

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

IKARO TELES BEZERRA DOS SANTOS BARRETO

ANÁLISE DAS IMPLICAÇÕES DO USO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA  
REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Rio Largo, AL

2023

IKARO TELES BEZERRA DOS SANTOS BARRETO

**ANÁLISE DAS IMPLICAÇÕES DO USO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA  
NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Alagoas, Campus CECA, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientadora: Profa. Dra. Jamile Pinheiro Nascimento Amoah.

Coorientadora: Profa. Dra. Alana Kelly Xavier de Barros Branco.

Rio Largo, AL

2023

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias**  
Bibliotecária Responsável: Myrtes Vieira do Nascimento

B273a Barreto, Ikaro Teles Bezerra dos Santos

Análise das implicações do uso da energia solar fotovoltaica na rede de distribuição. / Ikaro Teles Bezerra dos Santos Barreto – 2023. 61 f.; il.

Monografia de Graduação em Engenharia de Energias (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Alagoas, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias. Rio Largo, 2023.

Orientação: Dra. Jamile Pinheiro Nascimento Amoah  
Coorientação: Alana Kelly Xavier de Barros Branco

Inclui bibliografia

1. Energia solar. 2. Geração de energia. 3. Sistema elétrico de potência. I. Título.

CDU: 620.91

## Folha de Aprovação

IKARO TELES BEZERRA DOS SANTOS BARRETO

Análise das implicações do uso da energia solar fotovoltaica na rede distribuição

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Energia pela Universidade Federal de Alagoas. Aprovado em 22 de março de 2023.

Documento assinado digitalmente  
 JAMILE PINHEIRO NASCIMENTO AMOAH  
Data: 27/03/2023 13:29:20-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Profa. Dra. Jamile Pinheiro Nascimento Amoah, CECA/UFAL (Orientadora)

*Alana Kelly X. de B. Branco*  
SIAPC: 3915094

---

Prof. Dra. Alana Kelly Xavier de Barros Branco, CECA/UFAL (Coorientadora)

### Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 LEONARDO FAUSTINO LACERDA DE SOUZA  
Data: 27/03/2023 13:24:13-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Leonardo Faustino Lacerda de Souza, CECA/UFAL (1ª Avaliador)

Documento assinado digitalmente  
 WELLINSILVIO COSTA DOS SANTOS  
Data: 27/03/2023 14:04:48-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Wellinsílvio Costa dos Santos, CTEC/UFAL (2º Avaliador)

## **AGRADECIMENTOS**

Não foi uma jornada fácil, muito menos tranquila, mas felizmente ao longo do percurso pude contar com diversas pessoas.

Agradeço inicialmente aos meus pais, Gicêlde e Sérgio, pela dedicação para que eu obtivesse o privilégio de alcançar a educação superior.

Aos meus amigos pelo apoio e companheirismo nas intermináveis horas de estudo, momentos de distração e suporte emocional. Em especial Joyce, Vitória, Tamara, João A., Willy e Dinho, sem vocês a caminhada teria sido mais difícil.

Agradeço também a todos que fazem parte da Fort3 Solar, pela confiança e aprendizado proporcionado desde o início do estágio quando estava no terceiro período e à contratação.

Por fim, direciono meus agradecimentos à instituição Universidade Federal de Alagoas, coordenação e docência do curso de Engenharia de Energia, em especial a minha orientadora, a professora Dra. Jamile, pela confiança, suporte e disponibilidade e também a professora Dra. Alana por aceitar participar na coorientação.

## RESUMO

Devido ao aumento no consumo de energia, como também o aumento das tarifas cobradas pelas concessionárias de energia, os consumidores têm buscado alternativas, como a energia solar fotovoltaica, fazendo com que se tornem prosumidores, pois estão produzindo parte da energia que consomem. Embora exista uma infinidade de benefícios da geração distribuída, no caso da geração fotovoltaica, existem algumas situações e fatores que fazem com que ela provoque problemas no sistema de distribuição de energia elétrica, dentre eles a sobretensão, quando há um grande volume de instalações numa mesma área. Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar os impactos que a operação dos sistemas de geração de energia fotovoltaica pode ocasionar nas redes de distribuição, a partir de simulações na rede de 13 barras do *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE), por meio do *Open Distribution System Simulator* (*OpenDSS*). Por fim, comparando os valores obtidos com os parâmetros de qualidade de energia estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Os resultados mostraram como curva de cada barra se comporta nos cenários propostos para o sistema teste, o quanto a tensão se elevou e, ao comparar os valores tabelados no módulo 8 do PRODIST a tensão alcançou níveis críticos.

**Palavras-chaves:** Geração Distribuída. Energia Solar Fotovoltaica e Impacto no Sistema Elétrico de Potência. Sobretensão por Fluxo Reverso de Potência. *OpenDSS*.

## **ABSTRACT**

Due to the increase in energy consumption, as well as the increase in tariffs charged by energy concessionaires, consumers have been looking for alternatives, such as photovoltaic solar energy, making them become prosumers, as they are producing part of the energy they consume. Although there are countless benefits of distributed generation, in the case of photovoltaic generation, there are some situations and factors that cause it to cause problems in the electricity distribution system, including overvoltage, when there is a large volume of installations in the same area. Given the above, the present work aimed to evaluate the impacts that the operation of photovoltaic energy generation systems can cause in the distribution networks, based on simulations in the 13-bus network of the Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), through the Open Distribution System Simulator (OpenDSS). Finally, comparing the values obtained with the energy quality parameters established by the National Electric Energy Agency (ANEEL). The results showed how the curve of each bus behaves in the proposed scenarios for the test system, how much the voltage has increased and, when comparing the tabled values in module 8 of PRODIST, the voltage has reached critical levels.

**Keywords:** Distributed Generation. Photovoltaic Solar Energy and Impact on the Electrical Power System. Reverse Power Flow Overvoltage. OpenDSS.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do Sistema Elétrico de Potência .....	17
Figura 2 - Torres de transmissão de energia elétrica .....	18
Figura 3 – Esquema da Transmissão de Energia até a Distribuição para consumidores Primários e Secundários .....	19
Figura 4 - Representação das linhas de Média e Baixa tensão nos postes de distribuição de energia .....	20
Figura 5 - Demonstração da estrutura de Geração Centralizada e a Geração Distribuída .....	21
Figura 6 – Comportamento do Fluxo Reverso de Potência .....	23
Figura 7 – Operação do Sistema Fotovoltaico e conexão com a Rede de Distribuição .....	25
Figura 8 – Representação dos tipos de fluxo de energia do alimentador: (a) tradicional e (b) reverso .....	25
Figura 9 – Fluxograma da Metodologia Proposta .....	29
Figura 10 – Ilustração do Circuito de 13 Barras IEEE .....	32
Figura 11 – Representação gráfica do Perfil de Tensão no sistema de 13 barras IEEE .....	34
Figura 12 – Curvas das Cargas Residenciais e Industriais em um dia .....	36
Figura 13 - Modelo do Sistema Fotovoltaico .....	38
Figura 14 – Curva da Temperatura ao longo dia .....	39
Figura 15 - Representação gráfica dos valores de irradiação solar .....	40
Figura 16 – Curva de Tensão barra 671 sem sistema fotovoltaico .....	44
Figura 17 – Curva de Tensão barra 671 com sistema fotovoltaico potência ideal ..44	
Figura 18 – Curva de Tensão barra 671 com sistema fotovoltaico potência com o dobro da ideal .....	45
Figura 19 – Curva da Irradiação Solar .....	46
Figura 20 – Curva de Potência na barra 671 sem sistema fotovoltaico .....	47
Figura 21 – Curva de Potência na barra 671 com sistema fotovoltaico potência ....47	
Figura 22 – Curva de Potência na barra 671 com sistema fotovoltaico com o dobro da potência ideal .....	47
Figura 23 – Curva de Tensão barra 646 sem sistema fotovoltaico .....	49
Figura 24 – Curva de Tensão barra 646 com sistema fotovoltaico potência ideal ..49	

Figura 25 – Curva de Tensão barra 646 com sistema fotovoltaico dobro potência ideal .....	49
Figura 26 – Curva da Potência na barra 646 sem sistema fotovoltaico .....	51
Figura 27 – Curva da Potência na barra 646 com sistema fotovoltaico ideal .....	51
Figura 28 – Curva da Potência na barra 646 com sistema fotovoltaico dobro da potência ideal .....	51
Figura 29 – Curva de Tensão no Transformador sem sistema .....	52
Figura 30 – Curva de Tensão no Transformador com sistema fotovoltaico na potência ideal .....	52
Figura 31 – Curva de Tensão no Transformador com sistema fotovoltaico no dobro da potência ideal.....	53
Figura 32 – Curva de Potência no Transformador sem sistema .....	54
Figura 33 – Curva de Potência no Transformador com sistema fotovoltaico potência ideal .....	54
Figura 34 – Curva de Potência no Transformador com sistema fotovoltaico no dobro da potência ideal .....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de Tensão de Transmissão no Brasil em Corrente Alternada ..	18
Tabela 2 - Solução do Algoritmo Normal (CIM) do OpenDSS. ....	30
Tabela 3 – Elementos do <i>OpenDSS</i> utilizados e suas funcionalidades .....	31
Tabela 4 – Cargas presentes no sistema de 13 barras IEEE .....	32
Tabela 5 - Perfil de Tensão no sistema de 13 barras IEEE .....	33
Tabela 6 – Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV .....	35
Tabela 7 – Adaptação Tabela 2.2 Livro “Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica” .....	36
Tabela 8 – Temperatura ao longo dia .....	39
Tabela 9 – Valores da Irradiação ao longo do dia .....	40
Tabela 10 – Valores da Tensão nas etapas de simulação na barra 671 .....	46
Tabela 11 – Valores da Potência nas etapas de simulação na barra 671 .....	48
Tabela 12 – Valores da Potência nas etapas de simulação na barra 646 .....	50
Tabela 13 – Valores da Potência nas etapas de simulação na barra 646 .....	51
Tabela 14 – Valores da Tensão do Transformador conectado às barras .....	53
Tabela 15 – Valores da Potência do Transformador conectado às barras .....	55

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

GD – Geração Distribuída

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)

LTs - Linhas de Transmissão

*OpenDSS - Open Distribution System Simulator* (Simulador Aberto de Sistema de Distribuição)

Pmpp - Potência nominal no ponto de máxima potência

PRODIST - Regras e Procedimentos de Distribuição

pu - Por Unidade

*PVSystem - Photovoltaic System* (Sistema Fotovoltaico)

SFVs – Sistemas Fotovoltaicos

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
1.1.1 Geral .....	15
1.1.2 Específicos .....	15
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
2.1 Sistema de Transmissão .....	17
2.2 Sistema de Distribuição .....	18
2.3 Geração Distribuída .....	20
2.3.1 Vantagens da Geração Distribuída .....	21
2.3.2 Desvantagens da Geração Distribuída .....	22
2.3.2.1 Fluxo de Potência Reverso .....	23
2.3.2.2 Variações na tensão .....	26
2.3.2.3 Intermitência na geração .....	26
2.3.2.4 Fator de Potência .....	27
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>29</b>
3.1 Escolha do <i>software</i> .....	29
3.1.1 Elementos de Suporte .....	31
3.2 Escolha do Sistema-Teste .....	31
3.3 Análise do Sistema-Teste .....	33
3.4 Caracterização de dados do Sistema Fotovoltaico .....	36
3.5 Conexão do Sistema Fotovoltaico nas Barras 671 e 646 .....	41
3.6 Comparativo das Curvas de Tensão com e sem GD .....	42
3.7 Análise dos Valores .....	42
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>43</b>
4.1 Testes na Barra 671 .....	44
4.2 Testes na Barra 646 .....	48

4.3	Testes no Transformador Principal .....	51
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>56</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>56</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento populacional aliado ao avanço crescente do setor industrial, entre outros fatores, ocasionou a expansão do consumo de energia elétrica em todo o globo. Trazendo para a realidade brasileira, conforme valores apresentados Balanço Energético Nacional da Empresa de Pesquisa Energética (2022), em dezembro de 2021, o consumo nacional foi de 42.937 GWh, o maior valor desde 2004. Essa enorme demanda por energia, aliada às crises no abastecimento de eletricidade pela insuficiência de geração de Energia Hidroelétrica, que ocupa a maior parte na matriz energética brasileira, evidenciou a necessidade de diversificar as fontes de geração de energia.

Os incentivos dos órgãos competentes através da Resolução Normativa ANEEL n.º 482/2012, atualizada posteriormente pela a Resolução Normativa n.º 687/2015, são fatores que contribuíram para a ampliação da utilização de Energia Solar Fotovoltaica por diversos consumidores no Brasil, pois essas resoluções estabeleceram o sistema de compensação de energia elétrica, mas além deles, tiveram também os incentivos das instituições financeiras, como por exemplo, a Caixa Econômica Federal, que passou a oferecer linha de crédito por meio do Construcard, permitindo que clientes comprassem equipamentos de energia solar fotovoltaica para uso residencial (NASCIMENTO, 2017; SILVA, 2015).

Além disso, é possível citar como fator de contribuição, a Isenção de PIS/Cofins, ICMS, PIS/Pasep para a energia que é injetada na rede pelo consumidor. Essa Isenção foi regulamentada pelo Convênio ICMS n.º 16/2015, do Conselho Nacional de Política Fazendária (Confaz), em outubro de 2015 por meio da Lei no 13.169 (PEREIRA, 2019).

Por se tornar uma alternativa de acesso mais facilitado e prático para a população, a energia solar alcançou um crescimento exponencial, com a vantagem também do autoconsumo remoto, em cooperativas e condomínios. Segundo dados do *Power BI* ANEEL (2022), que apresenta os parâmetros da geração distribuída no Brasil desde 13 de dezembro de 2008, em sua atualização no dia 15 de julho de 2022, aponta que o país acumula uma Potência Instalada de 11,63 GW entre 1.106.799

sistemas instalados, enviando créditos de compensação para 1.403.006 Unidades Consumidoras, que se espalham por 5.490 municípios brasileiros.

Estudos de Trevisan (2011) realizam uma abordagem de que fontes renováveis de energia têm impacto sobre a rede elétrica de distribuição convencional, em face do seu modo de operação no qual seus sistemas são originalmente emissores do fluxo potência e, sofrem quando ele se recebe por não serem apropriados para isso. Apesar de que quando se insere pouca potência reversa na rede praticamente não existe impacto, a menos que a rede de distribuição esteja em mau estado, como por exemplo, manutenção ausente, cabos com seção nominal inferior a necessária. No entanto, pela motivação das políticas de incentivo, conscientização ambiental e o avanço tecnológico, as solicitações de acesso às redes das distribuidoras estão crescendo cada vez mais.

Devido a essa visão dos problemas que possivelmente irão ocorrer no sistema elétrico, estão sendo agregadas e buscadas ferramentas para que haja a possibilidade de prever, investigar e classificar o que as variáveis presentes nesses sistemas indicarão. Como por exemplo, uso de *softwares* que sejam capazes de simular a rede e todas as estruturas que estão integradas a ela, incluindo os recursos de geração distribuída. Nesse sentido, o *OpenDSS* vem se mostrando uma boa alternativa pela sua capacidade de manipulação, permitindo construir a rede em frações menores, com isso, pode criar a rede ou para um só alimentador de uma subestação, ou para a rede de toda uma subestação.

