



**UNILAB**

**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL INTERNACIONAL DA  
LUSOFONIA AFRO-BRASILEIRA  
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS**

**DANIEL SILVESTRE SANHÁ**

**ANÁLISE DOS IMPACTOS HARMÔNICOS GERADOS PELOS INVERSORES NA  
CONEXÃO ENTRE A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA E A REDE DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**REDENÇÃO**

**2022**

DANIEL SILVESTRE SANHÁ

ANÁLISE DOS IMPACTOS HARMÔNICOS GERADOS PELOS INVERSORES NA  
CONEXÃO ENTRE A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA E A REDE DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Energias .

Orientador: Prof. Dr. Sabi Yari Moïse Bandiri

REDENÇÃO

2022

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Sistema de Bibliotecas da UNILAB  
Catalogação de Publicação na Fonte.

---

Sanha, Daniel Silvestre.

S226a

Análise dos impactos harmônicos gerados pelos inversores na conexão entre a geração distribuída fotovoltaica e a rede de distribuição de energia elétrica / Daniel Silvestre Sanha. - Redenção, 2022.

46f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2022.

Orientador: Prof.º DR.º Sabi Yari Moïse Bandiri.

1. Distorção harmônica. 2. Energia elétrica - Distribuição. 3. Sistemas de energia fotovoltaica. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 621.312

---

DANIEL SILVESTRE SANHÁ

ANÁLISE DOS IMPACTOS HARMÔNICOS GERADOS PELOS INVERSORES  
NA CONEXÃO ENTRE A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA E A REDE  
DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia de  
energias do Instituto de Engenharias e  
Desenvolvimento Sustentável da Universidade  
da Integração Internacional da Lusofonia Afro-  
brasileira, como requisito parcial à obtenção do  
grau de Bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
gov.br SABI YARI MOISE BANDIRI  
Data: 18/02/2022 00:40:53-0300  
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr. Sabi Yari Moïse Bandiri (Orientador)  
Universidade da Integração Internacional da  
Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Documento assinado digitalmente  
Ramon Mayor Martins  
Data: 18/02/2022 08:55:11-0300  
CPF: 052.866.756-46  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Msc. Ramon Mayor Martins  
Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)

Documento assinado digitalmente  
gov.br REJANE FELIX PEREIRA  
Data: 18/02/2022 16:45:24-0300  
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dra. Rejane Felix Pereira  
Universidade da Integração Internacional da  
Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Dedico este trabalho aos meus Pais. Pai e Mãe tenho certeza que seja onde for que vocês se encontram, estariam orgulhosos desta conquista. Porque os vossos sacrifícios resultaram na formação de um homem com potencialidades ilimitadas.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida e pela oportunidade de frequentar o ensino superior no Brasil. Graças a Deus consegui suportar todos os obstáculos e adversidades durante esta longa jornada.

Aos meus Pais, Silvestre Sanhá e Isabel Carlitos Gomes Sanhá, por todo afeto, educação, proteção e por estiverem sempre comigo nos bons e maus momentos. Nunca esqueceram de mim nas suas orações.

Ao governo Brasileiro, pelo cumprimento da cooperação solidária no âmbito da educação entre as nações que integram a CPLP, e pela contribuição direta na minha formação.

Aos meus irmãos, Elias Silvestre Sanhá e Lucas Silvestre Sanhá, pelos conselhos, direcionamentos e apoios incondicionais.

A minha namorada, Ivanessa Da Silveira Moura, por todo o amor, companheirismo e pela maravilhosa atitude de apoiar os meus estudos em todos os sentidos.

Ao meu excelentíssimo orientador, Professor Dr. Sabi yari Moïse Bandiri, pela incrível paciência, disponibilidade e facilidade de ensinar todos os assuntos necessários à elaboração deste trabalho.

Agradeço toda a equipe da (IEDS) Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), Pelos ensinamentos não apenas na área da engenharia, mas também pelas instruções para vida em geral.

Aos meus amigos e amigas que numa forma direta ou indiretamente contribuíram para a materialização deste gigantesco sonho.

“O sonho é que leva a gente para frente. Se a gente for seguir a razão, fica aquietado, acomodado.”

(Ariano Suassuna)

## RESUMO

O presente trabalho apresenta a preocupação quanto a qualidade de energia afetada pela inserção dos sistemas fotovoltaicos nas redes de distribuição. A qualidade de energia é uma das maiores preocupações ao nível mundial. Os sistemas elétricos investem incessantemente nos projetos e pesquisas para minimizar os problemas para com a geração, transmissão e distribuição de energia, e conseqüentemente melhorar a eficiência energética. As redes de distribuição apresentam cada vez mais novos desafios as mudanças nas suas configurações. A inserção de novos sistemas fotovoltaicos conetados à rede de distribuição chamados, Geração Distribuída (GD) podem causar muitos problemas ao sistema, entre eles está a distorção harmônica gerada pelos inversores na conexão entre a Geração Distribuída Fotovoltaico (GDFV) e o sistema de distribuição. Os inversores que eventualmente fazem a conversão da energia gerada em corrente contínua para corrente alternada, produzem harmônicos, e a presença dos harmônicos no sistema de distribuição causa danos nos equipamentos e nas instalações elétricas em geral, e compromete a qualidade de energia entregue aos consumidores. Por isso, este trabalho propõe uma análise sobre a influência da distorção harmônica resultante da conexão entre o sistema fotovoltaico e a rede distribuição. Também, foi evidenciado as normas técnicas nacionais e internacionais como diretrizes para um procedimento eficiente. Para tal, a metodologia seguida foi a revisão bibliográfica, e com isso, foi possível analisar a influencia da distorção harmônica na qualidade elétrica. Uma alternativa viável para mitigar tais impactos seria a instalação dos filtros harmônicos, que, de uma maneira geral têm a capacidade de receber o conteúdo de alta frequência devido ao chaveamento e assim dar a característica senoidal para a tensão, que na sequência passa pelo transformador de acoplamento.

Palavra-chaves: Distorção harmônica. Qualidade de Energia. Redes de Distribuição.



