode ser definida quando realizado o fluxo de potência.

Por simplicidade consideramos uma impedância de Thévenin bem próxima de zero, criando para o circuito o que seria um barramento próximo do infinito, onde não vai haver queda de tensão.

- r1: Resistência de sequência positiva em PU;
- x1: Reatância de sequência positiva em P.U;
- r0: Resistência de sequência zero em P.U;
- x0: Reatância de sequência zero em P.U.



Figura 5 - New Circuit

```
New Circuit.IEEE8500
! Make the source stiff with small impedance
~ pu=1.05  r1=0  x1=0.001  r0=0  x0=0.001
```

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.4.2 Parâmetros Linecode e Line

Linecode permite ao OpenDSS dados exatos do cabo para simulação, pode ser definido de diversas maneiras, como as matrizes de impedância R e X ou dando as informações para o que o programa realize esse cálculo. Características do material utilizado foram fornecidas ao programa, dessa forma, ele irá realizar o cálculo das matrizes internamente. Mostrado na Figura 6.

- nphases: Número de fases;
- r1: Resistência de sequência positiva;
- x1: Reatância de sequência positiva;
- r0: Resistência de sequência zero;
- x0: Reatância de sequência zero;
- c1: Capacitância de sequência positiva;
- c0: Capacitância de sequência zero;
- units: Unidade distância, foi usado Quilômetro (km);
- baseFreq: Frequência da linha em Hz;
- normamps: Valor máximo de corrente.

Figura 6 - Linecode

```
New Linecode.3-1/0C_2/0CN_T  nphases=3  r1=0.3  x1=0.4  r0=0.5
~  x0=1.2  c1=10.4  c0=4.4  units=km  baseFreq=60  normamps=310
```

Fonte: Elaborada pelo autor

O elemento Line define o tamanho da linha e onde ela está ligada eletricamente a seus determinados BUS. O linecode junto ao line ditam características físicas do cabo e sua geometria. A Figura 7 exemplifica o código.

Figura 7 - Line

```
New Line.LN5502549-1 bus1=M1009763.2 bus2=L2673322.2
~ length=0.032175613 units=km Linecode=1PH-x4_ACSRx4_ACSRa
```

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.4.3 Elemento Transformer

Elemento que corresponde aos transformadores que são empregados na rede. Nele definimos características dos nossos transformadores.

- phases: Número de fases;
- windings: Número de enrolamentos;
- busses: Qual barras ele será conectado;
- Conns: Conexão dos transformadores, delta (delta) ou estrela (wye);
- kvs: Tensão nos enrolamentos;
- kva: Potência do transformador;
- xhl: Reatância em pu dos transformadores;
- wdg: enrolamento;
- %R: Resistência ôhmica em pu dos enrolamentos;
- subname: Nome dado ao trafo.

Figura 8 - Transformador

```
New Transformer.HVMV_Sub phases=3 windings=2
~ busses=(HVMV_Sub_HSB, regxfmr_HVMV_Sub_LSB.1.2.3.0)
~ conns=(delta wye)
~ kvs=(115, 12.47) kvas=(27500, 27500)
~ xhl=15.51 sub=y subname=HVMV_Sub
~ wdg=1 %r=0.67202
~ wdg=2 %r=0.67202
```

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.4.4 Elemento Load

O elemento de carga é extremamente versátil no modo de configurar. No projeto deste trabalho foi definido a utilização de cargas constantes que obedecem uma curva de consumo chamada Loadshape. Nessa carga definimos as potências em kW e kVAR, ao invés de simplesmente definir o FP, também tensão e o modelo. O Model permite configurar de diversas maneiras, para diminuir o número de variáveis foram definidas as potências ativa e reativa como constantes ao invés de impedância constante. Isso garante que a potência definida no código sempre será consumida.

### 3.4.5 Elemento PVsystem

Elemento que representa os geradores fotovoltaicos que inclui o conjunto do painel e do inversor. Nele podemos adicionar várias curvas que representam diferentes fatores que variam durante o dia. Ele é configurado levando em conta a temperatura no painel durante o dia, a eficiência ligada a temperatura, eficiência do inversor e incidência solar. Todos esses critérios nos permitem simular de maneira mais exata para refletir melhor a realidade.