A rede de distribuição de energia elétrica do país não apresenta estruturas robustas o suficiente para suportar o crescente aumento do fluxo inverso exigido pelos os sistemas fotovoltaicos, pois possuem os moldes convencionais onde o fluxo de potência ocorre no sentido unidirecional partindo da alta tensão, nas torres de transmissão, para a média e baixa tensão onde serão distribuídas para os pontos de consumo. Portanto, o presente trabalho visou discutir os impactos que a geração distribuída tem ao enviar, em grandes quantidades, o fluxo de potência para a mesma rede, suas principais consequências e simulações que podem demonstrar como acontece na prática.

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1 Geral**

Analisar os impactos que a operação dos sistemas de Geração de Energia, por meio da Fonte Solar Fotovoltaica, pode ocasionar nas redes de distribuição.

### **1.1.2 Específicos**

- Implementar o sistema-teste de 13 barras no padrão do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), como teste para realização da análise em questão.
- Alocar sistemas de energia solar fotovoltaica em duas barras específicas do sistema-teste, para observar seu comportamento nas situações propostas e assim demonstrar o que acontece com a rede ao receber as conexões.
- Constatar se a inserção de sistemas fotovoltaicos acarretam em alterações críticas nos valores normalizados para a Tensão.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Partindo do ponto de reflexão sobre a problemática central do presente trabalho, é de suma importância considerar os efeitos que a inclusão de geração distribuída tem sob o sistema elétrico.

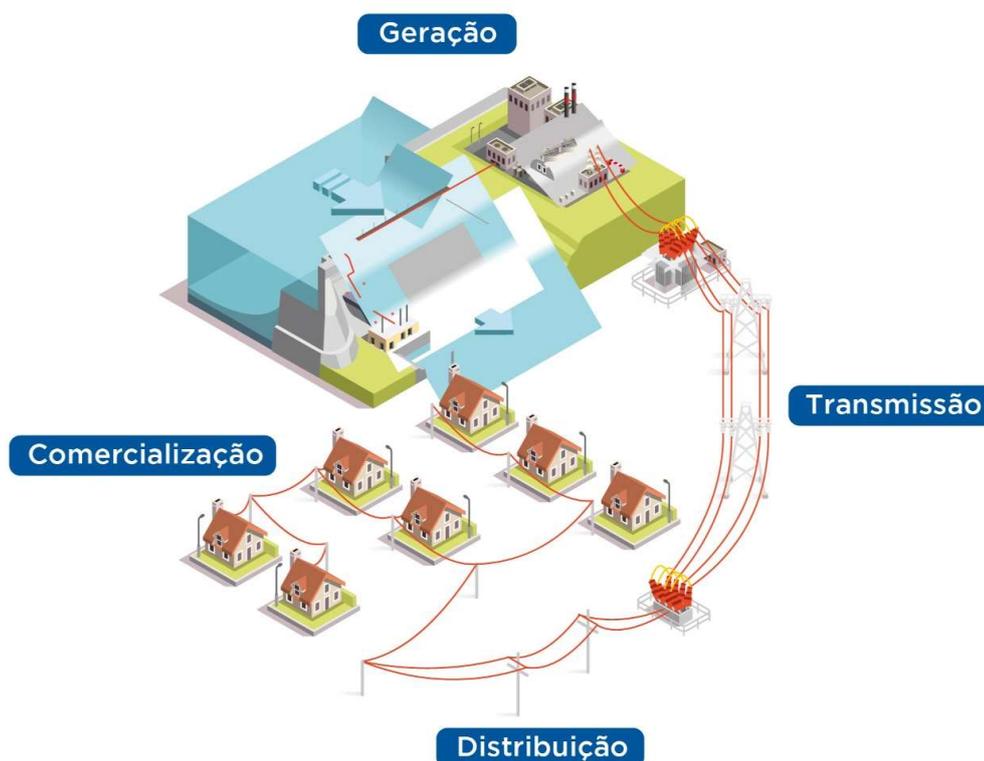
Implicações atingem principalmente a tensão da rede. Uma das situações é quando a demanda de consumo é menor do que a geração que é inserida na rede, o que acarreta num aumento significativo na tensão do barramento, pois o fluxo de potência está invertido.

Entre outros pontos que serão abordados com mais informações a seguir, têm-se a variação de tensão em outras situações, a intermitência de geração que está diretamente ligada às variações da radiação solar e também aos sombreamentos que ocorrem nos módulos fotovoltaicos. Fazendo menção também ao funcionamento do Inversor e suas questões com o fator de potência.

De forma introdutória, é necessário que se fale um pouco sobre os sistemas de transmissão e distribuição que, unidos, conectam os pontos em que a energia das grandes fontes de geração, sendo a principal do país a Hídrica. Na Figura 1 há um esquema que ilustra como funciona o Sistema Elétrico de Potência, percorrendo suas etapas, desde a geração na Usina Hidrelétrica, sendo transmitida passando pelos pontos que realizam as transformações necessárias a fim de atender às condições de distribuição para os consumidores.

Desta mesma forma é válido acrescentar um tópico para discussão da Geração Distribuída, abordando não só os seus benefícios para a natureza e para o funcionamento do sistema elétrico, mas também os seus potenciais malefícios, inclusive a sobretensão que é o objeto de estudo deste trabalho.

**Figura 1** – Estrutura do Sistema Elétrico de Potência.



Fonte: KIMPARA (2014).

## 2.1. Sistema de Transmissão

O Sistema de Transmissão de Energia tem como papel efetuar o transporte da energia elétrica partindo do ponto de geração até os pontos em que ela será distribuída, incluindo neste percurso os pontos de transformação, nas subestações, para que atenda aos níveis aplicados nos ramais das residências consumidoras.

Estes sistemas de transmissão, geralmente, são constituídos de linhas de transmissão, sistemas de proteção, contendo relés, disjuntores, entre outros. Além disso, contam com as subestações, de modo que as linhas de transmissão são constituídas de cabos condutores, de isoladores e ferragens, de torres e de cabos para-raios (TECNOGERA, 2017; FUCHS, 1977).

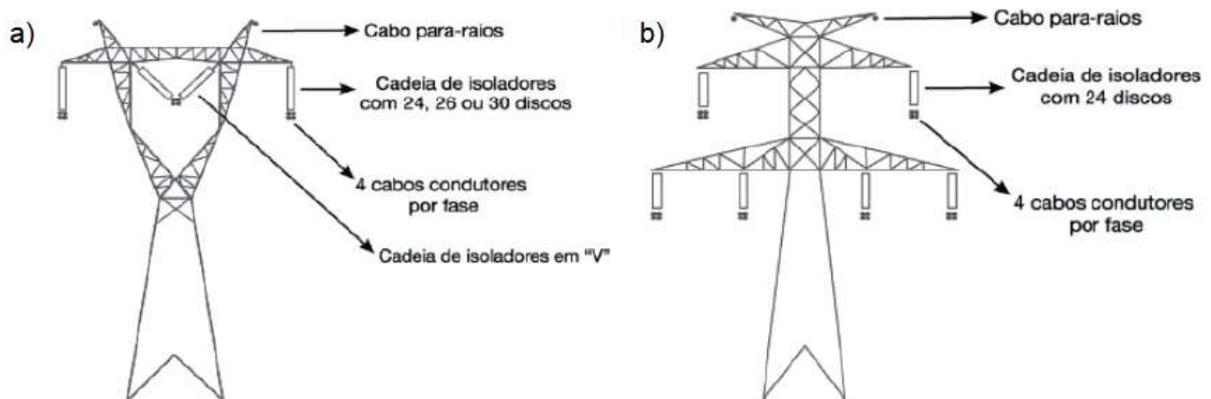
O crescente uso da eletricidade demandou aumento da potência das centrais elétricas, por estarem cada vez mais distantes dos centros de consumo. Este fato exigiu a adoção de tensões cada vez mais elevadas e linhas mais longas, aumentando os problemas (CHIPMAN, 1972; FUCHS, 1979).

**Tabela 1** - Valores de Tensão de Transmissão no Brasil em Corrente Alternada.

Tipo	Valores (kV)
Alta Tensão	138 e 230
Extra Alta Tensão	345, 440 e 500
Ultra Alta Tensão	765, acima de 750 kV

Fonte: KIMPARA (2014).

Os valores das tensões sofrem elevação para valores que sejam compatíveis para o melhor atendimento aos valores dos equipamentos que condicionam e transportam a energia, e custo das perdas elétricas envolvidas de acordo com a associação da Lei de Ohm. A Figura 2 mostra duas torres de transmissão de energia elétrica, a indicada por (a) é da configuração de Circuito Simples, cadeia “IVI” e (b) é da configuração Circuito Duplo Triangular.

**Figura 2** - Torres de transmissão de energia elétrica (a) Circuito Simples, cadeia “IVI” e (b) Circuito Duplo Triangular.

Fonte: Adaptada de Pinto (2014, p. 82-87).

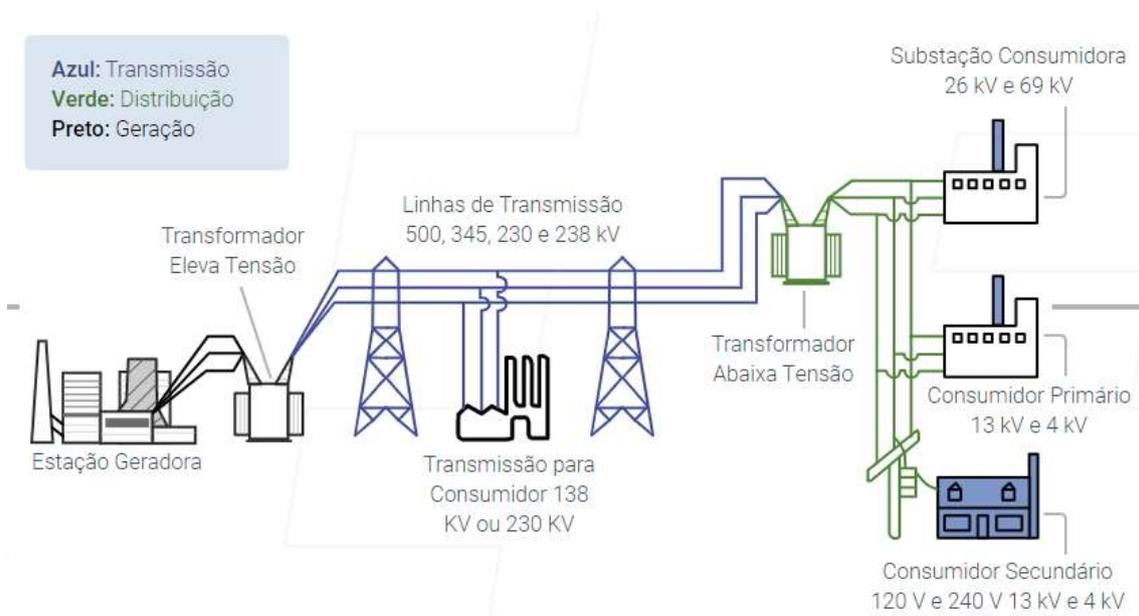
## 2.2. Sistema de Distribuição

O sistema de distribuição de energia elétrica é a parte dos sistemas elétricos de potência, responsável por encaminhar a energia aos consumidores finais. Antes que chegue aos consumidores, essa energia passa pela subestação

abaixadora, a qual reduz o valor da tensão para os níveis necessários para que os equipamentos possam funcionar.

As Redes de Distribuição dividem-se entre Primárias e Secundárias. As Primárias compõem o grupo de média tensão por estarem em 13,8 kV e atenderem principalmente cargas industriais. Já as Secundárias, compõem o grupo da baixa tensão com valores de 220/127 V ou 380/220 V a depender da região em que estão inseridas, mas atendendo majoritariamente consumidores residenciais ou comerciais (TOSTES, 2007; KAGAN, 2005).

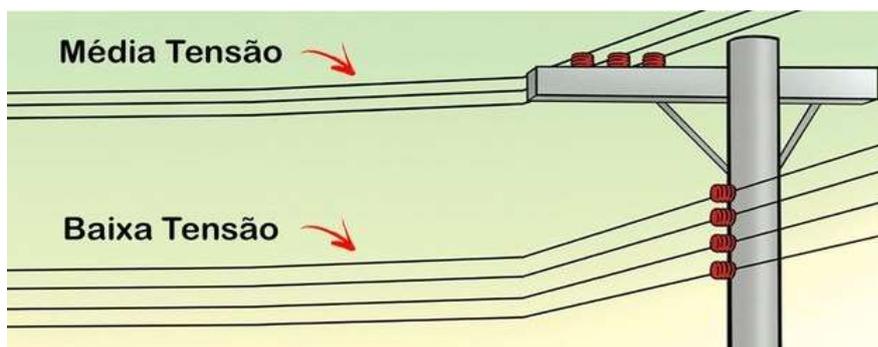
**Figura 3** – Esquema da Transmissão de Energia até a Distribuição para consumidores Primários e Secundários.



**Fonte:** BARROS, B. F.; GEDRA, R. L., BORELLI, R., (2014).

Nas linhas de distribuição, os cabos de média tensão estão posicionados acima dos cabos de baixa tensão, na Figura 4 mostra como normalmente está a configuração dessas instalações nos postes.

**Figura 4** – Representação das linhas de Média e Baixa tensão nos postes de distribuição de energia.



Fonte: Mundo da Elétrica (2016).

A classificação dos tipos de consumidores nos sistemas de distribuição pode ser nos subgrupos B1 para residencial, B2 para rural, B3 para as demais classes e B4 para iluminação pública. O sistema de distribuição é uma das partes mais importantes dos sistemas elétricos de potência, não apenas pela necessidade de altos investimentos, mas também por ser ela quem define a dimensão dos sistemas de geração, transmissão e subtransmissão, considerando que os consumidores estão contidos nesse sistema (VASCONCELOS, 2017).

As conexões das redes de distribuição estão sempre demandando ajustes e manutenções para que obtenham um funcionamento eficiente, levando energia de qualidade para os clientes, mas estes serviços nem sempre são realizados. São essas conexões que normalmente sentem os efeitos do fluxo de potência reverso causado pelo volume de conexões de Geração Distribuída, que no caso do estudo do presente trabalho, se refere aos sistemas de energia solar fotovoltaica.

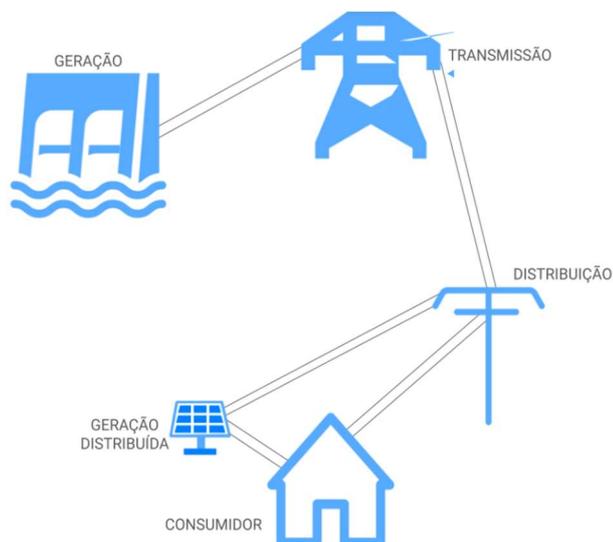
### **2.3. Geração Distribuída**

A classificação da geração de energia se divide entre centralizada e distribuída. A centralizada é aquela que apresenta uma grande fonte geradora e o fluxo de energia é unidirecional, partindo da fonte geradora até o consumidor, por meio das linhas de transmissão e distribuição. No caso da distribuída, as fontes de geração de energia estão conectadas junto à rede de distribuição de alguma concessionária ou junto ao consumidor (ACKERMANN; ANDERSSON; SÖDER, 2001).