## ABSTRACT

The present work presents the concern about the quality of energy affected by the insertion of photovoltaic systems in the distribution networks. Power quality is one of the biggest concerns worldwide. Electric systems invest incessantly in projects and research to minimize problems with the generation, transmission and distribution of energy, and consequently improve energy efficiency. Distribution networks present more and more new challenges due to changes in their configurations. The insertion of new photovoltaic systems connected to the distribution grid called GD can cause many problems to the system, among them is the harmonic distortion generated by the inverters in the connection between the GDFV and the distribution system. The inverters that eventually convert the energy generated from direct current to alternating current, produce harmonics, and the presence of harmonics in the distribution system causes damage to equipment and electrical installations in general, and compromises the quality of energy delivered to consumers. Therefore, this work proposes an analysis of the influence of harmonic distortion resulting from the connection between the photovoltaic system and the distribution network. Also, national and international technical standards were evidenced as guidelines for an efficient procedure. For this, the methodology followed was the literature review, and with that, it was possible to analyze the influence of harmonic distortion on electrical quality. A viable alternative to mitigate such impacts would be the installation of harmonic filters, which, in general, have the ability to receive the high frequency content due to switching and thus give the sinusoidal characteristic to the voltage, which then passes through the voltage transformer coupling.

**Keyword:** Harmonic distortion. Power Quality. Distribution Networks.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Perfil da energia solar no Brasil. . . . .   | 20 |
| Figura 2 – Perfil da energia solar na Alemanha. . . . .   | 21 |
| Figura 3 – Sistema fotovoltaico isolado. . . . .  | 22 |
| Figura 4 – Sistema fotovoltaico conetado a rede. . . . .  | 23 |
| Figura 5 – Diagrama unifilar. . . . .   | 25 |
| Figura 6 – Interconexão das redes no sistema elétrico de potência. . . . .                              | 27 |
| Figura 7 – Principais distúrbios associados a tensão. . . . .   | 28 |
| Figura 8 – Representação da distorção harmônica. . . . .  | 29 |
| Figura 9 – Inversores fotovoltaicos trifásicos. . . . .   | 33 |
| Figura 10 – Ordem harmônica. . . . .  | 35 |
| Figura 11 – Estrutura de <i>OpenDSS</i> . . . . .   | 37 |
| Figura 12 – Modelo <i>PvSystem</i> no <i>OpenDSS</i> . . . . .  | 38 |
| Figura 13 – Subestação Acarape-CE. . . . .  | 40 |
| Figura 14 – Diagrama unifilar da rede IEEE-13 barras. . . . .   | 41 |
| Figura 15 – Taxas de distorção harmônica das correntes de cada fase para o cenário 1 às<br>17h. . . . . | 42 |
| Figura 16 – Taxas de distorção harmônica das correntes de cada fase para o cenário 2 às<br>17h. . . . . | 43 |

## **LISTA DE TABELAS**

- Tabela 1 – Limites para distorção harmônica de tensão de acordo com PRODIST módulo 8. 30
- Tabela 2 – Limites para distorção harmônica das componentes de corrente-IEEE-519. . 31

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|         |   |
|---------|---|
| ANEEL   | Agência Nacional de Energia Elétrica              |
| GD      | Geração Distribuída                               |
| GDFV    | Geração Distribuída Fotovoltaico                  |
| IEEE    | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| ONS     | Operador Nacional do Sistema                      |
| PIB     | Produto Interno Bruto                             |
| PRODIST | Procedimentos de Distribuição                     |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                           |   |
|---------------------------|---|
| <i>AC</i>                 | Corrente contínua   |
| <i>DC</i>                 | Corrente alternada  |
| <i>DIT<sub>h</sub></i>    | Distorção harmônica individual de tensão  |
| <i>DTT</i>                | Distorção harmônica de tensão   |
| <i>DTT<sub>i</sub></i>    | Distorção harmônica total para as componentes ímpares não múltiplas de 3  |
| <i>DTT<sub>3%</sub></i>   | Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3  |
| <i>DTT<sub>95%</sub></i>  | Valor do indicador de distorção harmônica que foi superado em apenas 5% das leituras Válidas.   |
| <i>DTT<sub>i95%</sub></i> | Valor do indicador de distorção harmônica total de tensão para componentes ímpares não múltiplas de 3 que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas |
| <i>DTTP</i>               | Distorção harmônicas total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3   |
| <i>DTT<sub>p95%</sub></i> | Valor de distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 que foi superado em apenas 5% das 1008 leitura válidas              |
| <i>h</i>                  | Ordem harmônica.  |
| <i>HZ</i>                 | Frequência em hertz   |
| <i>ICC</i>                | Corrente de curto-circuito  |
| <i>I<sub>h</sub></i>      | corrente harmônica  |
| <i>I<sub>1</sub></i>      | corrente fundamental  |
| <i>IL</i>                 | Corrente nominal  |
| <i>kVA</i>                | Quilovoltampere   |
| <i>km</i>                 | Quilômetro  |
| <i>kV</i>                 | Quilovolt   |
| <i>KW</i>                 | Quilowatt   |
| <i>kWh</i>                | Quilowatt-hora  |
| <i>kW<sub>p</sub></i>     | Quilowatt-Pico  |

|             |                                     |
|-------------|-------------------------------------|
| <i>MW</i>   | Megawatt                            |
| <i>Pmp</i>  | Ponto de máxima potência            |
| <i>V</i>    | Tensão em volt                      |
| <i>Vh</i>   | Tensão de ordem harmônica           |
| <i>v1</i>   | Tensão fundamental                  |
| <i>THDv</i> | Distorção harmônica total de tensão |
| <i>THDI</i> | Tensão harmônica total de corrente  |