Figura 9 - Pvsystem

```
New PVSystem.PV1 phases=3 bus1=trafo_pv1 kV=0.48 irrads=.98 Pmpp=2450 temperature=25
~ PF=1 %cutin=0.1 %cutout=0.1 effcurve=Myeff P-TCurve=MyPvsT Daily=MyIrrad TDaily=MyTemp
```

Fonte: Elaborada pelo autor

## 4. SIMULAÇÃO DOS IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA

### 4.1 Introdução

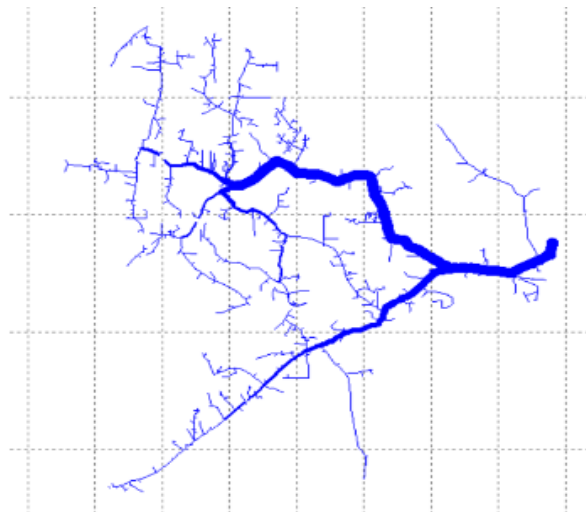
Neste capítulo será discutido o circuito simulado e suas principais características e justificativa. Vamos analisar os impactos da penetração da potência das GDs em um ponto do circuito a fim de simular seus benefícios para o perfil de tensão, perdas técnicas da rede e corrente de curto-circuito.

### 4.2 Circuito simulado

O software OpenDSS vem com diversos exemplos de casos de diferentes complexidades, todos disponibilizados pela IEEE. Foi escolhido o IEEE-8500-nodes, mostrado na figura 10, um circuito complexo e extenso de média tensão. Ele tem diversos reguladores, bancos de capacitores, linhas com diferentes valores de corrente e cargas que simulam muito bem a complexidade da realidade, sem se perder em peculiaridades características de cada região, tendo um caso de estudo complexo e geral. Porém é importante citar que esse trabalho simula uma rede baseada no modelo dos Estados Unidos e a rede brasileira é baseada no modelo europeu, e existem diferenças entre as duas.

O alimentador 8500 nodes, como o nome descreve, tem 8531 nós de conexão, 6103 dispositivos elétricos e 4876 barras. Ele apresenta uma distribuição radial, muito característico de nossa distribuição de média tensão.

Figura 10 - Fluxo de potência 8500-nodes



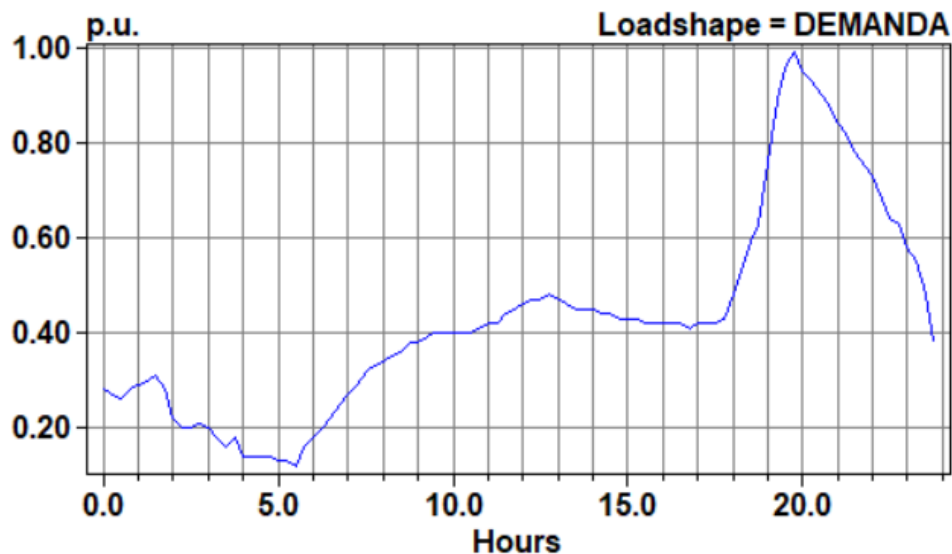
Fonte: Elaborada pelo autor

### 4.3 Simulação inicial do sistema sem a introdução da GD

É necessário conhecimento das condições iniciais da simulação do sistema sem a GD inicialmente instalada para comparação dos impactos da GD. Para isolar o número de variáveis foi desligado o uso dos bancos de capacitores e reguladores de tensão, pois sua presença tentando regular a linha dentro dos padrões pode mascarar os impactos, tanto positivos quanto negativos, da GD quando inserida na rede.

Foi simulado o circuito durante 24 horas, utilizado de uma curva de carga da figura 11, que representa a curva de carga típica, como informa o Sistema Integrado Nacional (SIN) do consumidor residencial (EPE, 2020).