Outra forma de explicar a Geração Distribuída é afirmando que quando a unidade deixa de ser apenas um ponto de consumo de energia elétrica e se transforma em um fornecedor, e esses fornecedores estão espalhados pelo sistema elétrico de potência. Na Figura 5, há um esquema que associa as duas formas de geração. Estando a geração centralizada representada pela fonte Hidroelétrica que necessita de grandes áreas para a sua geração de energia em larga escala. A geração distribuída, representada pela fonte solar fotovoltaica que está conectada diretamente ao consumidor e compartilha seu excedente com os consumidores vizinhos.

A geração distribuída conectada às redes de distribuição, é um desafio para a operação das redes de média e de baixa tensão. Pois estas não foram projetadas para admitir geração de eletricidade próxima às cargas. No aspecto técnico, ela desafia o controle dos níveis de tensão e corrente, nos ajustes dos elementos de proteção, entre outros. Já no econômico, a mini e a microgeração distribuída podem afetar o faturamento das empresas de distribuição (FALCÃO, 2017).

**Figura 5** – Demonstração da estrutura de Geração Centralizada e a Geração Distribuída.



Fonte: ALFONSO (2021).

A Geração Distribuída apresenta diversas vantagens, principalmente no que se refere às questões ambientais, como a Redução dos impactos ambientais, visto que não requer linhas de transmissão e distribuição extensas (INTERENERGIA, 2023).

Mas, nem só de benefícios esta modalidade é feita. Possuem algumas desvantagens que em curto ou longo prazo podem prejudicar o funcionamento do sistema elétrico de potência. Nos tópicos a seguir será discutida essa dualidade da geração distribuída.

### **2.3.1. Vantagens da Geração Distribuída**

Para seu funcionamento, a Geração distribuída não requer vastas extensões de terra ou de água, ela pode ser produzida nas áreas urbanas, nos telhados, terrenos, com diversas possibilidades de estruturas e reduzindo, nesse contexto, minimizando os impactos ambientais no entorno.

Analisando aspectos técnicos, no modelo centralizado há perdas grandes elétricas devido aos processos de transporte da energia nas linhas de transmissão e de distribuição. Diferente do modelo distribuído, pois embora também hajam perdas elétricas, ela está em níveis menores já que a geração é no local (PEREIRA, 2019).

Economicamente, no Brasil, é possível a redução de gastos públicos quanto a construções de usinas de geração centralizada por conta da redução da demanda de energia que é implementada pela geração distribuída, a qual geralmente os investimentos partem dos próprios consumidores (BARRETTO, 2018).

### **2.3.2. Desvantagens da Geração Distribuída**

Contudo, também tem pontos negativos atrelados a alta penetração de geração distribuída, dentre eles, o aumento da complexidade de operação da rede e na sua proteção, dificuldade na cobrança da conta no fim do mês, necessidade de alteração dos procedimentos de operação das redes pelas concessionárias (ANEEL, 2016).

O que se mencionou como aumento da complexidade da operação na rede se deve aos efeitos que a injeção de energia na rede em pontos que deveriam apenas ser retirados da rede. Destes, serão detalhados a seguir as implicações e informações

conceituais do Fluxo de Potência Reverso, da Variação da Tensão, da Intermitência de Geração e do Fator de Potência.

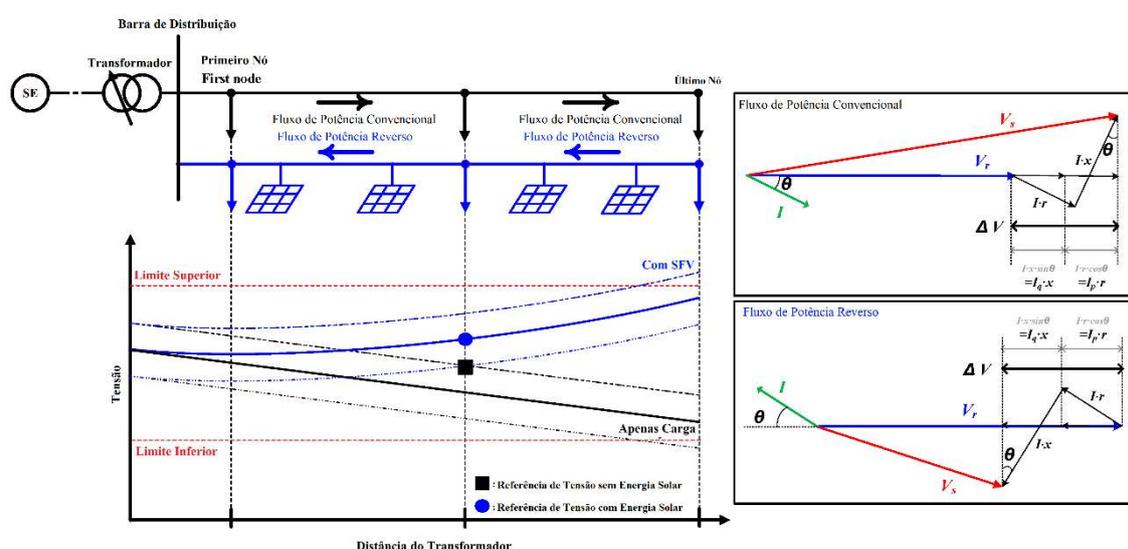
### 2.3.2.1. Fluxo de Potência Reverso

No desenvolvimento do Sistema de Distribuição era prevista uma forma de funcionamento na qual o fornecimento se dá com direção única, realidade que mudou a partir da implantação dos sistemas de geração distribuída.

Embora existam uma infinidade de benefícios relacionados à Geração Distribuída, tais como a redução de perdas elétricas devido à geração de energia ocorrer próximo às cargas que serão alimentadas, essa alternativa implica em alguns problemas para as conexões próximas.

Conforme Tonkoski e Lopes (2008), à medida que se injeta uma quantidade de energia superior em níveis acima da necessária para a alimentação das cargas se dá o fluxo reverso de potência, provocando aumento de tensão nas conexões da barra de carga. Essa variação acontece comumente no funcionamento de sistemas de energia solar fotovoltaica, pois há a injeção de potência ativa na rede elétrica, conforme mostrado na Figura 6.

**Figura 6** – Comportamento do Fluxo Reverso de Potência.



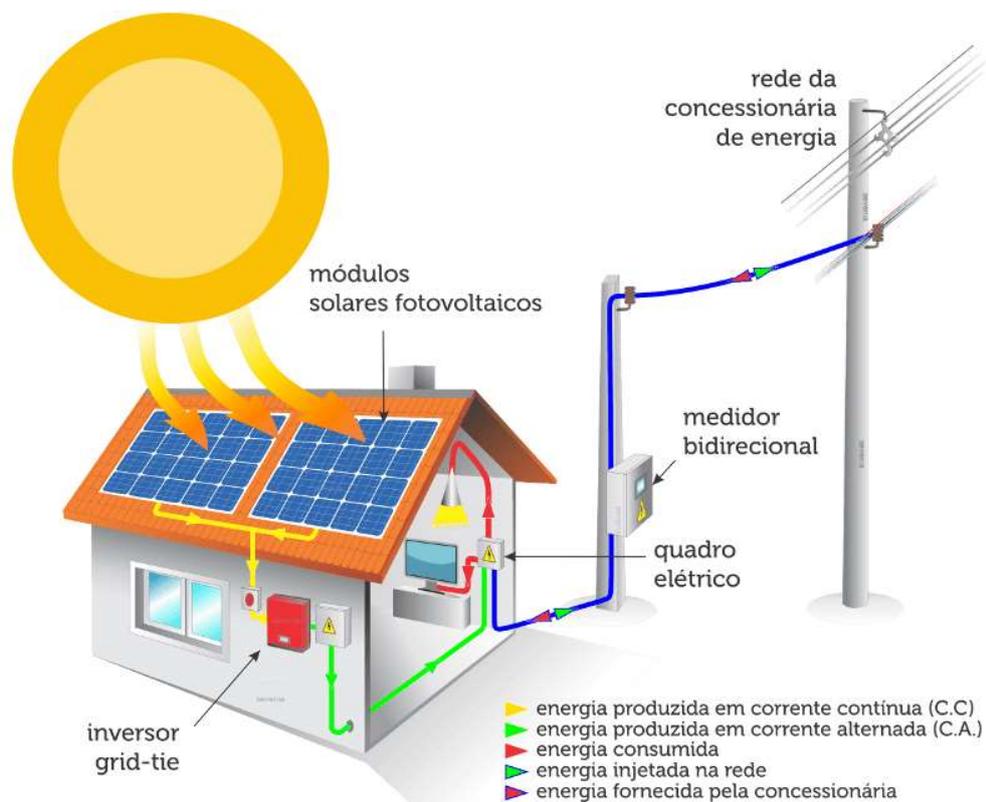
Fonte: adaptado MDPI *Open Access Journals* (2022).

Utilizando esse raciocínio, nas situações em que há uma grande quantidade de conexões de geradores distribuídos, centralizados e das cargas a serem atendidas por tais, a quantidade de energia fornecida ou demandada por cada um é o que vai determinar se o fluxo de potência é comum ou reverso e ainda se haverá problema de sobretensão ou subtensão, pois caso o consumo mostra-se maior do que a geração, a tensão acaba sendo caindo.

Para Passey *et. al.* (2011), estas inconsistências na tensão da rede são prejudiciais para o funcionamento dos próprios sistemas, pois como determinado pelas concessionárias, os inversores têm limites definidos de tensão e corrente, quando esses limites são ultrapassados o inversor desliga-se automaticamente, então as cargas passam a necessitar da alimentação da rede de concessionária. Essa situação passa a ser um agravante nos problemas de tensão porque há sobrecarga na rede.

Normalmente quando se apresenta o funcionamento da instalação fotovoltaica para um possível comprador, é explicado que nos momentos em que a geração de energia da Geração Distribuída supera o consumo no ponto de conexão, o valor excedente será injetado na rede e é isso que gera o crédito a ser descontado na conta de energia no final do mês. Essa energia que é injetada será redistribuída entre os consumidores vizinhos, podendo chegar nas redes de transmissão, dependendo do quanto de energia será gerada naquela instalação e do perfil de consumo dos usuários daquela rede, conforme mostrado na Figura 7.

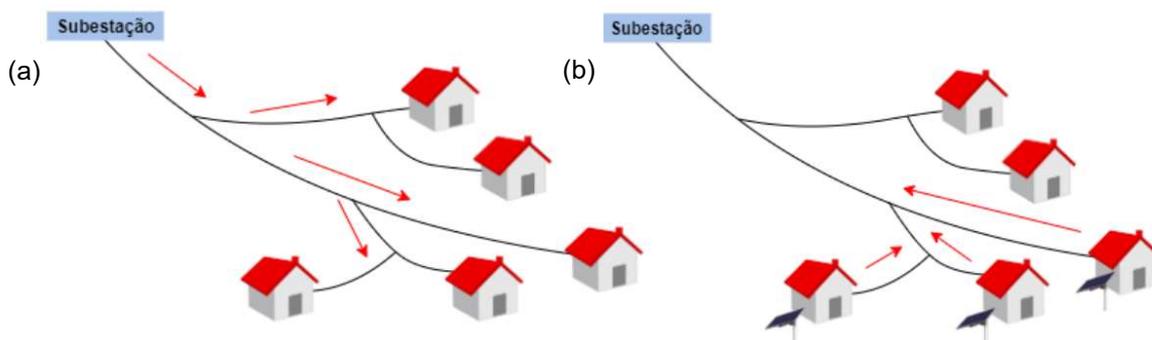
**Figura 7** – Operação do Sistema Fotovoltaico e conexão com a Rede de Distribuição.



Fonte: Luz Solar (2021).

Na Figura 8 é mostrado como funciona o fluxo de energia quando está no fluxo tradicional partindo da subestação para os pontos de utilização (a) e que faz percurso oposto quando há geração própria de energia (b).

**Figura 8** – Representação dos tipos de fluxo de energia do alimentador: (a) tradicional e (b) reverso.



Fonte: Corrêa (2021).

Caso a injeção de potência provocada pela GD seja muito alta, o carregamento dos circuitos e as perdas podem aumentar. Vale destacar que os condutores do sistema de distribuição foram projetados para a quantidade de potência vinda somente da subestação. Portanto, tendem a ter a seção reduzida, conseqüentemente com maior resistência, nos terminais em que se encontram os consumidores de baixa tensão, pois é onde tradicionalmente se esperava menor fluxo de potência (CORRÊA, 2021).

### **2.3.2.2. Variações na tensão**

De acordo com Yan e Saha (2013) é da natureza das redes elétricas apresentar um certo desequilíbrio permitido, devido à desconformidade de parâmetros físicos ou junção de cargas monofásicas. Mediante o acréscimo da geração distribuída monofásica, esse desequilíbrio é intensificado, indicando uma maior variação na tensão.

Dentre as conseqüências das variações de tensão, mostra-se a redução da qualidade da energia fornecida para os consumidores, que pode causar instabilidade nas Fases e até desligamentos dos equipamentos. Diminuição da vida útil de instrumentos usados para regular a tensão. Contudo, é importante que seja feito um acompanhamento da operação da tensão nas barras, a fim de verificar os pontos em que os limites são excedidos.

Em contrapartida, Shayani (2010) explicou que ter a conexão de sistemas fotovoltaicos proporciona correção em problemas de queda de tensão pois, parte da potência necessária para a alimentação da carga, é utilizada simultaneamente. Desse modo, a corrente que passa pela rede de distribuição diminui. Portanto, em situações em que a carga declarada é alta, as instalações de energia solar agem como reguladores de tensão.

### **2.3.2.3. Intermitência na geração**

Fatores como escassez ou abundância de radiação solar ou vento nos geradores fotovoltaicos e eólicos, respectivamente, são os causadores do que se chama intermitência de geração, levando à redução ou crescimento do que se injeta de potência na rede (PASSEY *et al.*, 2011).

Isso indica o quão imprevisível é o comportamento dos sistemas, principalmente os de energia fotovoltaica que podem variar mediante qualquer interferência que haja na quantidade de raios solares que incidem na superfície do painel, como por exemplo, a passagem de uma nuvem na frente do sol.

A movimentação da sombra de uma nuvem sobre uma instalação fotovoltaica tem a capacidade provocar a redução da potência de saída, e, no momento em que a sombra deixa de afetar a superfícies dos painéis fotovoltaicos, essa produção atinge seu valor nominal de operação (JEWELL; RAMAKUMAR, 1987).

As tecnologias de mini e microgeração distribuída são, principalmente, fontes intermitentes de energia, como a eólica e a solar fotovoltaica. Tal intermitência produz maiores dificuldades para a operação das redes de distribuição, em especial no que se refere ao controle de tensão (FALCÃO, 2017).

Por isso que, quando se constata algum problema de sobretensão relacionado ao sistema, é ideal que a análise dos seus parâmetros seja feita em um horário próximo ao meio dia local, devido a este ser um horário em que normalmente a radiação solar alcança níveis melhores e por consequência há uma geração de energia maior.

A oscilação na radiação solar, a quantidade de obstáculos capazes de causar sombreamento, o clima e a temperatura do ambiente em que o sistema está inserido, interferem diretamente na potência de saída e por consequência na amplitude do fluxo de potência reverso injetado na rede.

#### **2.3.2.4. Fator de Potência**

Na composição de um sistema gerador de energia solar fotovoltaica existe um item de extrema importância, que é o inversor. É ele que realiza a conversão da

energia elétrica gerada pelas placas com corrente contínua em corrente alternada, que é como são alimentados os equipamentos. Os inversores, em seu funcionamento, obtêm de forma constante a máxima potência do sistema, a fim de garantir a atuação no ponto de máxima potência. E também, têm o dever de fornecer uma corrente com baixa distorção harmônica e realizar a detecção de ilhamento.