## SUMÁRIO

|               |  |           |
|---------------|--|-----------|
| <b>1</b>      | <b>INTRODUÇÃO</b>  | <b>15</b> |
| <b>1.1</b>    | <b>Objetivos</b>   | <b>16</b> |
| <i>1.1.1</i>  | <i>Objetivo geral</i>                                      | <i>16</i> |
| <i>1.1.2</i>  | <i>Objetivos específicos:</i>                              | <i>16</i> |
| <b>1.2</b>    | <b>Justificativa</b>                                       | <b>16</b> |
| <b>1.3</b>    | <b>Escopo do Trabalho</b>                                  | <b>17</b> |
| <b>2</b>      | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                               | <b>18</b> |
| <b>2.1</b>    | <b>Energia Solar</b>                                       | <b>18</b> |
| <i>2.1.1</i>  | <i>Energia Solar no Brasil</i>                             | <i>19</i> |
| <i>2.1.2</i>  | <i>Energia Solar na Alemanha</i>                           | <i>19</i> |
| <b>2.2</b>    | <b>Sistema Fotovoltaico</b>                                | <b>21</b> |
| <i>2.2.1</i>  | <i>Sistemas Isolados (Off-Grid)</i>                        | <i>22</i> |
| <i>2.2.2</i>  | <i>Sistemas Conetados à Rede Elétrica (On-Grid)</i>        | <i>22</i> |
| <b>2.3</b>    | <b>Geração Distribuída Fotovoltaica</b>                    | <b>23</b> |
| <b>2.4</b>    | <b>Sistema de Distribuição de Energias</b>                 | <b>24</b> |
| <i>2.4.1</i>  | <i>Subestação</i>  | <i>25</i> |
| <i>2.4.2</i>  | <i>Rede Primária de Distribuição</i>                       | <i>26</i> |
| <i>2.4.3</i>  | <i>Rede Secundária de Distribuição</i>                     | <i>26</i> |
| <b>2.5</b>    | <b>Qualidade de Energia Elétrica (QEE)</b>                 | <b>26</b> |
| <b>2.6</b>    | <b>Distorções Harmônicas</b>                               | <b>28</b> |
| <b>2.7</b>    | <b>Norma Nacional e Recomendação Internacional</b>         | <b>29</b> |
| <i>2.7.1</i>  | <i>ANEEL-Prodinst Modulo 8</i>                             | <i>30</i> |
| <i>2.7.2</i>  | <i>IEEE-519</i>  | <i>31</i> |
| <b>2.8</b>    | <b>Cargas Não Lineares</b>                                 | <b>32</b> |
| <b>2.9</b>    | <b>Inversores</b>  | <b>32</b> |
| <b>2.10</b>   | <b>Representação das Distorções Harmônicas</b>             | <b>33</b> |
| <i>2.10.1</i> | <i>Equação para calcular Distorção harmônica total</i>     | <i>34</i> |
| <b>2.11</b>   | <b>Ordem Harmônica</b>                                     | <b>34</b> |
| <b>2.12</b>   | <b>Impactos Causados pelos Harmônicos na Rede Elétrica</b> | <b>35</b> |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 2.13   | <b>Métodos para Detecção e Controle da Distorção Harmônica Gerados pelo Sistema Fotovoltaico conetado à Rede . . . . .</b> | 36 |
| 2.14   | <i>OpenDSS</i> . . . . .   | 37 |
| 2.14.1 | <i>PvSystem</i> . . . . .  | 37 |
| 2.15   | <b>Espectro de Frequência Curvas de Temperatura e Irradiação . . . . .</b>   | 38 |
| 2.15.1 | <i>Espectro De Frequência</i> . . . . .  | 38 |
| 2.15.2 | <i>Irradiação e Temperatura</i> . . . . .  | 38 |
| 3      | <b>COMPORTAMENTO DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO PERANTE A INSERÇÃO DOS GERADORES FOTOVOLTAICOS . . . . .</b>                    | 40 |
| 3.1    | <b>Subestação Acarape-CE . . . . .</b>   | 40 |
| 3.2    | <b>Rede Teste IEEE-13 Barras . . . . .</b>   | 41 |
| 3.3    | <b>Constatações Sobre o Comportamento das Redes de Distribuição Submetidas a GD . . . . .</b>                              | 43 |
| 3.4    | <b>Filtros Harmônicos . . . . .</b>  | 44 |
| 4      | <b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>  | 45 |
| 4.1    | <b>Sugestões Para Trabalhos Futuros . . . . .</b>  | 45 |
|        | <b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>   | 46 |



## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um componente intimamente associado ao desenvolvimento humano. Ela é um dos fatores mais importantes no que diz respeito ao fenômeno da globalização e integração social, dando mais opções ambientalmente adequadas para a evolução do Produto Interno Bruto (PIB) de uma nação. Estes fatores sempre foram objetos de muitas análises, discussões e tratados internacionais, no sentido de garantir melhores práticas para suprir a demanda energética, reduzir os impactos ambientais, aumentar a eficiências dos componentes, diversificar a matriz energética, proporcionar o equilíbrio no ecossistema considerando a necessidade do consumo atual, sem comprometer a futura geração.

Por isso, a preocupação quanto a geração, transmissão, distribuição e proteção dos componentes de sistemas geração de energia é crescente. Entre as alternativas encontradas, as fontes renováveis são as que mais se enquadram ao panorama energético desejado universalmente. O Brasil é um dos destaques quanto a utilização desta fonte, devido abrangência dos recursos naturais existentes, ou seja, é um país com grandes disponibilidades de chuva, vento e o sol. Este último, constitui o recurso energético renovável privilegiável à elaboração desta monografia.

É extremamente importante o interesse do País na inserção geração distribuída (GD) como forma de ampliar a participação das fontes renováveis na matriz energética nacional. O envolvimento direto dos consumidores tornará o sistema mais dinâmico e mais robusto. Por isso, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu através da normativa N<sup>o</sup> 482/ 2012, as condições gerais para o acesso de micro geração e mini geração distribuída para os sistemas de distribuição de energia elétrica; o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Assim, com a alteração da resolução normativa N<sup>o</sup> 482/ 2012, isto é, aprovação da normativa N<sup>o</sup>687/2015 abriu o caminho para a utilização de diferentes modalidades da (GD), a saber: geração junto a carga, geração compartilhada, auto consumo remoto e empreendimento de múltiplas unidades consumidoras. Nessa perspectiva, a norma também serviu para reduzir muitos entraves quanto aos aspetos regulatórios anteriores (ANEEL, 2015).