Figura 11 - Curva de carga típica residencial



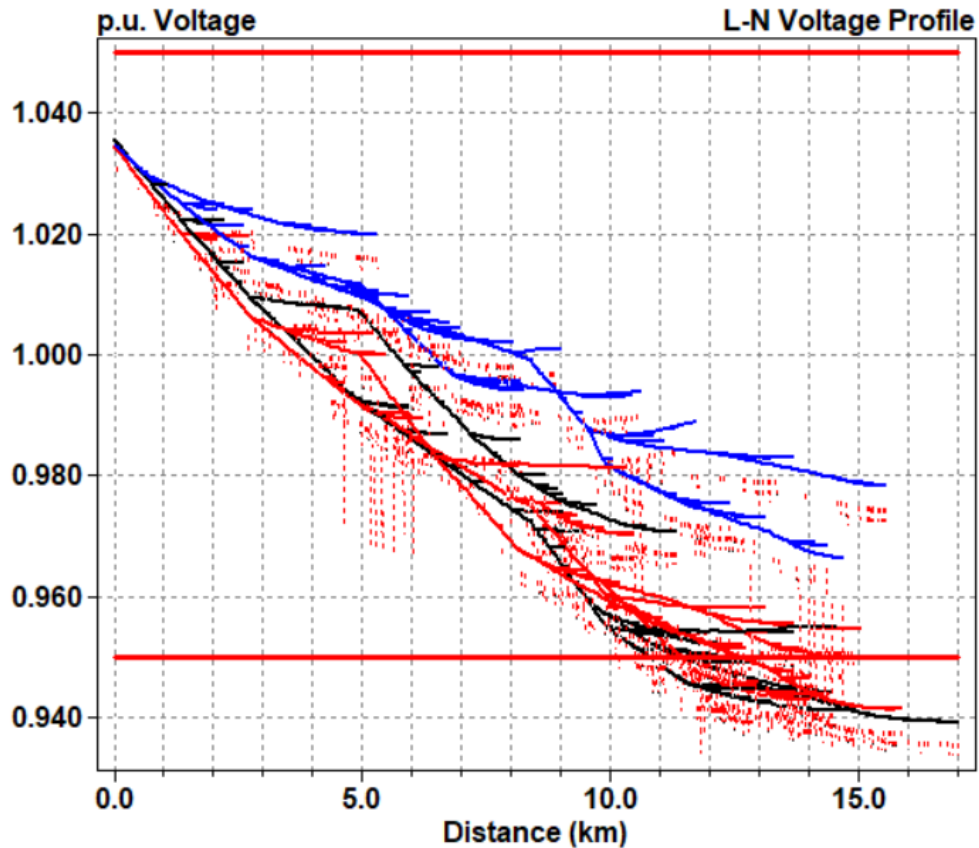
Fonte: Elaborada pelo autor

A função Summary do software nos dá as informações resumidas da resolução do fluxo de potência. O OpenDSS convergiu com 13 interações do fluxo de potência, tendo que realizar 3 interações de controle, que consiste no ajuste dos TAPs dos transformadores.

Com essas condições descritas na Figura 12, foi obtido o seguinte perfil de tensão da rede e sua queda de tensão com a distância. Conseguimos notar que a partir do quilômetro 11 temos tensões abaixo dos valores permitidos pela norma. Esses valores são corrigidos geralmente por reguladores de tensão que são instalados na

rede. Porém com a popularização das GDs, e a injeção de potência na rede a queda de tensão não é mais tão severa.

Figura 12 - Perfil de tensão por distância



Fonte: Elaborada pelo autor

Já as correntes de curto-circuito têm os valores mostrados na tabela 2, eles foram feitos utilizando o comando *set mode= faultstudy*.

Tabela 2 - Correntes de curto-circuito

Barra	C.C. 3F (A)	C.C. 1F (A)	C.C. L-L (A)
E192860	7124	7493	6173
M1069513	1767	1204	1548