A produção de inversores que tenha em suas configurações de operação um fator de potência quase que unitário objetiva tanto uma forma de evitar problemas à instalação fotovoltaica como suporte a rede para correção do fator de potência, tendo em vista a possibilidade de controlar a injeção de potência reativa pelo inversor, pela capacidade de correção do fator de potência da rede e conseqüentemente regulação da tensão.

Nos estudos de Tonkoski, Lopes e El-Fouly (2011) a correção do fator de potência através do uso de geração distribuída se mostra bastante favorável com a aplicação de uma espécie de reparação da potência reativa. Mas ainda sendo algo que é objeto de estudos e sem legislação que designe o seu controle ou que permita sua utilização, ainda não podem executar essa contribuição.

Além disso, em concordância com Perin *et. al.* (2020) e Passey *et. al.* (2011), há necessidade de ajustes nos semicondutores para o fornecimento de potência ativa e reativa, compensações na produção e consumo de energia ativa e reativa para que exista um equilíbrio. Deve ser considerado também que a utilização dos sistemas fotovoltaicos na correção do fator de potência pode aumentar custos operacionais e que ela pode ser eficaz no controle de tensão da rede na maioria dos casos, mas quando a impedância de linha é mais resistiva pode não ser tão eficiente.

Através de diversas análises, Yang *et. al.* (2016), constatou a possibilidade de limitar os índices de potência ativa que chega à rede por meio dos sistemas fotovoltaicos residenciais, para que assim os problemas como sobretensão sejam evitados, usando-os para o fornecimento de potência reativa próximo às unidades de consumidoras, claro que, fazendo um balanço do que a rede suporta sem que venha a indicar algum distúrbio.

### 3. METODOLOGIA

As etapas de desenvolvimento desse trabalho estão descritas na Figura 9.

**Figura 9** – Fluxograma da metodologia aplicada.



Fonte: Autor (2023).

#### 3.1. Escolha do *software*

Nesta seção, é apresentado a aplicação escolhida para o desenvolvimento desta pesquisa que foi o *OpenDSS*, também conhecido como *The Distribution System Simulator* (Simulador do Sistema de Distribuição). A partir desse *software*, é possível produzir modelos dos diversos componentes do sistema de distribuição, tais como subestações, linhas que se conectam eles aos transformadores de distribuição. Como também modelar fontes de geração distribuída, como o sistema fotovoltaico. Por se mostrar uma ferramenta bem completa, é amplamente utilizada no mundo, promovendo análises sobre o sistema de distribuição nas condições que forem

especificadas, seja para verificação da qualidade de energia ou para o planejamento do sistema de distribuição.

O fluxo de potência é um dos recursos mais comuns utilizados pelo *OpenDSS* já que qualquer recurso de simulação disponível é precedido do cálculo das tensões nodais ou contribuições de correntes. Para obter este fluxo de potência o *OpenDSS* utiliza o método de injeção de correntes (CIM). Para Dugan (2013) são necessários três passos principais para realizar a solução do algoritmo, esses passos estão indicados na Tabela 3.

**Tabela 2** – Solução do Algoritmo Normal (CIM) do *OpenDSS*.

Passo	O que fazer
1	Remove todos os elementos de conversão de energia da rede, como por exemplo, geradores e cargas. Calcula o valor inicial de tensão do barramento para a iteração com a matriz de admissão da rede desta forma.
2	Conecta os elementos na rede e calcula a injeção de corrente de cada elemento de conversão com a sua matriz de admissão, tensão do nó e potência.
3	Utiliza as correntes de injeção de cada elemento para formar uma matriz de injeção de corrente. As tensões dos nós podem ser calculadas com a matriz corrente de injeção e o sistema de matriz de admissão através da operação da matriz. Manter a iteração até que o erro de tensões nodais seja inferior a tolerância.

**Fonte:** Dugan (2013).

Com o objetivo de tornar melhor o cálculo de perdas na distribuição de energia elétrica, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estabeleceu o *OpenDSS* como quantificador de perdas através da Norma Técnica n.º 0057 (2014) aplicando por ele a metodologia do Fluxo de Carga. Além disso, no *OpenDSS* há um modelo que facilita a simulação da geração fotovoltaica, o *PVSystem Element Model*, composto por um modelo de gerador e de inversor fotovoltaico, auxiliando nos estudos de impacto em sistemas de distribuição.

Usando como base para as simulações a rede IEEE 13 barras *Node Test Feeder*, inicialmente com a sua caracterização sem a presença de geração distribuída,

e posteriormente com a presença das ligações de geração distribuídas nas respectivas barras do sistema.

### 3.1.1 Elementos de Suporte

Para o desenvolvimento dos códigos e montagem dos circuitos foram utilizados alguns elementos de suporte do *OpenDSS*, os quais facilitam a designação dos parâmetros, além de auxiliar no controle e monitoramento dos dados. Na Tabela 3 estão os elementos utilizados e suas respectivas funcionalidades.

**Tabela 3** – Elementos do *OpenDSS* utilizados e suas funcionalidades.

<b>Elemento</b>	<b>Funcionalidade</b>
<i>LineCode</i>	Possibilita o armazenamento das características de uma linha
<i>LineGeometry</i>	Permite armazenar dados da geometria dos postes e das linhas
<i>LoadShape</i>	Permite que seja criada uma curva de geração ou consumo ao longo de um intervalo de tempo.
<i>EnergyMeter</i>	É uma espécie de medidor que fornece vários resultados da região que realiza as medições
<i>Monitor</i>	Indica os dados da rede no ponto em que é aplicado
<i>PVSystem</i>	Permite a criação de um modelo de sistema solar fotovoltaico.
<i>XYCurve</i>	É usado para inserir curvas como a eficiência de objetos <i>PVSystem</i> .

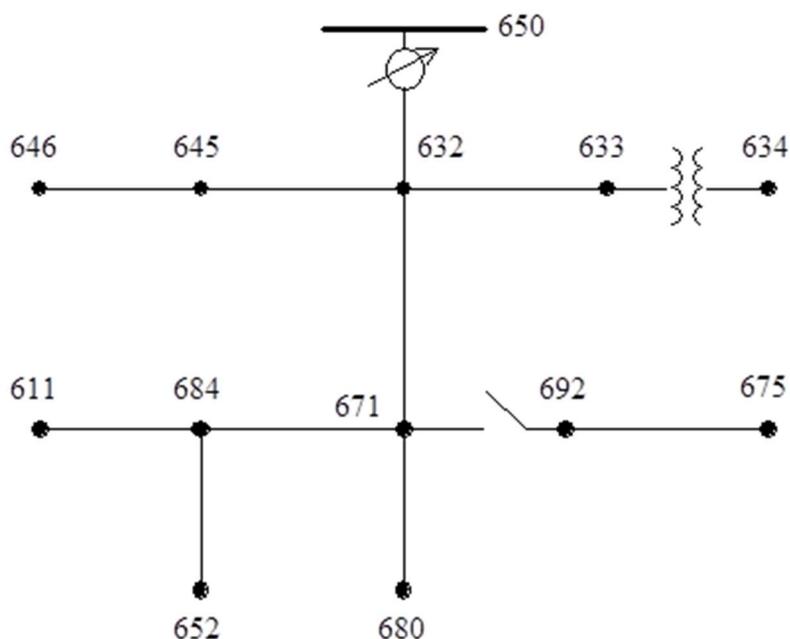
Fonte: MACHADO (2017).

### 3.2 Escolha do Sistema-Teste

O modelo de Rede fornecido pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, IEEE, e com código disponível na biblioteca do *OpenDSS*, contém um transformador, reguladores de tensão que estão fixados ao longo das simulações, suas cargas não estão balanceadas. Nele também há bancos de capacitores, linhas

mono, bi e trifásicas desbalanceadas e tudo isso operando com uma tensão de 4,16 kV, podendo ser ilustrada pelo circuito da Figura 10.

**Figura 10** – Ilustração do Circuito de 13 Barras IEEE.



Fonte: IEEE 13 Node Test Feeder (2017).

No sistema as cargas apresentam conexões da forma vista na Tabela 4, contendo os dados de Dados de Carga em Cada Ponto.

**Tabela 4** – Cargas presentes no sistema de 13 barras IEEE.

Barra	Fase 1		Fase 2		Fase 3	
	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
632	160	110	120	90	120	90
645	0	0	170	125	0	0
646	0	0	230	132	0	0
652	128	86	0	0	0	0
671	385	220	385	220	385	220
675	485	190	68	60	290	212
692	0	0	0	0	170	151
611	0	0	0	0	170	80

Fonte: IEEE 13 Node Test Feeder (2017).

Mediante análise de Júnior (2016), a composição da rede se dá com barras com perfil residencial, sendo apenas a barra 671 com caráter industrial. O alimentador

da rede de distribuição aqui é retratado pela barra 650, seguido pelo regulador de tensão que atua na transformação dos seus três níveis de tensão de operação, ou seja, de 115 kV, 4,16 kV e 0,48 kV em 4,16 kV nos barramentos do sistema, com exceção da 634 que é mantida a tensão em 0,48 kV.

### 3.3. Análise do Sistema-Teste

Tendo como parâmetro de comparativo os valores de tensão, são indicados os valores do sistema de 13 barras do IEEE na Tabela 5, em que Mag é a Amplitude e Âng. é a Fase. A apresentação dos dados do sistema em p.u. (por unidade), obtido através da divisão da Grandeza pela Grandeza Base, neste caso a tensão. Essa forma traz benefícios significativos para cálculos de rede com vários níveis de tensão, pois acaba permitindo que os transformadores sejam ignorados ao eliminar a razão de transformação, ficando de 1:1.

**Tabela 5** – Perfil de Tensão no sistema de 13 barras IEEE.

Barra	Fase 1		Fase 2		Fase 3	
	Mag.	Âng.	Mag.	Âng.	Mag.	Âng.
634	0,9940	-3,23	1,0218	-122,22	0,9960	117,34
645	0	0	1,0329	-121,90	1,0155	117,86
646	0	0	1,0311	-121,98	1,0134	117,90
652	0,9825	-5,25	0	0	0	0
671	0,9900	-5,30	1,0529	-122,34	0,9778	116,02
675	0,9835	-5,56	1,0553	-122,52	0,9758	116,03
692	0,9900	-5,31	1,0529	-122,34	0,9777	116,02
611	0	0	0	0	0,9738	115,78

Fonte: IEEE 13 Node Test Feeder (2017).

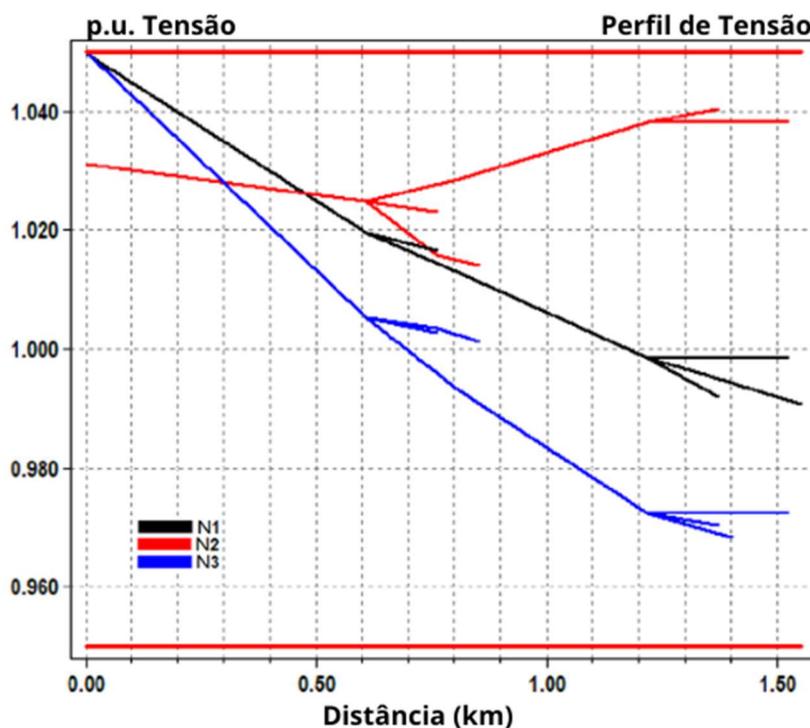
Esses valores podem ser representados graficamente na Figura 11, com as curvas geradas no próprio *OpenDSS*, são obtidas as tensões em todas as barras, de acordo com as suas distâncias para a barra de referência, ou seja, no eixo “y” do gráfico é indicado o valor das tensões nodais e no eixo “x” é indicada a distância desses nós da subestação.

Os Nós do circuito são diferenciadas pelas cores, sendo o N1 a cor preta, o N2 a cor vermelha e o N3 a cor azul. O gráfico demonstra o perfil da tensão em pu ao longo do alimentador. Nota-se que a tensão no último barramento está acima de 0,98 pu.

Este recurso mostra-se útil para estudos de implantação de bancos de capacitores já que é possível verificar visualmente em qual ponto do alimentador a correção do nível de tensão pode ser necessária.

Por meio da expansão dos pontos de consumo sem planejamento, a distância entre as cargas a serem supridas e fonte geradora aumentou, isso acaba também alterando o perfil de tensão e por consequência compromete a qualidade da energia a ser fornecida pelo sistema (JÚNIOR,2018).

**Figura 11** – Representação gráfica do Perfil de Tensão no sistema de 13 barras IEEE.



Fonte: Autor (2023).

Devido a esse comprometimento da qualidade de energia a ANEEL oficializou a Resolução n.º 505 em novembro de 2001, a fim de dispor normas e procedimentos para definir padrões e responsabilidade para os consumidores. No

caso da rede selecionada, utiliza-se os valores de referência presentes na Tabela 3 da Regulação, representada aqui na Tabela 6, com os critérios para as conexões com Tensão nominal entre 1 kV e 69 kV.

**Tabela 6** - Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV.

<b>Tensão de Atendimento (TA)</b>	<b>Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)</b>
Adequada	$0,95TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Fonte: ANEEL (2018a).

Como mostrado na Figura 9, há duas retas vermelhas delimitando os valores para que a rede seja considerada adequada nos padrões da Resolução N° 5 da ANEEL. É possível ver que algumas das barras conectadas aos Nós 1 e 3 chegam bem próximos ou se igualam a reta do limite superior de menor ou igual a 1,05 e todos estão acima da reta do limite inferior que é maior ou igual a 0,95.

Analisada a qualidade da rede do sistema-teste, agora é necessário ver as cargas inseridas, considerando os tipos de consumidores nas barras e atribuindo modelos de curva característica. Isso serve de embasamento para constatar a demanda máxima, condições de queda ou aumento de tensão e aquecimento.

Apesar de no sistema montado no OpenDSS as cargas estarem apenas com seus valores fixos e não variando com o tempo da mesma forma que a temperatura e a irradiação, é interessante demonstrar como se comportam cargas Residenciais e Industriais para que se tenha noção das faixas de horário com maior consumo. Para isso, será usado como base a Tabela “2.2” presente no livro de Kagan, Oliveira e Robba (2005), a qual associa o valor da carga industrial e residencial no intervalo de tempo, como mostra a Tabela 7.