A GD proporciona grandes vantagens tais como: reduzir as perdas técnicas e os impactos ambientais, aumentar a eficiência energética e melhorar o controle do nível de tensão. Mesmo assim, também apresenta muitos desafios, porque trata-se de mudanças em relação ao sistema elétrico convencional e igualmente uma nova forma de lidar com os parâmetros elétricos, tais como: perfil de tensão, fluxo de potência, e as distorções harmônicas de tensões e correntes no ponto de conexão. Caso estes problemas não são resolvidos poderão trazer consequências

indesejáveis para a distribuidora e para os consumidores em geral (LUCCHESI, 2018).

O sistema de distribuição sofre bastante com a presença dos harmônicos gerados pelos inversores, visto que são cargas não lineares, igualmente portadores dos harmônicos. A alteração no valor da corrente de disparo de disjuntores, sobreaquecimento dos condutores, alteração do torque e ruídos em motores elétricos e danificação de bancos de capacitores devido aos fenômenos de ressonância, são alguns dos mais notáveis problemas criados pelos harmônicos no sistemas de distribuição (ARRUDA, 2008).

## **1.1 Objetivos**

### ***1.1.1 Objetivo geral***

O objetivo geral desta monografia é de analisar os impactos causados por harmônicos gerados pelos inversores no sistema fotovoltaico e sua influência nas redes de distribuição.

### ***1.1.2 Objetivos específicos:***

O objetivo geral pode ser alcançado da melhor maneira quando os objetivos específicos foram atingidos. Neste caso os objetivos específicos são:

- Apresentar as mudanças feitas pela inserção da GD na rede de distribuição e suas influências no que diz respeito a qualidade de energia;
- Verificar a propagação de diferentes componentes harmônicos gerados pelos inversores na rede fotovoltaica;
- Caracterizar os principais componentes harmônicos causadores de problemas no sistema e suas interferências na qualidade de energia;
- Demonstrar as possibilidades para auxiliar na mitigação dos harmônicos.

## **1.2 Justificativa**

A busca pelas alternativas para mitigar os impactos causados pela inserção dos sistemas fotovoltaicos na rede de distribuição é um fenômeno universal. As redes de distribuição de energia elétrica apresentam problemas com o envolvimento dos geradores fotovoltaicos conectados no sistema, devido o aumento das harmônicas associados aos equipamentos utilizados para geração da energia.

Estas inconveniências são fatores que contribuem diretamente na qualidade de energia elétrica que é entregue aos consumidores. Afetam quase toda operação das distribuidoras. Neste contexto, apesar das vantagens incontestáveis da geração distribuída fotovoltaica (GDFV), os impactos causados na rede de distribuição, tornam-se assuntos relevantes em temas de qualidade de energia (NASCIMENTO, 2021).

Desta forma, este trabalho trouxe abordagens científicas para auxiliar na identificação e análise das distorções harmônicas geradas pelos inversores do sistema de geração fotovoltaico conectados a rede, e advertir as possíveis formas de mitigar antecipadamente esses fatores. Portanto, espera-se que este trabalho seja relevante ao ponto de contribuir na melhoria do entendimento sobre as causas e efeitos da distorção harmônica no sistemas de geração de energia elétrica.

### **1.3 Escopo do Trabalho**

As trajetórias para alcançar os objetivos expostos neste trabalho passam por 4 capítulos. Cada capítulo possui sua característica peculiar de maneira a corresponder com o tópico que ele aborda, e ambos possuem inter-relacionamentos dentro do domínio da problemática a ser investigada.

- Este primeiro Capítulo é introdutório e apresenta os motivos, a justificativa da escolha do tema, também serviu para definir os objetivos e a estrutura sequencial dos principais capítulos que irão sustentar o trabalho.
- O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, onde foi analisado diferentes concepções dos autores sobre o tema. Primeiramente foi evidenciado o conceito sobre a energia solar, a geração distribuída, sistema de distribuição de energia, a distorção harmônica, os inversores de chaveamento de frequência e algumas técnicas de controle das distorções harmônicas.
- O Capítulo 3 demonstra comportamento das redes de distribuição perante a inserção dos geradores fotovoltaico, tendo como referência a rede IEEE-13 barras e a subestação Acarape-CE da Enel. Estas evidências permitem comparar as condições do sistema com a inserção de múltiplas unidades geradoras das unidades com apenas uma unidade GD.
- O Capítulo 4 descreve a conclusão dos assuntos tratados e apresentação das propostas para os próximos trabalhos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados as principais teorias encontradas na literatura relacionados ao tema. Inicialmente, será abordado o conceito sobre a energia solar que é a base, seguindo-se de vários estudos que demonstram as concepções indispensáveis à elaboração desta monografia, entre os quais: a GD, redes de distribuição, distorção harmônica e filtros passivos.

### 2.1 Energia Solar

A energia solar é uma energia proveniente da luz do sol que pode ser convertida em outras formas de energias, nomeadamente em energia elétrica e térmica. Ela é a fonte de energia mais abundante do universo e com certeza uma das mais importantes, devido as seguintes características: é uma fonte que não prejudica o ecossistema, é livre de qualquer poluição do ponto de vista de geração, é obtida permanentemente de forma gratuita, além disso, faz integração com todas as outras fontes de energias, exceto com as energias geotérmica e nuclear. Portanto, é sem dúvidas, a alternativa renovável mais promissora.

Segundo (SOUZA, 2019), quase todas as formas de energias são consequências da energia solar. É através da energia do sol que se consegue alterar o estado físico da água, fazendo com que ela migre e possa ser represada e aproveitada nas usinas hidrelétrica. Os procedimentos para a obtenção da energia eólica são as consequências da energia solar, na medida em que o sol aquece as massas do ar e estas provocam o vento que são aproveitados nos aerogeradores, também a energia solar é responsável pela fotossíntese das plantas que são matérias primas para a geração da energia da biomassa. O petróleo também vem do aproveitamento dos fósseis (restos dos animais e vegetais) que durante um longo processo de formação dependem do sol. Todas as fontes de energias são renováveis, embora algumas se renovam a cada dia, acompanhando o desenvolvimento sustentável da vida na sociedade (energias renováveis), e outras, infelizmente, não se renovam numa escala temporal humana (energias não renováveis).