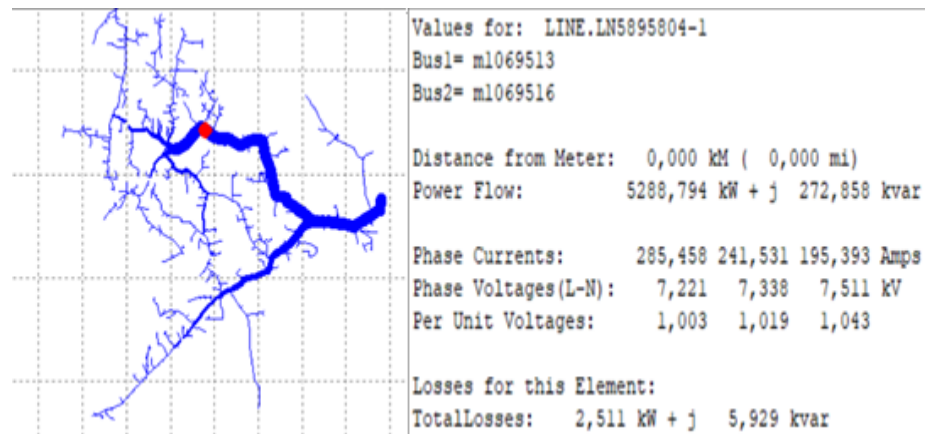
Fonte: Elaborada pelo autor

## 4.4 Introdução da Geração Fotovoltaica

### 4.4.1 Local escolhido

Foi escolhido um local arbitrariamente para introdução de nossa GD fotovoltaica, o local foi escolhido por ser relativamente longe da fonte e ter muitas cargas a jusante e a montante. O local foi marcado de vermelho e se trata da barra **M1069513** como mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Local da GD instalada



Fonte: Elaborada pelo autor

Os dados da Figura 13 nos mostram que a linha LN5895804-1 conectada a essa barra passa uma potência de 5288,794 kW +j 272,858 kvar, com o FP de 0,998, quase unitário.

### 4.4.2 Objetivos a serem observados com a GD

A GD fotovoltaica foi inserida à rede alterando seu valor de potência gradativamente, com o objetivo de entender os impactos gerados e a melhoria no perfil de tensão. Elementos de controles foram levados em consideração e desligados a fim de regular os valores de tensão que acabam por ofuscar o impacto da GD.

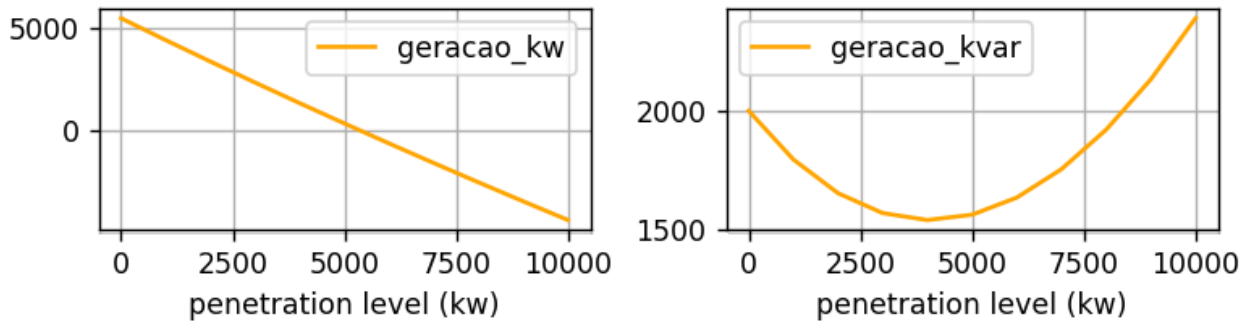
É preciso analisar o perfil de tensão com aumento da penetração das GDs, valores de curto-circuito se houver mudança significativa nos valores e quais as perdas técnicas por injeção de potência reativa na linha pela fonte.

A simulação foi realizada no horário de 12 horas, quando a incidência solar é máxima e a carga nominal consumida é cerca de 0,43 pu da nominal, tendo assim a maior disparidade entre consumo e produção.

#### 4.4.3 Resultado da simulação

Utilizando laço no Python foi simulado 100 vezes o circuito, automaticamente subindo o valor de penetração da GD a cada interação, que representa várias unidades conectadas àquele mesmo ponto elétrico. Usando as ferramentas dos pacotes matemáticos do Python gráficos para melhor observar as mudanças foram criadas.

Figura 14 - Curva de penetração vs geração

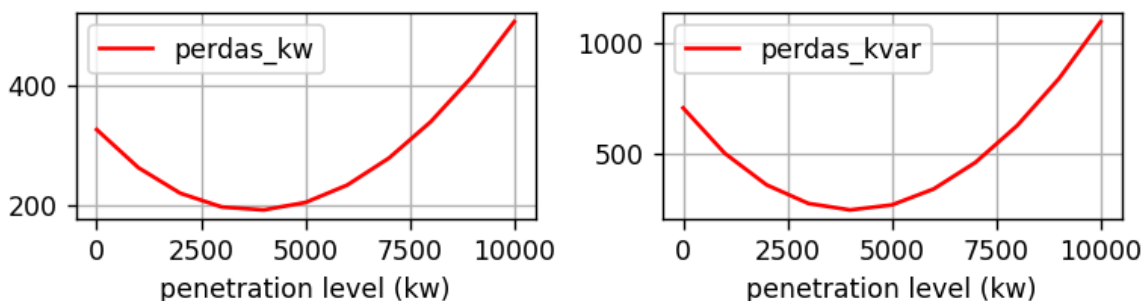


Fonte: Elaborada pelo autor

No gráfico da figura 14, é possível observar uma redução da potência demandada pelo alimentador, chegando a zero e tendo o comportamento de ficar negativo quando cruza justamente o valor de potência que passa pelo cabo na Figura 13, esse valor negativo indica a presença de fluxo reverso, onde a GD começa a alimentar cargas a montante.