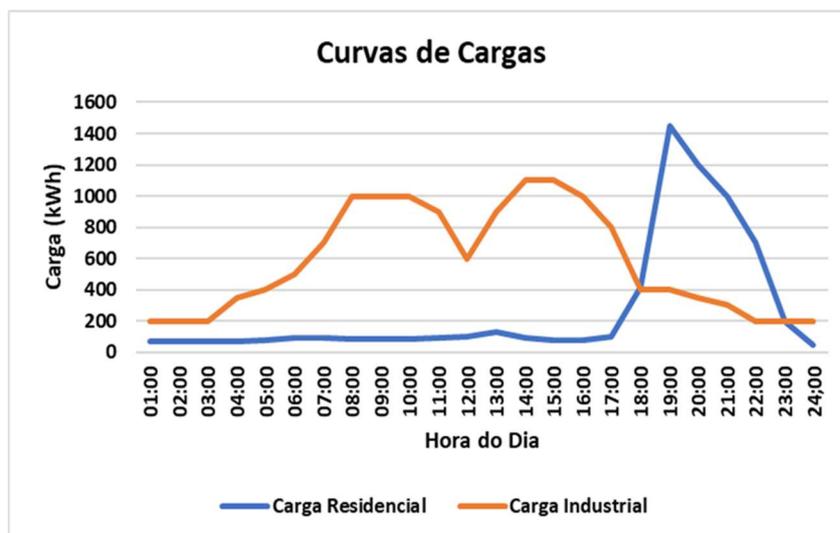
**Tabela 7** – Adaptação Tabela 2.2 Livro “Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica”.

Hora do dia	Carga Residencial (kW)	Carga Industrial	Hora do dia	Carga Residencial (kW)	Carga Industrial
0-1	70	200	12-13	130	900
1-2	70	200	13-14	90	1100
2-3	70	200	14-15	80	1100
3-4	70	350	15-16	80	1000
4-5	80	400	16-17	100	800
5-6	95	500	17-18	420	400
6-7	90	700	18-19	1450	400
7-8	85	1000	19-20	1200	350
8-9	85	1000	20-21	1000	300
9-10	85	1000	21-22	700	200
10-11	95	900	22-23	200	200
11-12	100	600	23-24	50	200

Fonte: Kagan, Oliveira e Robba (2005).

Os dados de carga apresentados na Tabela 6 estão em kW e associam o valor nos intervalos de uma hora, graficamente eles podem ser mostrados como está na Figura 12, em que o eixo vertical se refere às cargas e o horizontal se refere ao intervalo de tempo.

**Figura 12** – Curvas das Cargas Residenciais e Industriais em um dia.



Fonte: Baseado em Kagan, Oliveira e Robba (2005).

Na Tabela 1, os valores totais da potência em cada barra estão apresentados por Fase, mas no código do sistema foi colocado de acordo com a soma, os valores podem ser vistos na Figura 5. A potência total das cargas nas barras é de 3466 kW.

O comportamento da carga residencial é caracterizado por um consumo de certo modo constante ao longo do dia, pois normalmente as pessoas estão em outros locais, seja trabalho, local de educação, mas é comum que o pico de consumo aconteça no horário entre as 18 e 21 horas na utilização de diferentes cargas.

Segundo estudos, a utilização de chuveiros elétricos acontece em 80 % das residências. Muito utilizados nos horários de demanda de ponta e é responsável por cerca de 24 % de todo o fornecimento de energia elétrica nas residências (PROCEL, 2009).

Quanto à curva do modelo de carga industrial, mostra-se uma caracterização de uma demanda maior no horário comercial, iniciando por volta das 8 horas, com um leve declínio no que se atribui ao horário de almoço dos funcionários. Ele volta a crescer e alcança pico no horário da tarde, o que faz com que se entenda como um período de crescimento de produtividade. A queda às 18 horas é interpretada como o fim da jornada de trabalho, horário em que os trabalhadores irão para as suas residências.

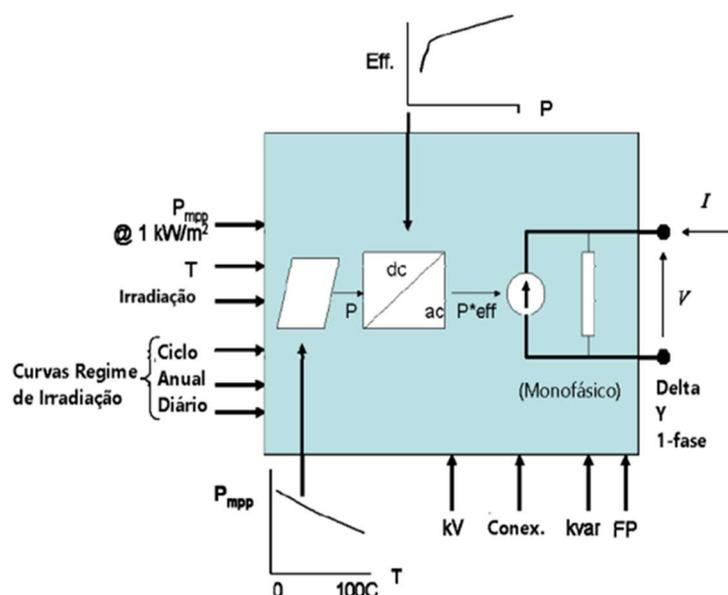
Para o MCT (2005), a iluminação é responsável por boa parte do consumo de energia no setor industrial. Há também um grande desprendimento da energia direcionado aos motores elétricos, que segundo eles, se deve a baixa eficiência, especificação técnica imprópria, o fraco sistema de operação e manutenção dos motores.

### **3.4. Caracterização de dados do Sistema Fotovoltaico**

Para que seja possível incluir o sistema fotovoltaico no circuito é necessário montar de acordo como o *OpenDSS* modela ele através do *PVSystem*. Na Figura 13 mostra um diagrama esquemático do modelo de dispositivo *PVSystem* recentemente

implementado no *OpenDSS*. Este modelo combina um modelo do arranjo fotovoltaico e do inversor fotovoltaico em um modelo que conta com o painel e o inversor como componentes. O inversor recebe a corrente contínua e libera a corrente alternada que dá a potência trifásica ou monofásica, ambas oscilantes no tempo, conveniente para usar em estudos de impactos do sistema de distribuição.

**Figura 13** - Modelo do Sistema Fotovoltaico.



Fonte: *OpenDSS PVSystem Model* (2011).

O modelo assume que o inversor é capaz de encontrar o ponto de potência máxima (mpp) do painel rapidamente. Isso simplifica a modelagem dos componentes individuais, painel fotovoltaico e inversor, e deve ser adequado para a maioria dos estudos de impacto de interconexão.

O campo de interação do *PVSystem* é equivalente ao de qualquer recurso de conversão de potência do *OpenDSS*. Basicamente, parece o mesmo para o modelo de circuito como um gerador ou dispositivo de carga ou armazenamento, produzindo ou consumindo potência conforme uma função. Neste caso, a potência ativa tem como variáveis da sua função a irradiância, a temperatura e potência nominal no mpp. Tudo isso atendendo a uma temperatura selecionada e uma à irradiância de 1,0 kW/m<sup>2</sup>.

Também é necessário informar se a conexão é estrela ou triângulo, a tensão presente e o fator de potência ou a potência reativa que o inversor passará ou receberá da rede.

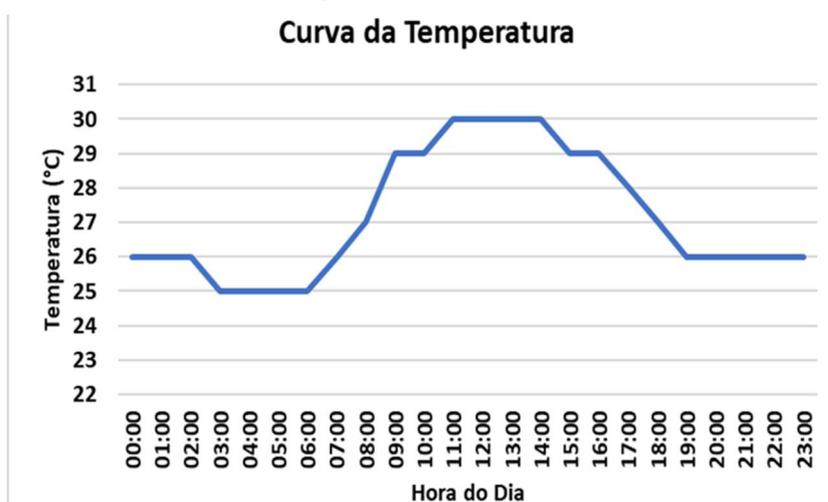
Quanto à temperatura, será considerado o valor de hora em hora, tomando como base, para esses valores, os dados apresentados no *site Weather* para o dia 15 de dezembro de 2022 na cidade de Maceió, estado de Alagoas.

**Tabela 8** – Temperatura ao longo dia.

Hora	Temperatura (°C)	Hora	Temperatura (°C)
00:00	26	12:00	30
01:00	26	13:00	30
02:00	26	14:00	30
03:00	25	15:00	29
04:00	25	16:00	29
05:00	25	17:00	28
06:00	25	18:00	27
07:00	26	19:00	26
08:00	27	20:00	26
09:00	29	21:00	26
10:00	29	22:00	26
11:00	30	23:00	26

Fonte: *Site Weather* (2022).

**Figura 14** – Curva da Temperatura ao longo dia.



Fonte: Autor (2022).

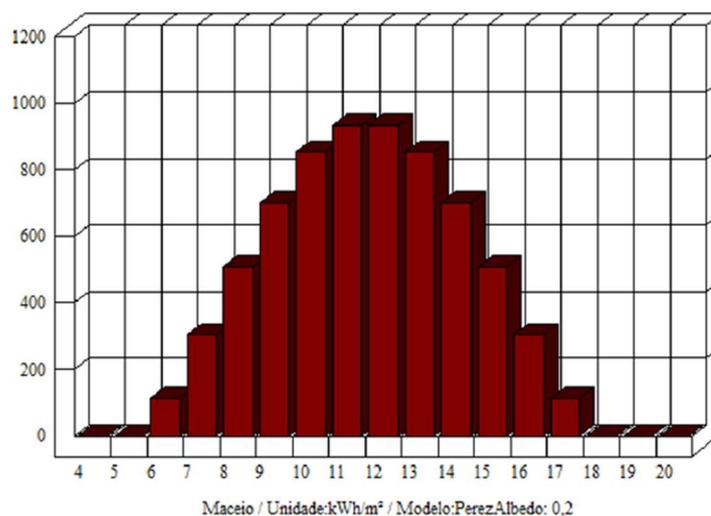
Os valores de Irradiação solar a serem apresentados foram obtidos através da base de dados do RADIASOL, que é um *software* desenvolvido e disponibilizado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, o mesmo utiliza modelos matemáticos para efetuar o cálculo da intensidade da radiação solar em superfícies, a fim de determinar como e quanto a inclinação da superfície pode afetar os índices de radiação solar recebidas, além de considerar também a anisotropia da radiação solar em suas componentes direta e difusa.

**Tabela 9** – Valores da Irradiação ao longo do dia.

Hora	Irradiação (Wh/m <sup>2</sup> )	Hora	Irradiação (Wh/m <sup>2</sup> )
00:30	0	12:30	935
01:30	0	13:30	852
02:30	0	14:30	702
03:30	0	15:30	509
04:30	0	16:30	303
05:30	0	17:30	113
06:30	113	18:30	0
07:30	303	19:30	0
08:30	509	20:30	0
09:30	702	21:30	0
10:30	852	22:30	0
11:30	935	23:30	0
T1	3414	T2	3414
T1+T2		6828,00	

Fonte: RADIASOL (2022).

**Figura 15** - Representação gráfica dos valores de irradiação solar.



Fonte: RADIASOL (2022).

Estes dados foram inseridos no código de *Curves* e *Loadshapes* a serem utilizados para a criação dos Sistemas Fotovoltaicos para que depois fossem inseridos os dados dos que irão ser conectados em cada barra. O modelo *PVsystem* tem que os objetos do *XYcurve* são interpolados linearmente entre os pontos definidos para determinar o valor real e o utilizam para descrever certas características dos painéis fotovoltaicos e inversores. Uma matriz de pontos é inserida para descrever como o  $P_{mpp}$  varia com T em relação à temperatura escolhida para o Potência nominal no ponto de máxima potência a  $1 \text{ kW/m}^2$ .

Para garantir a convergência do fluxo de potência, deve haver consistência entre a quantidade de dados utilizados e o tamanho do vetor. O *OpenDSS* modela a irradiância variável trabalhando com vetores que podem ser introduzidos diretamente como uma variável, uma vez que os requisitos para vetores são atendidos, o vetor é chamado para *OpenDSS* usando um código de linha simples que tem cinco partes: o vetor de irradiância com qualquer nome desejável, no presente trabalho é introduzida a *Loadshape MyIrrad*, seguida do número de pontos usados e o intervalo de tempo entre cada ponto especificado.

### **3.5. Conexão do Sistema Fotovoltaico nas Barras 671 e 646**

A, s Barras 671 e 646 tem características do modelo de carga selecionados no Subtópico 3.3, onde a primeira é um exemplo de consumo industrial e a segunda é exemplo de consumo residencial.

É importante que se tenha pelo menos duas classes de consumidores para possibilitar uma aproximação do comportamento real da rede e como a tensão de cada um irá se comportar com os testes sendo feitos separadamente, este tópico serve de referência no tópico 3.7. para análise dos valores de tensão.

Na primeira situação a qual as barras são submetidas, o sistema inserido tem potência suficiente para atender 100 % da carga conectada a cada barra. Em relação ao somatório de todas as cargas do sistema, a geração conectada à Barra 671, que é para 1155 kW, representa 35,36 %. Já a da Barra 646, que é para 230 kW, corresponde à 7,04 %.

No cenário seguinte, foi dobrada a potência de cada gerador para ver de qual seria o nível de impacto nos valores da tensão. Este ato de dobrar a potência foi feito com intuito experimental, desconsiderando que, na Norma Técnica da Equatorial Alagoas (N.T. 020), a concessionária limita a capacidade de instalação fotovoltaica para as cargas conforme apresentado no projeto para obtenção do parecer de acesso e que, caso haja necessidade de aumento de carga deve ser solicitado um estudo de viabilidade técnica para que eles avaliem se há suporte na rede para que esse aumento aconteça.

### **3.6. Comparativo das Curvas de Tensão com e sem GD**

Aqui será realizado um comparativo visual de como se comportou a tensão nas Barras 671 e 646 antes e após a conexão dos sistema de energia solar fotovoltaico. Sendo essas curvas obtidas por meio do comando *Monitor* do *OpenDSS*, que vai fornecer os dados ao longo do intervalo de tempo inserido que é de 24 horas.

### **3.7. Análise dos Valores**

Aliado com a observação de como as curvas se comportam, também é feita uma organização dos valores de pico, tanto da tensão quanto do fluxo de potência, nas Fases das barras estudadas em cada uma das situações propostas.

Além disso, a partir dos valores obtidos irá se avaliar a qualidade da rede por meio dos valores de referência da ANEEL, já apresentados na Tabela 5.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seção dos resultados e discussões é dividida em quatro partes, primeiro com a inserção fotovoltaica nas barras separadamente, testando a 671 e depois a 646, com uma capacidade que atendesse a necessidade do que está ligado em cada uma delas, ou seja, geração de 100 % do que é consumido pelas cargas.

Na segunda parte do teste, admite-se a conexão de geradores fotovoltaicos com o dobro da potência da primeira etapa, esse controle das potências é feito com o intuito de buscar alcançar situações críticas de penetração dos geradores distribuídos e desse modo ver em que condições os limites propostos no Módulo 8 das Regras e Procedimentos de Distribuição (PRODIST), indicados no presente trabalho na Tabela 5. Foi considerado para todas as situações somente a injeção de potência ativa por parte dos geradores, com isso, o fator de potência adotado para o sistema fotovoltaico foi unitário.