O planeta terra recebe anualmente uma quantidade significativa de energia solar. Estima-se que a quantidade recebida é cerca de 10.000 vezes maior ao consumo mundial de energia, o que se leva a crer que, se for aproveitada pelo menos metade dessa radiação que chega a superfície terrestre, daria certo para suprir com toda a demanda energética mundial (FERREIRA, 2013).

As evidências com a energia solar começou desde antiguidade com as experiências

de Arquimedes ao incendiar navios romanos concentrando sobre eles raios solares refletidos por espelho. Depois disso, teve outros marcos históricos tais como Lavoisier (1774) que fez um forno solar com lente que teve o diâmetro de aproximadamente 1,5m e conseguiu obter uma temperatura de 1700 *graus celsius*, John Ericson em 1980 idealizou um sistema solar com o objetivo de transformar a energia solar em energia mecânica. As técnicas mais avançadas para o aproveitamento solar foram desenvolvidas nos EUA em 1954, onde os cientistas desenvolveram também técnicas para o armazenamento das energias (FERREIRA, 2013).

A energia solar pode se agregada em 5 blocos, a saber: energia solar passiva, ativa, fotovoltaica, térmica e processos de inspiração de fotossínteses. Sendo assim, para os efeitos dos estudos em engenharia são considerados energia solar fotovoltaica e energia solar térmica (SILVA, 2016).

### ***2.1.1 Energia Solar no Brasil***

O Brasil é um país que possui grandes potencialidades e disponibilidades para a geração da energia solar. Essa vantagem deve-se a localização geográfica do País. Por isso, deveria ser motivo de grandes investimentos no sentido alcançar rotineiramente aproveitamentos altos dessa expressiva fonte energia. Vive-se num mundo onde a competitividade é um dos fatores chaves para potencializar a voz do País no contexto internacional. Se o Brasil tivesse investido mais nas tecnologias solares, teria muitas facilidades para fazer face a abundancia dessa matéria prima e conseqüentemente aumenta a oferta por energia elétrica.

Constatou-se que a falta de investimento e políticas para aumentar as possibilidades de geração de energia solar com intuito de torna-la mais acessível à população tem colocado o Brasil atrás dos países que são considerados líderes mundiais do aproveitamento da luz do sol. Hoje, nota-se um enorme esforço no cumprimento do projeto de governo no que diz respeito ao desenvolvimento energético e que estão sendo seguidos pelos estados e municípios. São instalados mais de 2.000 sistemas de captação em comunidades espalhadas pelo País. O referido projeto tem como prioridade: escolas, iluminação pública, postos de saúde e sistemas de bombeamento de água (SILVA, 2016). A Figura 1, mostra o perfil da energia solar no Brasil.

### ***2.1.2 Energia Solar na Alemanha***

A expectativa mundial é, na verdade, a consciência ecológica para o consumo de energia de forma excelente, sem agredir o meio ambiente. A energia solar é aprovada como

Figura 1 – Perfil da energia solar no Brasil.



Fonte: (MOREIRA, 2020).

mecanismo adequado para atingir estes objetivos. Não se trata apenas de um evento, mas sim, de um projeto capaz de tornar os custos de geração mais competitivo em relação às hidrelétricas.

Segundo o (*GLOBAL SOLAR ATLAS*, 2018), a radiação solar no mundo apresenta valores altos. No Brasil em particular é muito expressivo, contudo o aproveitamento ainda é menor se comparado com a Alemanha que é líder de aproveitamento de energia solar ao nível mundial. Os altos índices de aproveitamentos da Alemanha são justificados pelos altos investimentos e incentivos governamentais (SILVA, 2016).

Alemanha é o líder na geração fotovoltaica graças aos elevados investimentos nesta fonte de energia. Não se trata de um país com elevada expressividade da radiação solar, mesmo assim, os incentivos e subsídios disponibilizados para mudar o panorama energético colocou este país no lugar de destaque em nível mundial. A política seguida pela Alemanha é a energia limpa para todos. Por isso conta com os instrumentos de fomento ao uso de tecnologias energeticamente eficientes, que evidenciam sua posição de destaque no que diz respeito ao aproveitamento de energia solar (JÚNIOR; SOUZA, 2020).

Uma das coisas mais importantes no que diz respeito ao comportamento dos alemães perante esta nova tendência energética é a rigorosidade no cumprimento das regulamentações. Esse fato é visto como o mais rígido da União Europeia e que conduziu o país a um mercado solar extremamente atrativo pela qualidade de serviço e pela competitividade. Vale salientar que os incentivos financeiros e tecnológicos não faltaram pela parte do governo e para os demais agentes e colaboradores. Estes fatores tornam-no diferente e superior ao Brasil no que diz respeito ao aproveitamento de energia solar e aparece logo como um dos países mais bem sucedidos no

desenvolvimento desta fonte de energia (DALVI, 2017). A Figura 2 apresenta energia solar na Alemanha.

Figura 2 – Perfil da energia solar na Alemanha.



Fonte: (MOREIRA, 2020).

Comparando os pontos ou regiões mais ensolarados entre os dois países, percebe-se que a região nordeste do Brasil possui maior índice de radiação, e os lugares de baixa radiação são observadas principalmente na região sul. Esta região que é menos ensolarada do Brasil apresenta índices maiores que os lugares mais ensolarados da Alemanha, (1.500 kWh/m<sup>2</sup>) contra (1.200 kWh/m<sup>2</sup>). Por outro lado, a diferença do aproveitamento a favor da Alemanha tem a ver com as políticas adotadas.