No segundo gráfico da figura 14, nota-se que existe um ganho inicial no valor da geração de potência reativa KVAR, porém, para valores altíssimos de geração FV observa-se que agora para manter o FP e para alimentar máquinas que necessitam de potência reativa a fonte passa a ter que produzir quase que exclusivamente reativa.

Figura 15 - Curva de penetração vs perdas

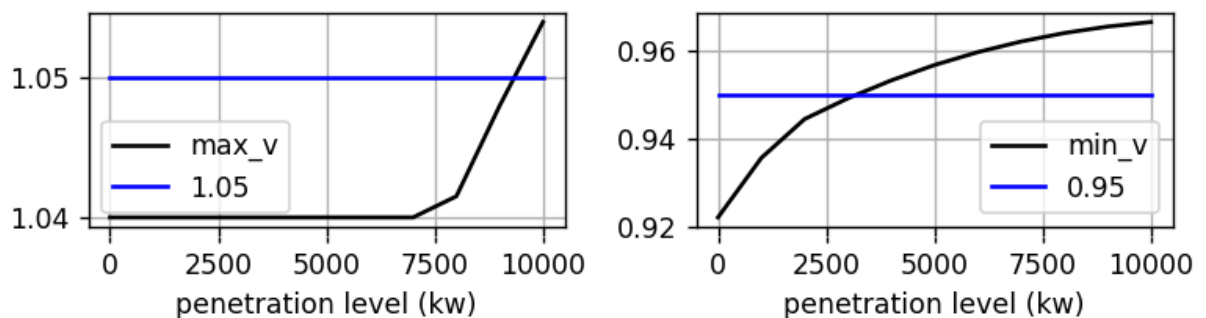


Fonte: Elaborada pelo autor



Os gráficos presentes na figura 15 estão mostrando as perdas técnicas na rede, em kW e kVAR respectivamente, eles nos mostram que existe uma melhora nas perdas técnicas com a instalação das GD até certo ponto, quando ocorre o fenômeno de fluxo reverso nos condutores, as perdas técnicas começam aparecer nos cabos. Valores de corrente maiores do que os cabos projetados começam a causar essas perdas. Na lógica atual, os cabos vão reduzindo a sua seção transversal à medida que a rede vai se derivando.

Figura 16 - Curva de Penetração vs valor de tensão em PU



Fonte: Elaborada pelo autor

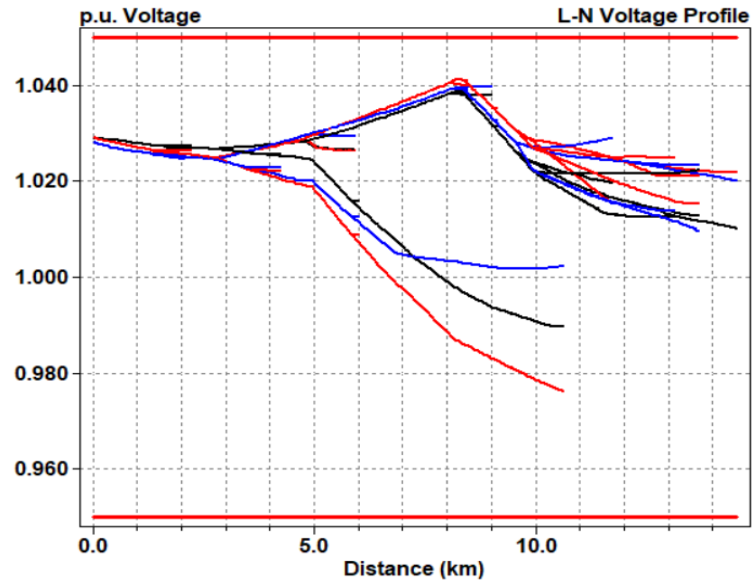
Já os gráficos da figura 16 mostram o impacto na linha com o maior e menor valor de PU de todo o circuito, respectivamente. Novamente observa-se que existem valores ideais para a rede projetada, que ainda não está preparada para um futuro em que quase toda residência terá geração distribuída de alguma forma ou até mesmo veículos elétricos.