Quanto a terceira parte, são emitidas as curvas tensão e potência nas barras ao serem submetidas as situações das etapas anteriores e para complementar, as curvas também no transformador a qual as duas barras estão conectadas, a fim de observar o comportamento da tensão e do fluxo de potência.

Na criação das curvas utilizou-se o comando *Monitor* obtendo o valor da tensão em casa umas das tensões da barra ao longo de 24 horas com o intervalo de 1 hora. Para se ter o comparativo, foi feito o *plot* da curva sem incluir o sistema e, logo pós a inclusão do código *PVSystem* ideal para a barra no *OpenDSS*, foi o momento de verificar o depois.

Para a quarta etapa, através da base de dados do sistema em cada uma das testagens, foram organizados em tabelas os valores de tensão, em pu, e potência, em kW, nas Fases, no caso da barra 671 trifásica e a 646 monofásica.

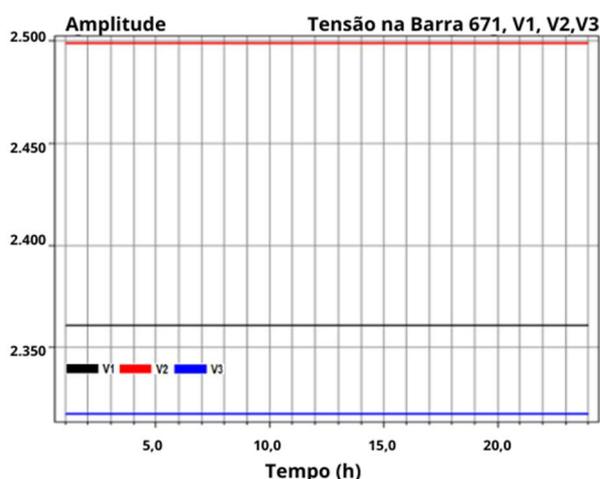
Em seguida, com os valores de tensão já em pu, foram comparados com os limites de referência da Tabela 5, que classificam a qualidade da rede em adequada (entre 0,95 e 1,05), precária (entre 0,90 e 0,93) e crítica (menor que 0,90 ou maior que 1,05).

#### 4.1 Testes na Barra 671

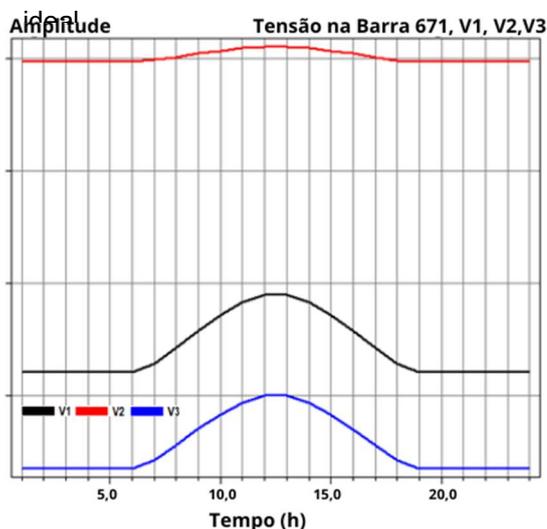
Pode-se ver Na Figura 16 a curva da barra 671 antes que o sistema fotovoltaico seja inserido, enquanto na Figura 14 o comportamento da curva depois da conexão do gerador equivalente a 100 % da carga.

Na primeira curva não é possível perceber uma variação, como se a tensão estivesse constante. Já no segundo cenário fica visível um comportamento nas Fases similar ao da curva da Irradiação.

**Figura 16** – Curva de Tensão barra 671 sem sistema fotovoltaico.



**Figura 17** – Curva de Tensão barra 671 com sistema fotovoltaico de potência



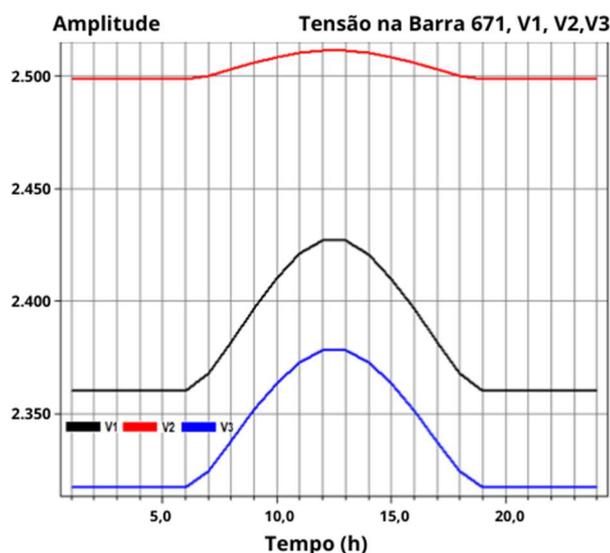
Fonte: Autor (2023).

A forma que a curva da tensão das Fases 1 e 3 varia ocorre modo parecido, alcançando ponto ao mesmo tempo. Quanto ao caso da Fase 2 os valores já são mais altos do que os das outras duas, mas a elevação é bem pequena, mesmo seguindo o modelo das outras e alcançando seu pico no mesmo momento que as outras.

Os valores de tensão entre as Fases se mostram diferentes devido à forma a qual se dá a distribuição das cargas em cada uma das Fases, neste caso, a Fase 2 recebe mais cargas do que a Fase 1 que, por sua vez, recebe a conexão de mais cargas do que a Fase 1.

Em um segundo momento foi aumentado o valor da geração para 200 % do valor da carga. O resultado da curva de tensão é mostrado na Figura 15.

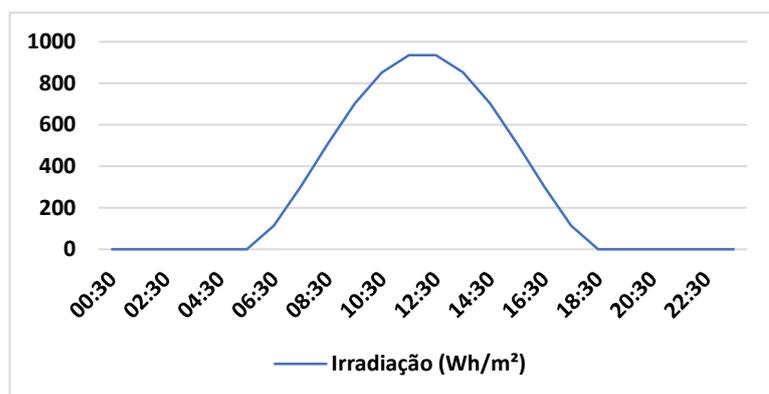
**Figura 18** – Curva de Tensão barra 671 com sistema fotovoltaico potência com o dobro da ideal



Fonte: Autor (2023)

Uma observação interessante é que se comparar a curva da tensão nas Figuras 16 e 17 com a da Figura 18, que é a da irradiação, elas têm perfil similar, justamente pela ideia de que nos horários em que a irradiação solar aumenta, a geração de energia é maior, logo há uma maior potência ativa na rede e por consequência um aumento na tensão.

**Figura 19** – Curva da Irradiação Solar



Fonte: RADIASOL (2022)

Analisando a sequência de curvas formadas com a inclusão dos sistemas fotovoltaicos nas 13 barras do sistema, podem ser apontadas algumas características em comum, tais com a semelhança com a curva da irradiação, ainda que de forma não tão suave, é claro que nos horários com irradiação solar mais baixa os valores

são mais baixos, alcançando seus intervalos de pico nos horários em que há crescimento da irradiação.

A queda brusca na tensão em horários entre as 17:30 e 21 horas, pode ser relacionado não só a questão da irradiação no horário, mas também ao comportamento de consumo residencial que, a Agência Nacional de Energia Elétrica, geralmente alcança pico entre 18h e 21h, é o momento de um dia em que acontece o maior consumo de energia elétrica pela população. É visível que a instalação provoca um aumento de tensão nas barras em relação aos casos sem a geração, por conta da redução da carga a ser suprida e a potência injetada na rede em alguns momentos, relacionando isso ao fluxo reverso no ramo.

Os valores da tensão serão dados em pu (por unidade), que facilita a demonstração por fazer uma relação entre o valor real e o valor base. A Tabela 10, organiza os valores de Tensão em kV, quilovolts, e também em pu considerando que a tensão base das barras de 4,16 kV.

**Tabela 10** – Valores da Tensão nas etapas de simulação na barra 671

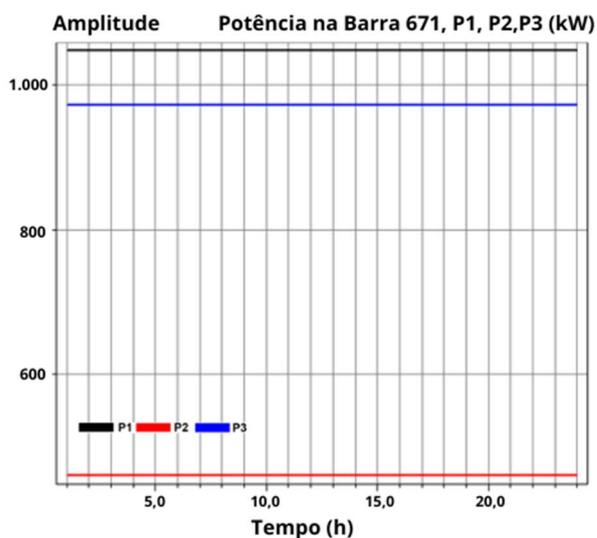
Barra	Fase	Sem GD		Com GD 100 %		Com GD Dobro	
		VLN (kV)	pu	VLN (kV)	pu	VLN (kV)	pu
671	1	2,3605	0,9828	2,3809	0,9913	2,4250	1,0097
	2	2,4985	1,0403	2,5041	1,0426	2,5412	1,0581
	3	2,3174	0,9649	2,3500	0,9785	2,3770	0,9897

Fonte: Autor (2023)

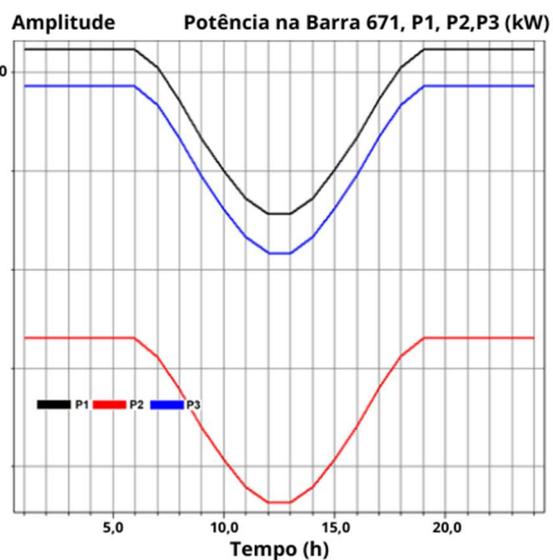
Com a conexão do sistema de geração em potência equivalente a potência nominal das cargas há uma leve variação nos valores de tensão, no entanto, eles se mantêm nos limites que enquadram a rede como adequada. Mas quando se chega no outro cenário em que a potência do gerador fotovoltaico foi dobrada, o valor da tensão na Fase 2 subiu para 1,0581 pu, que nos valores da Tabela da ANEEL coloca a rede em classificação de qualidade crítica, demonstrando assim o efeito de se conectar um sistema com potência acima da necessária.

Na Figura 20 estão os valores da Potência na rede sem a conexão do sistema de geração de 100 % da potência das cargas. Este sistema é conectado e a curva que indica isso é a da Figura 21. Já na Figura 22, é mostrada potência após a inclusão de um sistema com o dobro da potência das cargas.

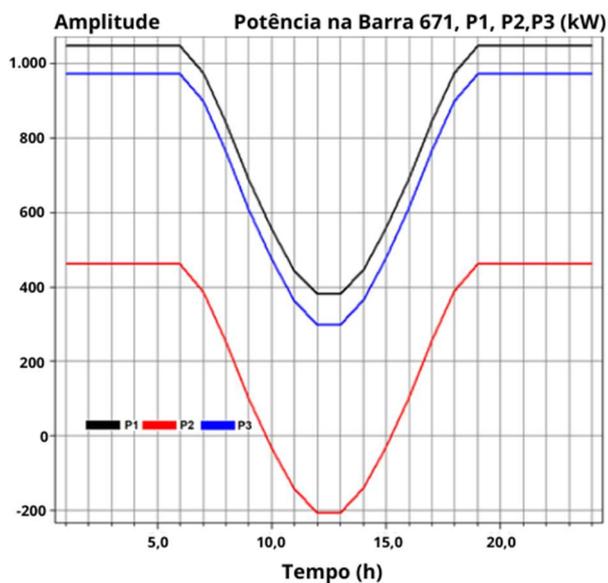
**Figura 20** – Curva de Potência na barra 671 sem sistema fotovoltaico



**Figura 21** – Curva de Potência na barra 671 com sistema fotovoltaico potência ideal



**Figura 22** – Curva de Potência na barra 671 com sistema fotovoltaico com o dobro da potência ideal.



Fonte: Autor (2023)

**Tabela 11** – Valores da Potência nas etapas de simulação na barra 671

Barra	Fase	Sem GD		Com GD 100 %		Com GD Dobro	
		P (kW)	FP	P (kW)	FP	P (kW)	FP
671	1	1.118,3000	0,9294	545,1000	0,9742	396,2570	0,8806
	2	471,8000	0,9843	171,2000	-0,3992	-203,2000	0,8550
	3	984,7000	0,9671	417,8000	0,9920	301,5830	0,8693

Fonte: Autor (2023)

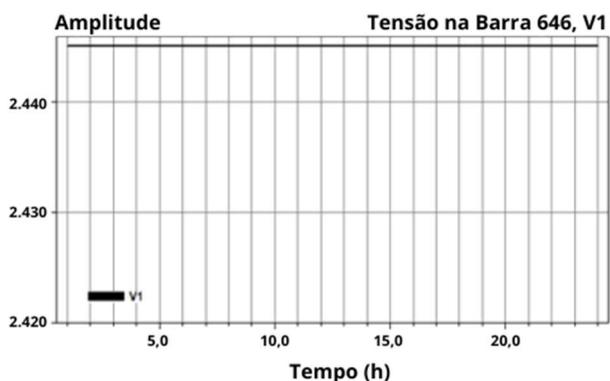
Observando os valores de potência na Barra 671 na situação em que a geração cobre 100 %, observa-se na Fase 2 que o fator de potência está negativo, reduzindo a eficiência e a qualidade da energia no sistema elétrico. Quando a potência é dobrada, novamente é visto um comportamento diferente que é a potência com um valor negativo, neste caso é necessário lembrar que quando o valor da Potência Ativa é positivo, indica que a energia flui da rede de distribuição para a carga e quando a potência é negativa a energia flui em sentido contrário, ou seja, é notável que com a inserção da geração fotovoltaica houve um fluxo inverso de energia. Ela fluiu das barras onde estão as cargas para o transformador do alimentador no momento em que a geração superou a demanda. Esse fato fez com que a tensão se elevasse.