## 2.2 Sistema Fotovoltaico

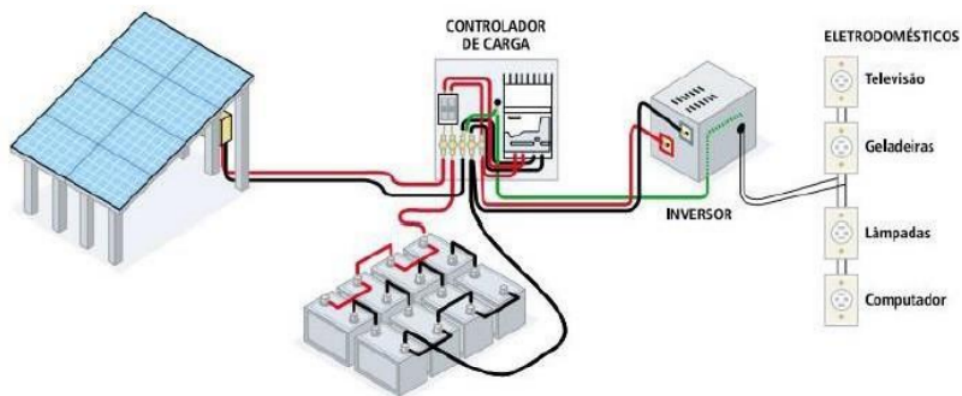
O sistema fotovoltaico é o modo de aproveitamento direto da radiação solar, ou seja, é um sistema de potência elétrica na qual as células fotovoltaicas transformam a radiação solar diretamente em energia elétrica. Este sistema consiste em uma fonte de energia, um conversor e um sistema de armazenamento de energia. O sistema de armazenamento de energia é utilizado apenas nos sistemas isolados (*off-grid*), isto é sistemas que não são conectados a rede elétrica da

distribuidora (ALVES, 2019). Isso significa que o sistema fotovoltaico possui alta confiabilidade e pode ser implantado em continente, regiões remotas, desertos, selvas, ou seja, em qualquer lugar onde existe radiação solar. O que mostra que esse tipo de sistema não está limitado apenas a rede elétrica convencional.

### 2.2.1 *Sistemas Isolados (Off-Grid)*

Este tipo de sistema é comumente verificado nas aplicações residenciais e nas zonas remotas, não sendo necessário contato com a rede de distribuição das concessionárias de energia elétrica e normalmente, contém um conjunto de baterias para o armazenamento de energia. A Figura 3 apresenta um sistema isolado.

Figura 3 – Sistema fotovoltaico isolado.



Fonte: (ALBRATZ, 2017).

Este sistema é uma das melhores alternativas para os lugares remotos ou zonas onde as linhas de transmissão da rede elétrica convencional não conseguem passar por razões geográficas, técnicas ou econômicas. Na Figura 3 verifica-se os componentes deste sistema, que são: painéis solares, controlador de carga, baterias e inversor.

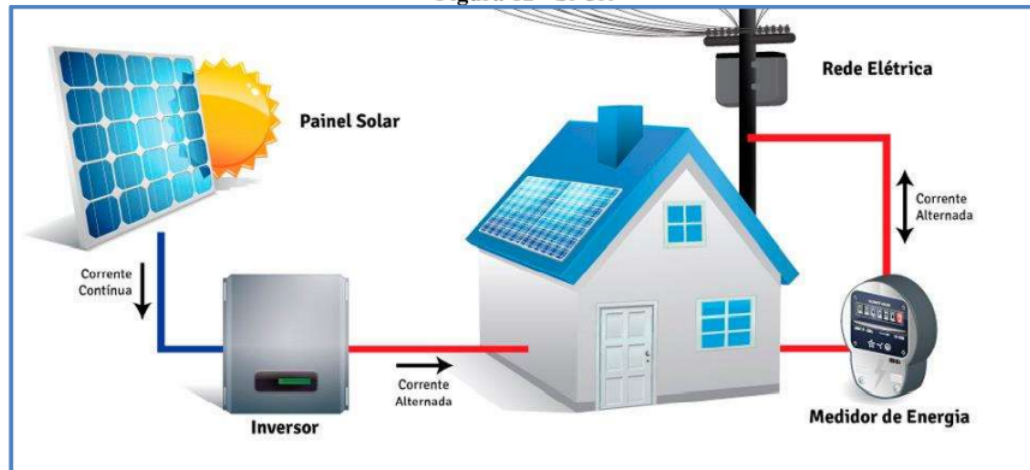
### 2.2.2 *Sistemas Conetados à Rede Elétrica (On-Grid)*

Estes sistemas fornecem energia para a rede de distribuição, por isso, não utilizam sistemas de armazenamento de energia e são mais eficientes e mais baratos. Uma outra aplicação não menos importante, prende-se com os sistemas híbridos. Os sistemas híbridos são sistemas que funcionam juntamente com outros sistemas de geração elétrica. O arranjo pode ou não possuir um sistema de armazenamento de energia. Contudo, o aproveitamento é sempre menor



que os sistemas conectados à rede elétrica (ALVES, 2019). A Figura 4 apresenta uma ilustração de um sistema fotovoltaico conectado a rede de distribuição de energia elétrica.

Figura 4 – Sistema fotovoltaico conectado a rede.



Fonte: (SON, 2018).

A Figura 4 apresenta um sistema fotovoltaico *on-grid* com as diversas tecnologias utilizadas para geração de energia elétrica. O módulo fotovoltaico composto por várias células fotovoltaicas, transformam a energia solar em energia elétrica. Os inversores são dispositivos que transformam a energia gerada em corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), os medidores de energia fazem o papel de quantificar o consumo de energia elétrica no sistema.

### 2.3 Geração Distribuída Fotovoltaica

Entende-se por geração distribuída fotovoltaica, a utilização da fonte energia solar para produzir energia no próprio local onde vai ser consumida. Para os devidos efeitos, converter a própria energia e comercializar parte dela, transforma o consumidor num sujeito que produz, consome e comercializa a sua própria energia e não mais como um elemento passivo do sistema, mas sim um sujeito ativo (BAJAY, 2018).