#### 4.4.4 Perfil de tensão

Foi gerado um perfil de tensão para cada uma das 100 simulações. Não cabem todos os perfis neste trabalho, porém é exemplificado para o valor ideal de menor perda e o de maior valor de penetração.

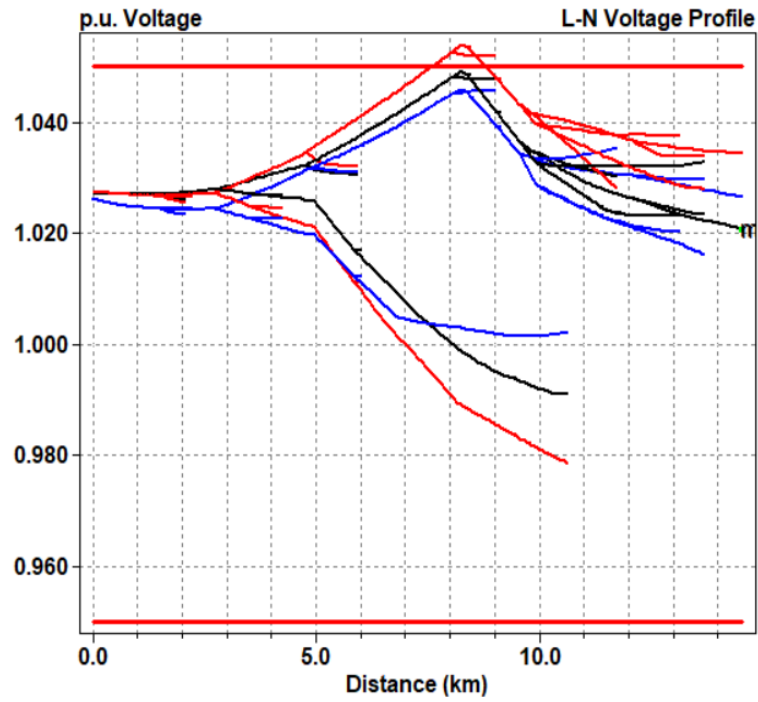
Pode-se observar uma melhora da curva em PU, com todos os valores confortáveis dentro da faixa estipulada quando o valor de penetração da GD é de 3800 kW. Já para valores de 10000 kW apresentados no perfil da Figura 16, nota-se que pontos passam dos valores estipulados de segurança, comparado com a figura 15 na qual existe um comportamento ideal, dentro da faixa estipulada.

Figura 17 - Perfil ideal



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 18 - Perfil não ideal



Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.4.5 Nova Corrente de Curto-Circuito

Com a injeção das GDs no valor potência de 3800 kW na rede observa-se uma mudança significativa nas correntes de curto-circuito, o que requer uma mudança na proteção de toda rede. A barra do alimentador teve mudança de até 7,19% enquanto a barra onde a GD se conecta teve mudança de até 70% de seu valor.

Tabela 3 - Correntes de curto-circuito para penetração de 3800 kW

Barra	C.C. 3F (A)	C.C. 1F (A)	C.C. L-L (A)
E192860	7636 (+7,19%)	7932 (+5,86%)	6614 (+7,14%)
M1069513	2585 (+46,29%)	2035 (+69,02%)	2249 (+45,28%)

Fonte: Elaborada pelo autor

## 5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusão

Neste trabalho foram feitas simulações do circuito 8500-nodes da IEEE, uma rede complexa com diversas cargas e barras. Nele foi implementado através do software OpenDSS com assistência do Python diversas interações de penetração de uma geração distribuída fotovoltaica.

A tendência global para geração de energia elétrica tem como foco as energias renováveis, especialmente a eólica e a solar. A fim de estudar os impactos de um futuro próximo no qual a geração distribuída será uma realidade acessível e comum, necessita-se entender o comportamento da rede com o crescimento da geração distribuída.

As simulações realizadas empregam valores pequenos de penetração até valores altíssimos, o que para os padrões de hoje não é uma realidade. A demanda a jusante do ponto escolhido para injeção da GD é de 5288,794 kW, porém ao meio dia, quando a geração é máxima, somente 42% desse valor sendo demandado da fonte, as perdas técnicas são observadas somente em valores superiores a 3500 kW gerado pela GD. Isso se dá pelo fato do grande valor de fluxo reverso, que alimenta cargas a montante de onde a GD foi instalada, passando corrente por cabos de menor seção transversal que foram planejados para correntes menores, característica de cabos longe do alimentador em uma configuração radial. A equação 2 demonstra as perdas elétricas por efeito Joule, equação que demonstra que tal perda depende do valor de corrente ao quadrado. Ao passar o fluxo reverso de valor maior que o condutor está planejado, ocorre o crescimento de perdas com a característica quadrática demonstrada, excedendo a capacidade de comportamento daquele ponto na rede.