## 4.2 Testes na Barra 646

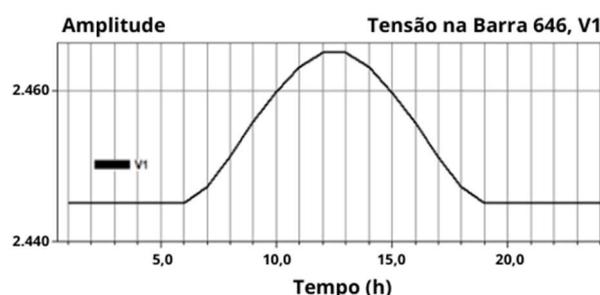
Como já foi mostrado o gráfico da tensão em uma barra 671 que possui caráter industrial, agora será verificado o da Barra 646 que tem caráter residencial, possibilitando um comparativo de duas conjunturas na mesma rede. Além da questão da categoria de consumo, a 671 é trifásica e a 646 é monofásica, dá para analisar questões diferentes referentes ao comportamento inicial das tensões e a progressão dos sistemas fotovoltaicos na rede.

O momento anterior a instalação do gerador com a potência ideal, que é a de 100 % da potência das cargas, está representado na Figura 23 e o momento após essa instalação está na Figura 24.

**Figura 23** – Curva de Tensão barra 646 sem sistema fotovoltaico.



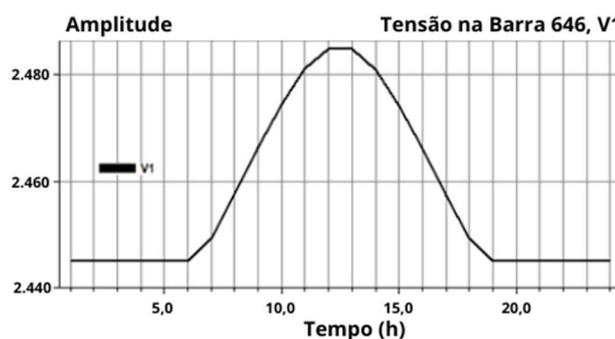
**Figura 24** – Curva de Tensão barra 646 no sistema fotovoltaico com potência ideal.



Fonte: Autor (2023).

No caso da barra 646, a curva nas duas Fases é acentuada e similar, embora ambos tenham valores de tensão diferentes mediante às cargas que estão vinculadas a cada Fase. Ao se buscar inserir GD no sistema, o abastecimento das cargas pode ser dimensionado para ser suprido de forma parcial ou integral pela geração local, dessa forma o fluxo no alimentador pode ser diminuído, bem como a queda de tensão na sua extensão. No cenário da Figura, esta curva foi obtida após ser incluído um gerador com 200 % da potência necessária para as cargas.

**Figura 25** – Curva de Tensão barra 646 com sistema fotovoltaico dobro potência ideal.



Fonte: Autor (2023).

Com isso, o módulo da tensão nas barras da rede de distribuição pode aumentar com a presença de GD. Em situações de fluxo reverso local, a tensão na barra com GD e em barras vizinhas pode aumentar. No caso de fluxo reverso até a

subestação o nível de tensão tende a aumentar em todas as barras do alimentador (CORRÊA, 2021).

Na Tabela 12 estão os valores obtidos com os testes na barra 646, o aumento gradativo da potência fotovoltaica instalada na mesma. Foi considerado um sistema fotovoltaico conectado somente na barra 646, a qual tem uma carga monofásica de 230 kW nas Fases 2 e 3. Esta barra foi escolhida pois dentre as outras residenciais ela apresentou maior carregamento.

**Tabela 12** – Valores da Potência nas etapas de simulação na barra 646

Barra	Fase	Sem GD		Com GD 100 %		Com GD Dobro	
		VLN (kV)	pu	VLN (kV)	pu	VLN (kV)	pu
<b>646</b>	2	2,4450	1,018	2,4680	1,0276	2,4985	1,0403

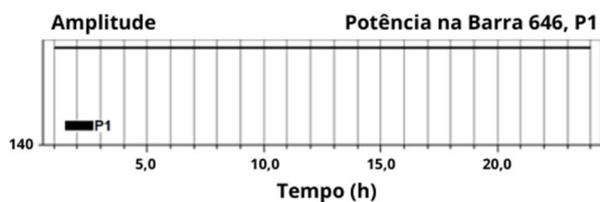
Fonte: Autor (2023).

Os valores de tensão sofrem um leve crescimento nas situações propostas, mas continuam se mantendo nos limites que classificam a qualidade da rede como adequada, isso significa que mesmo tendo impactado na tensão da rede, as potências inseridas não chegaram a resultar em um crescimento suficientemente crítico. Neste caso a inclusão do sistema com carga dobrada ainda é benéfico, mas caso sejam colocadas outras instalações na mesma região o impacto poderá se tornar insatisfatório sobrecarregando a rede.

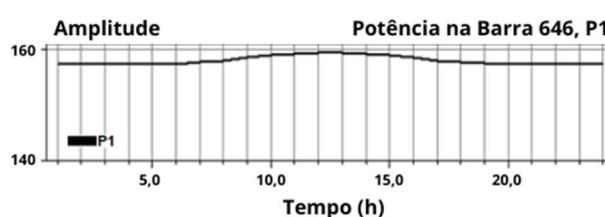
Quanto aos valores de potência alcançados as curvas apresentaram comportamento menos intenso que as Fases na barra 671, mas isso faz sentido já que sua potência é direcionada para apenas 7,04 % da carga ativa da rede elétrica.

Seguindo as mesmas situações da tensão, as curvas de potência nas Figuras 26, 27 e 28, é a partir dos testes em que primeiro se vê a curva da potência sem o sistema, depois com o sistema a 100 % da carga e por depois a 200 %.

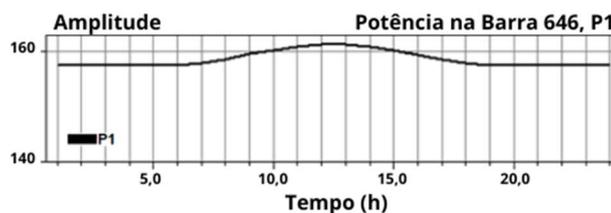
**Figura 26** – Curva da Potência na barra 646 sem sistema fotovoltaico.



**Figura 27** – Curva da Potência na barra 646 com sistema fotovoltaico ideal.



**Figura 28** – Curva da Potência na barra 646 com sistema fotovoltaico dobro da potência ideal.



Fonte: Autor (2023).

**Tabela 13** – Valores da Potência nas etapas de simulação na barra 646.

Barra	Fase	Sem GD		Com GD 100 %		Com GD Dobro	
		P (kW)	FP	P (kW)	FP	P (kW)	FP
<b>646</b>	2	148,2340	0,941766	157,4000	0,9715	162,0150	1,0000

Fonte: Autor (2023).

Nos valores do Fator de Potência é possível observar que ele vai crescendo até atingir um valor unitário. Quando isso acontece, significa que quanto mais próximo de um é o valor do Fator de Potência, menor é o consumo de energia reativa em relação à energia ativa.

Então, neste caso, ao invés de prejudicar a qualidade da rede a instalação foi benéfica, pois a energia ativa é a que é responsável pela execução das tarefas, reduzindo a energia reativa o sistema se torna mais eficiente. Embora nessa conexão tenha sido obtido esse resultado, isso não significa que em todos os casos de conexões em circuitos monofásicos a conexão fotovoltaica trará bons resultados.

### 4.3 Testes no Transformador Principal

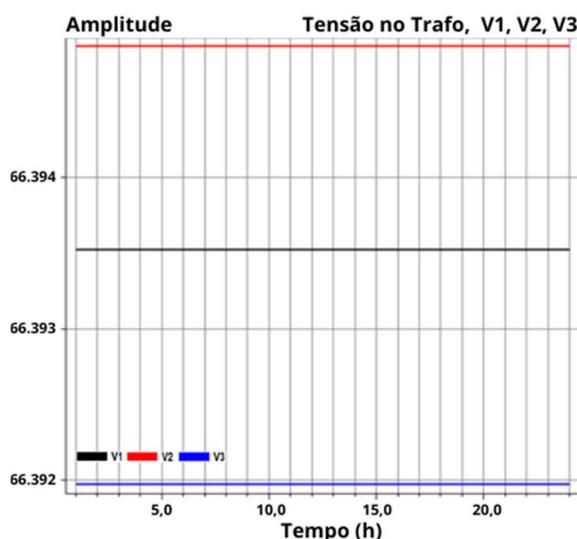
Agora, serão analisadas as curvas e os valores obtidos com a verificação do funcionamento do Transformador ao qual as duas barras estão ligadas. Neste

caso, foi feito o antes, sem a conexão da geração distribuída nas barras, e o depois em que havia a conexão nas duas barras ao mesmo tempo. Lembrando que para a análise das barras os testes foram realizados separadamente. O transformador subestação, é o primeiro do sistema e recebe a conexão dos outros que se localizam em diferentes pontos do sistema elétrico teste, e recebe também a conexão de outras barras. Por ser interligado com tantos outros componentes, ao analisar o comportamento dos parâmetros em estudos neste ponto, será possível obter uma visão mais geral do desempenho do sistema teste.

Juntos, os dois geradores fotovoltaicos correspondem a 42,4 % da Carga Instalada de todo o sistema, portanto, é importante que se avalie como ficam os parâmetros de tensão, fluxo de potência e o fator de potência do transformador que os alimenta, inclusive avaliar se houve ou não impacto negativo com a conexão nas barras. Da mesma maneira que foram feitas as análises das barras, as 3 situações são colocadas para as curvas, mas aqui serão mantidas as duas barras para que se veja qual o impacto elas terão no transformador o qual estão conectadas quando os geradores estão funcionando nas duas.

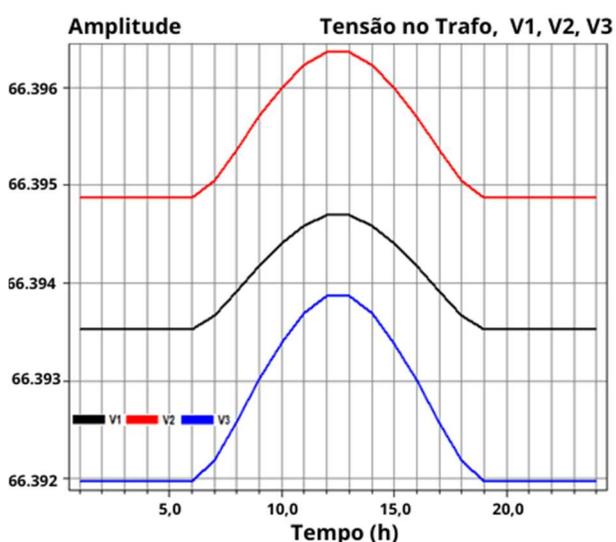
Nas Figuras 29 e 30, são respectivamente, a tensão no transformador com as duas barras nos cenários propostos para os testes.

**Figura 29** – Curva de Tensão no Transformador sem sistema fotovoltaico.



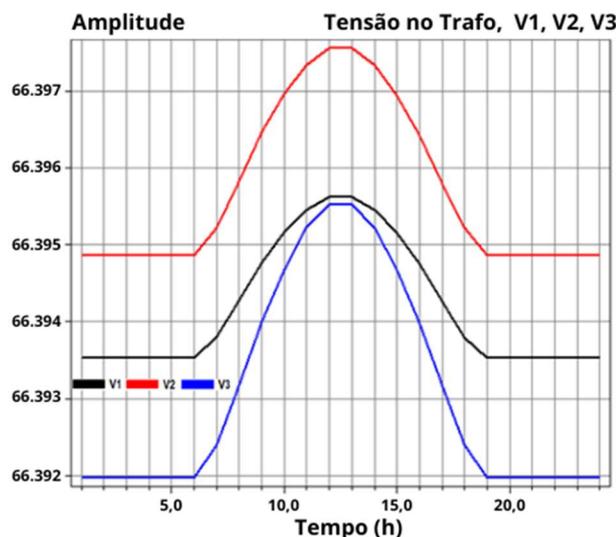
Fonte: Autor (2023).

**Figura 30** – Curva de Tensão no Transformador com sistema fotovoltaico na potência ideal.



Na Figura 31 a proposta foi colocar o dobro da potência para satisfazer o consumo das cargas.

**Figura 31** – Curva de Tensão no Transformador com sistema fotovoltaico no dobro da potência ideal.



Fonte: Autor (2023)

Tabela 14 – Valores da Tensão do Transformador conectado às barras

	Fase	Sem GD		Com GD 100 %		Com GD Dobro	
		VLN (kV)	pu	VLN (kV)	Pu	VLN (kV)	pu
<b>TRAFO</b>	1	66,3935	0,999953	66,3946	0,99997	66,39560	0,99999
	2	66,3960	0,999991	66,3964	0,99999	66,39750	1,00001
	3	66,3919	0,9999	66,3948	0,99995	66,39550	0,99998

Fonte: Autor (2023)

Conforme demonstrado, ao adicionarmos sistemas fotovoltaicos em 100 % na totalidade da potência da rede, a tensão mostra um comportamento crescente de forma crescendo notável nas tensões dos pontos residenciais e industriais, com variações em suas Fases, especialmente nos horários de maior incidência solar.

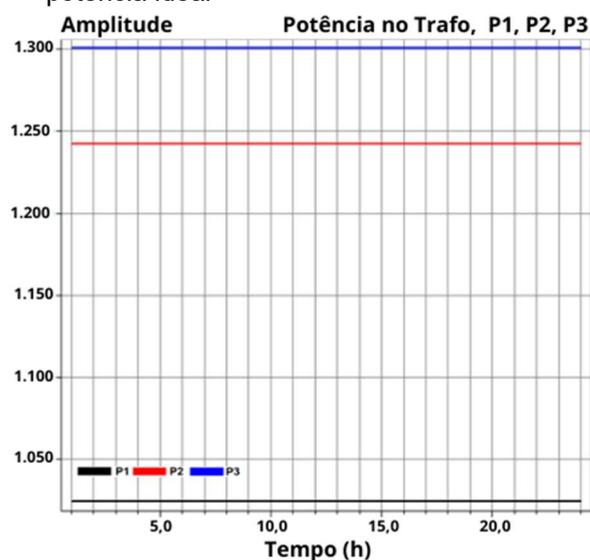
Houve um crescimento no valor, mas esse crescimento se deu de forma pequena em todas as etapas, até mesmo quando a potência dos geradores foi dobrada, se mantendo na classificação da ANEEL como rede adequada. Um ponto interessante foi o crescimento mais acentuado na curva da Fase 3. Ela se comportou dessa forma por conta da quantidade de conexões de cargas nesta Fase, enquanto

há barras que não se conectam a Fase 1 ou 2, há conexões de cargas da maioria das barras na Fase 3.

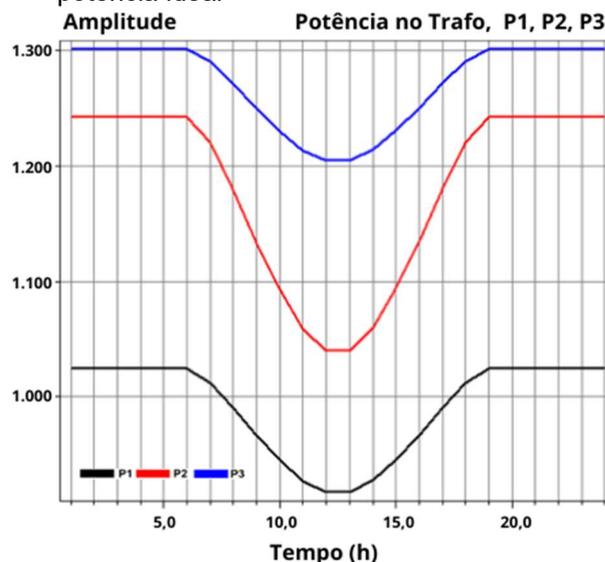
Quanto a frequência da variação da tensão, pelas curvas, não houveram variações muito abruptas na tensão em relação a geração em instantes de tempo consecutivos, caso essa variação seja muito abrupta ou ocorra frequentemente, é capaz de gerar problemas na operação do sistema de distribuição, não só isso como promover a danificação dos equipamentos da rede. Essas variações são mais observadas em análises em curto intervalo de tempo devido a intermitência de geração.