Conforme a regulamentação N<sup>o</sup> 687/ 2015 da ANEEL, criada no sentido de atualizar a resolução N<sup>o</sup> 482/2012, estabeleceram-se as condições para a micro e mini geração distribuída. **Micro geração distribuída** corresponde a central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 KW e que utiliza a cogeração qualificada, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

A **mini geração distribuída** é a central geradora de energia elétrica, com potência

instalada superior a 75 KW, menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas e menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada e para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Nesta norma, também está prevista 4 modalidades de geração distribuída: geração junto a carga, geração compartilhada, empreendimento de múltiplas unidades consumidoras e auto consumo remoto. Mas a grande inovação neste âmbito tem a ver com o sistema de compensação. De acordo com a ANEEL, para fins de compensação, a energia ativa injetada no sistema de distribuição pela unidade consumidora será cedida a título de empréstimo gratuito para a distribuidora, passando a unidade consumidora a ter um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de 60 (sessenta) meses (ANEEL, 2015).

A geração distribuída trouxe vantagens econômicas, sociais e ambientais, devido à utilização das fontes renováveis, principalmente solar. Os investimentos nestas fontes vem contribuindo para a queda dos custos das suas tecnologias, tornando-as mais acessíveis aos consumidores, e também ocasionam a postergação dos investimentos em expansão e a redução das perdas de energias. O que resulta no aumento na confiabilidade do sistema, diminuição das contas de energias na fatura final dos consumidores e diversificação da matriz energética do País. Estas vantagens fizeram com que a maioria das usinas fotovoltaicas hoje sejam de pequeno porte, o que podem ser designados geração distribuída, ou seja, fontes de geração localizadas juntos aos centros de carga (LUCCHESE, 2018).

Com isso, a GD conectada às rede de baixa tensão e média tensão de distribuição, também impacta negativamente os sistemas de distribuição, porque são programadas para funcionar como um circuito que apresenta uma configuração radial. A conexão com geração distribuída solar associadas as cargas não lineares, alteram praticamente toda essa lógica radial funcional do sistema e introduz novas questões na operação que normalmente causam problemas técnicos como: Limites de tensão, harmônicos, ajustes na proteção contra curto circuitos, fluxo reverso etc (LUCCHESE, 2018).

## **2.4 Sistema de Distribuição de Energias**

O sistema elétrico de distribuição é a parte do sistema elétrico nacional. Ele é responsável pela interligação dos sistemas de geração e transmissão aos consumidores. Portanto, é o sistema responsável para entregar a energia elétrica gerada e recebida do sistema de transmissão para diferentes classes de consumidores. Normalmente, este sistema opera em tensões inferiores

a 230KV (BAJAY, 2018).

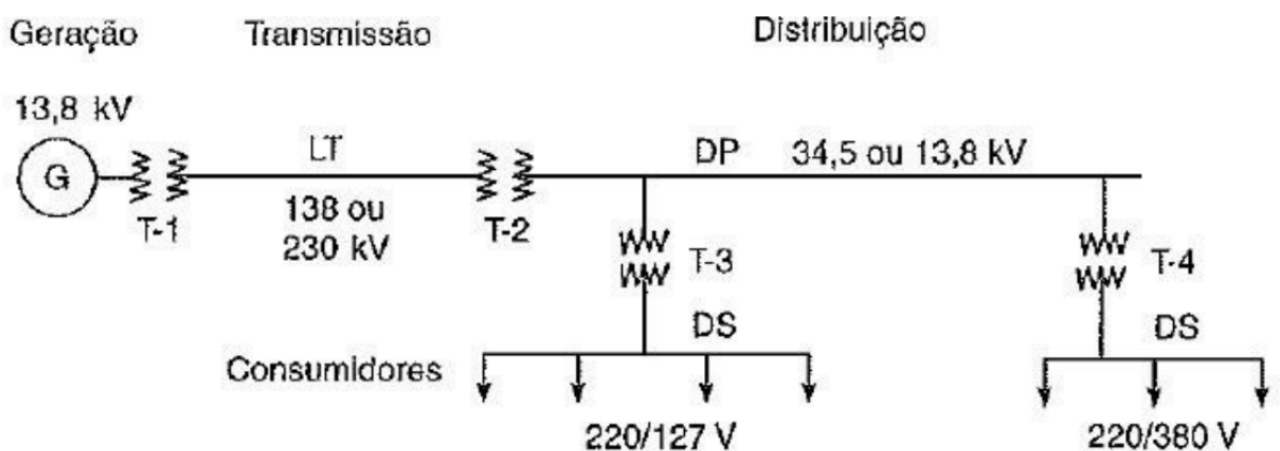
De acordo com Bajay (2018), no Brasil a distribuição de energia elétrica é realizada por 63 empresas concessionárias de energias e 38 empresas permissionárias. A concessão é um ato bilateral no qual a união autoriza uma empresa a exercer um determinado serviço público de eletricidade do setor de energia elétrica de relevante interesse público por meio de decreto condicionado à celebração de um contrato entre as partes. Enquanto que a permissão é um ato unilateral e sem qualquer natureza contratual, e pode ser encerrado a qualquer momento pelo poder concedente, e a empresa permissionária não terá o direito algum de reclamar ou pedir a clausula rescisória.

No Brasil, o poder concedente para a geração, transmissão e distribuição de energias compete ao governo federal. Neste caso, compete o sistema de distribuição a conexão entre o sistema elétrico e os consumidores. O sistema é composto por três (3) estruturas básicas: Subestações, rede primária e rede secundária.

#### 2.4.1 Subestação

É a parte responsável pela interface ou conexão entre o sistema de distribuição e o sistema de transmissão ou sub-transmissão. Nela está contida os equipamentos de transformação, manobra, chaves de regulação e diversos tipos de equipamentos de proteção do sistema. A Figura 5 apresenta o sistema de distribuição no diagrama unifilar do sistema elétrico.

Figura 5 – Diagrama unifilar.



Fonte: (MENDES, 2019).