O trabalho demonstra a necessidade de preparar-se para o futuro que caminha para a geração renovável. A proliferação de GDs junto ao advento de carros elétricos que podem ser vistos como GD para a rede, quando conectados completamente carregados, nos mostram um futuro onde valores superiores aos limites de onde começam a existir perdas, são uma realidade. Porém, esses casos extremos de fluxo reverso e perdas por excesso de corrente reativa só aconteceriam se não houvesse mudança na filosofia da rede e ela não fosse atualizada.

Através das centenas interações que foram feitas pelo OpenDSS observa-se que a rede hoje está preparada somente para receber níveis razoáveis de GD. A necessidade de atualização da rede, recondutoramento de cabos e mudança na filosofia de proteção se torna necessário. Todas essas atividades para atualização da rede são oportunidades para o engenheiro electricista atuar e com seu conhecimento traçar a melhor solução para o problema.

Observou-se também a versatilidade do software OpenDSS para simular diversos casos o mais próximo possível da realidade. É uma ferramenta poderosa com o código aberto que permite a ferramenta ser afinada cada vez mais por estudantes e programadores interessados nos estudos das redes de distribuição, o que justifica sua ampla utilização.

## **5.2 Trabalhos Futuros**

Futuros trabalhos com o tema abordado neste estudo são apresentados a seguir:

- Introdução das funções inteligentes dos inversores para correção do fator de potência já na GD, é implementado a sua curva ideal pela função VoltVar do OpenDSS.
- Implementação das funções inteligentes da smart grid para implementar a correção do FP dos bancos de capacitores junto às GDs pelo CapControl.
- Estudo do impacto de como a intermitência da GD afeta o controle de tensão pelos TAPs dos transformadores e reguladores.

## REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **Energia solar fotovoltaica ultrapassará a marca de 3.000 megawatts no Brasil em 2019.** Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-fotovoltaica-ultrapassara-a-marca-de-3-000-megawatts-no-brasil-em-2019/>>. Acesso em: 18 jun. 2023.

ANEEL. Micro e Minigeração Distribuída Sistemas de Compensação de Energia Elétrica. **ANEEL**, v. 2, 2016.

ANEEL. PRODIST Module 8 - Quality of Electric Energy . **ANEEL**, 2019.

ANEEL, A. N. DE E. E. **AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA-ANEEL RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.000, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021.** [s.l: s.n.].

BARBOSA FILHO, W. P.; SOARES DE AZEVEDO, A. C. Geração Distribuída: vantagens e desvantagens. **Anais de Artigos do Simpósio de Estudos e Pesquisas em Ciências Ambientais na Amazônia**, v. II, n. II, p. 126–135, 19 nov. 2013.

BEN. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2021: Ano base 2020.** Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>.

BORDIM, J. R. G. Instalação de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica para Correção de Fator de Potência e Regulação. **Universidade Federal de Santa Catarina**, 2019.

CARVALHO, E. O. P. DE et al. **O Problema de Restabelecimento da Energia em Sistemas de Distribuição Radiais Considerando as Restrições de Proteção.** Proceedings do XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. **Anais...SBA Sociedade Brasileira de Automática**, 2021

FONTINELE DOS SANTOS, C. M.; PEREIRA LOBO, M.; MARTINS DE CARVALHO, S. Mudanças climáticas atuais e o futuro da vida no planeta. **Journal of Mathematics and**

**Physics**, v. 03, p. 1–17, 2021.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Metodologia: projeção de curva de carga horária**. Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2020

GUSMAN, L. S. **Design for Reliability of Multifunctional PV Inverters used in Industrial Power Factor Regulation**. Belo Horizonte: [s.n.].

IBRAHIM, N. I.; OMER, M. M. B. E. The Effect of Wavelength of Light on Solar Electrical Performance. **American Society of Mechanical Engineers, Power Division (Publication) POWER**, v. 2020- August, 13 out. 2020.

MAMEDE, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 7. ed. Fortaleza: LTC EDITORA, 2003.

OLIVEIRA, J. H. DE et al. Impact of integrating a Photovoltaic Power Plant in a Distribution Feeder. **17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)**, p. 842–847, 2016.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Edição Revisada ed. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014.

SEXAUER, J. **Introdução ao OpenDSS**. [s.l.] Eletric Power Research Institute, 2016.

WATANABE, K. Ultraviolet Absorption Processes in the Upper Atmosphere. **Advances in Geophysics**, v. 5, n. C, p. 153–221, 1 jan. 1958.