Em relação às curvas da potência ativa medidas no transformador da subestação mesmo os geradores não injetando potência reativa no sistema elétrico, eles influenciam na sua distribuição, uma vez que alteram o fluxo de correntes e as tensões nodais no sistema elétrico

**Figura 32** – Curva de Potência no Transformador sem sistema fotovoltaico na potência ideal

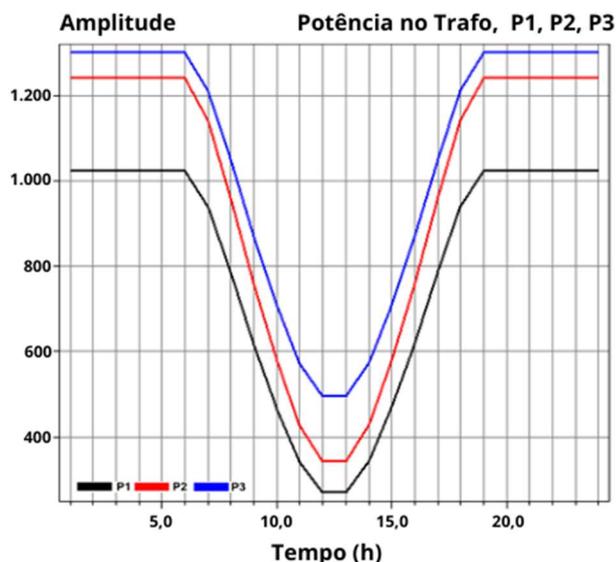


**Figura 33** – Curva de Potência no Transformador com sistema fotovoltaico na potência ideal



Fonte: Autor (2023).

**Figura 34** – Curva de Potência no Transformador com sistema fotovoltaico no dobro da potência ideal.



Fonte: Autor (2023)

**Tabela 15** – Valores da Potência do Transformador conectado às barras.

	Fase	Sem GD		Com GD 100 %		Com GD Dobro	
		P (kW)	FP	P (kW)	FP	P (kW)	FP
<b>TRAFO</b>	1	1.010,00	0,8581	910,30	0,85810	340,70	0,85810
	2	1.240,00	0,9475	1.040,84	0,94750	370,90	0,94750
	3	1.301,00	0,8793	1.205,60	0,87930	500,60	0,87930

Fonte: Autor (2023).

À medida que a energia injetada aumenta, a potência ativa no Transformador diminui, isso quer dizer que menos energia está sendo repassada do transformador para os consumidores, mas este nível não chegou a ser ultrapassado, logo, não foi gerado fluxo reverso de potência para o transformador com a conexão geral. Tanto é que o Fator de Potência é mantido nas 3 situações.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente utilização de Sistemas Fotovoltaicos perante sua viabilidade econômica, bem como por ser uma fonte de energia renovável e há projeções que esse crescimento continue. Deste modo, o estudo do sistema de distribuição em um cenário em que há uma quantidade elevada de sistemas fotovoltaicos é importante, pois ao demonstrar que isso é prejudicial ao sistema elétrico, possibilita-se que sejam feitos planejamentos para uma operação correta a fim de proporcionar o fornecimento de energia de qualidade.

A ideia do presente trabalho foi de avaliar, através de simulações, como a inclusão de sistemas fotovoltaicos na rede convencional pode interferir no funcionamento desta, principalmente no que se refere ao aumento da tensão, causando problemas de sobretensão.

Além da simulação no software, *OpenDSS* em que foram produzidas as curvas que mostram como varia a tensão nas barras, quando o sistema fotovoltaico é inserido em uma barra que tem perfil residencial, que é a 646, e quando é em uma barra com perfil industrial, que é a 671.

Por meio destas verificações, fica evidente que à medida que a geração distribuída é aplicada, a variação da tensão acaba sendo acentuada, mas é claro que cada alimentador tem suas individualidades, tais como os condutores, distribuição de carga, potência de geração, quais são os equipamentos que estão conectados. Todas essas variáveis interferem no comportamento do sistema e nos seus níveis de penetração na rede, deste modo, em situações reais o ideal é que sejam feitas análises caso a caso para garantir segurança operacional das redes.

Por isso que para se obter êxito na instalação deve haver uma preocupação e um estudo prévio que define a penetração e o balanceamento desses recursos em cada trecho da rede, levando em consideração a sua qualidade, a quantidade de geração fotovoltaica e os pontos a serem instalados. A influência que os painéis têm sobre a rede são de tamanha importância para o comportamento de uma rede elétrica. A potência de instalação de painéis em áreas industriais, são de grande relevância e

demonstraram influenciar em todo comportamento da rede, mesmo em pontos distantes.

De forma geral, é possível dizer que o objetivo de demonstrar o comportamento da rede com as conexões fotovoltaicas e o que essas conexões provocam na qualidade da rede foi atingido, uma vez que por meio das simulações no *OpenDSS* obtiveram-se resultados interessantes do desempenho dos sistemas de distribuição sob diversas condições de potência fotovoltaica injetada e ainda vistoriar se mesmo com as conexões seria possível que a rede do sistema teste fosse mantida nos padrões de qualidade da Agência Nacional de Energia Elétrica.

A escolha dos cenários estudados, sem conexão, conexão com potência igual à da carga e a conexão com o dobro da potência de carga, durante as simulações, foi considerada adequada, pois permitiu que os estudos fossem realizados seguindo uma ordem crescente de dificuldade e mostrar que à medida que a potência aplicada cresce a tensão também, até o ponto que pode passar dos limites normativos de qualidade de energia e prejudicando a operação da rede de distribuição.

Para mitigar esses problemas é necessário que sejam analisados alguns pontos. Uma possibilidade é realocação dos sistemas entre Fase, no caso de conexões em consumidores Trifásicos ou Bifásicos, para que não haja desequilíbrio de tensão entre uma Fase e outra. Outro ponto seria que as concessionárias de energia buscassem reajustar a estrutura da sua rede de distribuição, incluindo mais transformadores e linhas de distribuição com seções nominais maiores para que suportem o fluxo de potência, entre outras formas de melhorias.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. **Distributed Generation: A Definition**. *Electric Power Systems Research*. 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779601001018?via%3Dihub>. Acesso em: 23, Jan. 2023.

ALFONSO T. O. S., **Análise Sistêmica do Impacto da Geração Distribuída no Sistema de Distribuição de Energia**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2021. Disponível em: <https://energiasroraima.com.br/wp-content/uploads/2022/04/001125930-1.pdf>. Acesso em: 20, Jan. 2023.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Dados de Geração Distribuída (PowerBI)**. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxliwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 15 de jul. de 2022.

ANEEL, Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica. 2. ed – Brasília: ANEEL, 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida+-+2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161>. Acesso em: 11 fev. 2023.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8**, pp. 1-88. 2018. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>. Acesso em: 18, Jan. 2023.

BARRETTO, E. P. B. M., **Smart Grid: Eficiência Energética e a Geração Distribuída a Partir das Redes Inteligentes**, Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2018. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10024546.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2023.

BARROS, B. F; GEDRA, R. L., BORELLI, R., **Geração, Transmissão, Distribuição e Consumo de Energia Elétrica**, Editora Érica, 2014.

CHIPMAN, R. A. **Teoria e problemas de linhas de transmissão**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1972

CORRÊA, C. S. **Análise do Impacto da Geração Distribuída Fotovoltaica em Sistemas de Distribuição Utilizando Múltiplos Cenários de Geração com Discretização Intra-horária**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Ciência E Tecnologia De Santa Catarina – Escola Politécnica, Graduação em Engenharia Elétrica, 2021.

*Electric Power Research Institute. OpenDSS PVSystm Element Model Version 1*. 2011. Disponível em:

<https://sourceforge.net/p/electricdss/discussion/861977/thread/7cc53d82/d60d/attachment/OpenDSS%20PVSystem%20Model.pdf>. Acesso em: 18, Jan. 2023.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Resenha Mensal: O consumo nacional de eletricidade em dezembro foi 42.937 GWh, o maior valor para o mês em toda a série histórica, desde 2004.** Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/resenha-mensal-o-consumo-nacional-de-eletricidade-em-dezembro-foi-42-937-gwh-o-maior-valor-para-o-mes-em-toda-a-serie-historica-desde-2004>>. Acesso em: 15 de jul. de 2022.

FALCÃO, D. M. **Impacto da mini e microgeração distribuída nas redes de distribuição de energia elétrica.** Espaço IEEE, Setembro 2013. Disponível em: <[http://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/EspacoIEEE\\_set2013.pdf](http://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/EspacoIEEE_set2013.pdf)>. Acesso em: 23 mar. 2023.

FUCHS, R. D. **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas, teoria das linhas em regime permanente.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.

FUCHS, R. D. **Transmissão de energia elétrica: Linhas Aéreas. V. 1.** Rio de Janeiro: LTC, 1977.

INTERENERGIA. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Disponível: <https://interenergia.com.br/single-post/2016/07/10-vantagens-da-geracao-distribuida-de-energia/> Acesso: 23 de mar. de 2023

JEWELL, W.; RAMAKUMAR, R. **The Effects Of Moving Clouds On Electric Utilities With Dispersed Photovoltaic Generation.** IEEE Transactions on Energy Conversion, 1987.

JÚNIOR, J. D. A. **Análise de microgeração fotovoltaica em um sistema de distribuição utilizando o OpenDSS.** Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia De Energia, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, 2016.

JUNIOR, L. C. R. **Inversores Inteligentes em Sistemas Fotovoltaicos para Controle Integrado de Funções Utilizando o OpenDSS.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, 2018.

KAGAN, N; DE OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.** São Paulo: Blucher, 2005.

KIMPARA, M. **Princípios de Eletricidade e Eletrônica: Introdução ao Sistema Elétrico.** Universidade Federal de Mato Grosso do Sul FAENG / Engenharia Elétrica Campo Grande – MS, 2014. Disponível em: <https://docplayer.com.br/2736385-Introducao-ao-sistema-eletrico.html>. Acesso em: 12, Jan. 2023.

LUZ SOLAR. Disponível em: <https://luzsolar.com.br/como-funciona-o-sistema-fotovoltaico/> Acesso em: 23 de mar. de 2023.

MACHADO, M. F. S. O., **Tutorial para Aplicação do Software OpenDSS na Análise de Redes de Distribuição de Energia Elétrica.** Universidade Federal do Maranhão,

Centro de Ciências Exatas e Tecnologias, Departamento de Engenharia Elétrica, 2017.

MARQUES, V. C. **Regulação de Tensão com Injeção de Potência Reativa de Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Monofásica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, 2019.

MCT. Tecnologias Disponíveis. Ministério da Ciência e Tecnologia. <http://www.mct.gov.br> (disponível em outubro de 2005).

MDPI, **Open Access Journals**. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/17/6473>. Acesso em: 23 de mar. de 2023.

NUNES, E. A. F. **Análise de Impactos na Rede de Distribuição de Energia Elétrica decorrentes da inserção de Sistemas de Geração Fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, 2017.

PASSEY, R. *et al.* **The Potential Impacts Of Grid-Connected Distributed Generation And How To Address Them: A Review Of Technical And Non-Technical Factors**. Energy Policy, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2011.

PERIN, A. J. *et al.* **Sistema Inteligente de Armazenamento de Energia e Gerenciamento de Demanda para Aplicações de Pequeno Porte com Integração de Geração Distribuída e Conexão para Veículos Elétricos**. Relatório Técnico de Projeto de P&D. Florianópolis: CERTI, 2020.

PEREIRA, N. X., **Desafios e Perspectivas da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Geração Distribuída Vs Geração Centralizada**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, São Paulo, 2019.

PROCEL; ELETROBRAS. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso, ano base 2005: classe Residencial Relatório Brasil - Sumário Executivo**. Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2009.

RADIASOL 2013, Versão 2.1, Laboratório de Energia Solar da UFRGS, 2013.

Redes de energia elétrica, tipos e características. **Mundo da Elétrica**. 2016. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/redes-de-energia-eletrica-tipos-e-caracteristicas/>. Acesso em: 12, Jan. 2023.

K. P. Schneider, B. A. Mather, B. C. Pal, C. W. Ten, G. J. Shirek, H. Zhu, J. C. Fuller, J. L. R. Pereira, L. F. Ochoa, L. R. de Araujo, R. C. Dugan, S. Matthias, S. Paudyal, T. E. McDermott, and W Kersting, “**Analytic Considerations and Design Basis for the IEEE Distribution Test Feeders**,” **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2017.

SHAYANI, R. A. **Método Para Determinação Do Limite De Penetração Da Geração Distribuída Fotovoltaica Em Redes Radiais De Distribuição**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

SILVA, Ruan C. R. et al. **Controle Coordenado de Tensão em Alimentadores com Elevado Grau de Penetração de Geração Fotovoltaica na Baixa Tensão**. Anais do VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Rio Grande do Norte, 2015.

TECNOGERA. **Funcionamento da linha de transmissão de energia**. Disponível em: <<http://www.tecnogera.com.br/blog/como-funcionam-linhas-de-transmissao-deenergia-eletrica/>>. Acesso em: 16 jan. 2023.

TONKOSKI, R.; LOPES, L. A. C. **Voltage Regulation in Radial Distribution Feeders with High Penetration of Photovoltaic**. IEEE Energy 2030 Conference, Atlanta, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2008.

TONKOSKI, R.; LOPES, L. A. C.; EL-FOULY, T. H. M. **Coordinated Active Power Curtailment of Grid Connected PV Inverters for Overvoltage Prevention**. IEEE Transactions on Sustainable Energy, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2011.

TOSTES, M. E. L. Distribuição de Energia Elétrica. **Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação**. Notas de aula do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, 2007.

TREVISAN, A. S. **Efeitos da Geração Distribuída em Sistema de Distribuição de Baixa Tensão**. Tese de Mestrado, UFPR, Curitiba, 2011.

VASCONCELOS, F. M., **Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica**, Editora e Distribuidora Educacional S.A., Londrina, 2017. Disponível em: [http://cm-kl-content.s3.amazonaws.com/201702/INTERATIVAS\\_2\\_0/GERACAO\\_TRANSMISSAO\\_E\\_DISTRIBUICAO\\_DE\\_ENERGIA\\_ELETRICA/U1/LIVRO\\_UNICO.pdf](http://cm-kl-content.s3.amazonaws.com/201702/INTERATIVAS_2_0/GERACAO_TRANSMISSAO_E_DISTRIBUICAO_DE_ENERGIA_ELETRICA/U1/LIVRO_UNICO.pdf). Acesso em: 12, Jan. 2023.

VICENTE, I. **Análise Dos Problemas De Tensão Decorrentes Da Alta Penetração De Sistemas Fotovoltaicos**. Florianópolis: Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia De Santa Catarina – Câmpus Florianópolis Departamento Acadêmico De Eletrotécnica Graduação Em Engenharia Elétrica, 2021.

WEATHER. Disponível em: <https://weather.com/> Acesso em: 15 de dezembro de 2022.

YAN, R.; SAHA, T. K. **Investigation of Voltage Imbalance Due to Distribution Network Unbalanced Line Configurations and Load Levels**. IEEE Transactions on Power Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2013.

YANG, Y.; BLAABJERG, F.; WANG, H.; SIMÕES, M. G. **Power Control Flexibilities For Grid-Connected Multi-Functional Photovoltaic Inverters**. IET Renewable Power Generation, 2016.