WEISS, M. **Como o desenvolvimento econômico impactou nos padrões de consumo de energia das famílias brasileiras entre 2002 e 2008?** Disponível em: <<https://ensaioenergetico.com.br/como-o-desenvolvimento-economico-impactou-nos-padroes-de-consumo-de-energia-das-familias-brasileiras-entre-2002-e-2008/>>. Acesso em: 18 jun. 2023.

## ANEXO A – SCRIPT DO PYTHON UTILIZADO PARA FAZER O LOOP

O código apresentado abaixo foi feito no Python. Esse Loop foi feito para realizar 100 interações automaticamente.

```

1  import py_dss_interface
2  import pandas as pd
3  import matplotlib.pyplot as plt
4
5  circuito_pu = 1.04
6  carga_12h = 0.43
7  #####
8
9  def process(penetracao_kw):
10
11     dss.text(f"New PVSystem.PV1 phases=3 bus1=13104830 kV=12.47 irrads=98 Pmpp=(
penetracao_kw) temperature=25 PF=1 %cutin=0.1 %cutout=0.1 effcurve=Myeff
P-TCurve=MyPvsT Daily=MyIrrad TDaily=MyTemp !default for inverter is unity PF")
12     #dss.text(f"New generator.gen phase=3 bus1=13104830 kv=12.47 pf=1
kw={penetracao_kw}")
13     #dss.text(f"New generator.gen phase=3 bus1=m1069513 kv=12.47 pf=1
kw={penetracao_kw}")
14     dss.solution_solve()
15     # dss.text(f"Show Meters")
16     dss.text("plot profile")
17     # store
18     valor_pot_p = -1 * dss.circuit_total_power()[0]
19     valor_pot_q = -1 * dss.circuit_total_power()[1]
20     perdas_kw = dss.circuit_losses()[0] / 10 ** 3
21     perdas_kvar = dss.circuit_losses()[1] / 10 ** 3
22     voltages = dss.circuit_all_bus_vmag_pu()
23     voltage_max = max(voltages)
24     voltage_min = min(voltages)
25     # retorna
26     return valor_pot_p, valor_pot_q, perdas_kw, perdas_kvar, voltage_max, voltage_min
27
28 dss_file = r"C:\Users\User\Desktop\8500-Node GG\Master_original.dss"
29 dss = py_dss_interface.DSSDLL()
30 #####
31
32
33 penetracao_kw_list = [penetracao * 100 for penetracao in range (0, 101)]
34
35 valor_pot_p = list()
36 valor_pot_q = list()
37 perdas_kw = list()
38 perdas_kvar = list()
39 voltage_max = list()
40 voltage_min = list()
41
42 for penetracao_kw in penetracao_kw_list:
43     results = process(penetracao_kw)
44
45     valor_pot_p.append(results[0])
46     valor_pot_q.append(results[1])
47     perdas_kw.append(results[2])
48     perdas_kvar.append(results[3])
49     voltage_max.append(results[4])
50     voltage_min.append(results[5])
51
52 dss.text("plot profile")
53
54 dict_to_df = dict()
55 dict_to_df["penetracao_kw"] = penetracao_kw_list
56 dict_to_df["geracao_kw"] = valor_pot_p
57 dict_to_df["geracao_kvar"] = valor_pot_q
58 dict_to_df["perdas_kw"] = perdas_kw
59 dict_to_df["perdas_kvar"] = perdas_kvar
60 dict_to_df["max_v"] = voltage_max
61 dict_to_df["min_v"] = voltage_min
62
63 df = pd.DataFrame().from_dict(dict_to_df)
64
65 fig, axes = plt.subplots(nrows=3, ncols=2, sharex=True)
66

```



```

68 axes[0, 1].plot(df["penetracao_kw"], df["geracao_kvar"], color="orange", label=
    "geracao kvar")
69 axes[1, 0].plot(df["penetracao_kw"], df["perdas_kw"], color="red", label="perdas_kw")
70 axes[1, 1].plot(df["penetracao_kw"], df["perdas_kvar"], color="red", label=
    "perdas kvar")
71 axes[2, 0].plot(df["penetracao_kw"], df["max_v"], color="black", label="max v")
72 axes[2, 0].plot((df["penetracao_kw"].min(), df["penetracao_kw"].max()), [1.05, 1.05],
    color="blue", label="1.05")
73 axes[2, 1].plot(df["penetracao_kw"], df["min_v"], color="black", label="min v")
74 axes[2, 1].plot((df["penetracao_kw"].min(), df["penetracao_kw"].max()), [0.95, 0.95],
    color="blue", label="0.95")
75
76 for ax_row in axes:
77     for ax in ax_row:
78         ax.set_xlabel("penetracao level (kw)")
79         ax.legend()
80         ax.grid(True)
81
82 fig.tight_layout()
83 plt.show()
..

```

Fonte: Elaborada pelo autor