Na Figura 5, tem-se: **LT** : Linhas de transmissão de energias; **DP**: Distribuição primária ( média tensão de distribuição); **DS**: Distribuição secundária (baixa tensão de distribuição);

#### **2.4.2 Rede Primária de Distribuição**

A rede primária de distribuição também pode ser chamada da rede de média tensão. Ela é responsável pela conexão entre a subestação e os centros de carga das cidades ou grandes consumidores. Uma coisa importante e fundamental é que esta rede é formada principalmente pelos alimentadores do tipo radial em média tensão. Portanto, na saída de qualquer subestação de distribuição tem-se, o chamado alimentadores que são circuitos de média tensão, responsáveis por fazer conexão entre a subestação e os centros da carga.

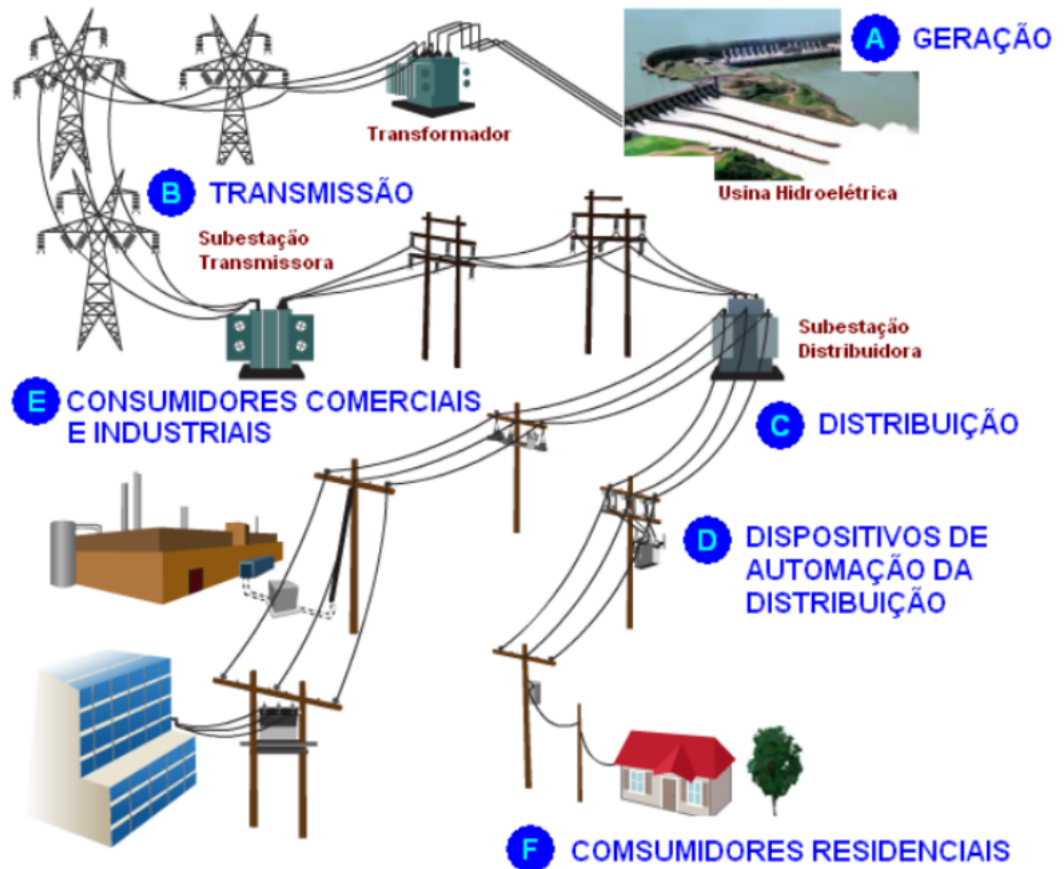
#### **2.4.3 Rede Secundária de Distribuição**

Conhecida como a rede de baixa tensão, é a rede responsável pela conexão com o consumidor final, sobretudo aqueles consumidores de pequeno portes, vulgarmente denominados de consumidores residenciais. Normalmente possui alta capilaridade e são formados por circuitos de baixa tensão (220V/380V), dependendo de cada localidade, a baixa tensão obtida é o resultado das operações dos transformadores abaixadores encontrados nos postes de ruas (BAJAY, 2018). A Figura 6 apresenta a interconexão das redes no sistema elétrico de Potência, onde (C) : representa a parte da distribuição de energia com particular destaque para o papel da subestação em distribuir a energia para os consumidores comerciais e industriais que são atendidas na rede primária de distribuição ( média tensão), e os consumidores residenciais que obviamente são atendidas na rede secundária de distribuição (baixa tensão).

### **2.5 Qualidade de Energia Elétrica (QEE)**

Evidente que não existe uma definição única do que seja a qualidade de energia elétrica, mas existe uma definição, mesmo não sendo totalmente aceita, ela tem um nível maior de abrangência nos campos científicos. Então, a qualidade de energia pode ser entendida como um parâmetro que quantifica e qualifica a forma como a energia elétrica está a ser usada pelos consumidores, como também, leva em consideração fatores desejáveis para um fornecimento seguro da energia. Para tal, na visão de Mehl (2012), a avaliação de qualidade de fornecimento de energia pode ser feita através de vários indicadores, entre eles pode-se citar a continuidade do

Figura 6 – Interconexão das redes no sistema elétrico de potência.



Fonte: (COSTA, 2011).

fornecimento, nível de tensão, oscilações de tensão, desequilíbrios, distorções harmônicas de tensão e interferência em sistemas de comunicações.

Desta maneira, todos os interveniente ou agentes do setor elétrico contribuem de uma forma direta ou indiretamente na análise de qualidade de energia elétrica. Hoje, com a disseminação da geração distribuída, a preocupação é relevante considerando novas cargas associadas à rede elétrica.

É importante destacar a magnitude de quanto variam as grandezas como: Tensão, distorção harmônica total, fluxo de potência, afundamento de tensão, transitórios oscilante e impulsivos, variação de frequência etc. Variam também, os níveis de fornecimento de energia. Situações que provocam grandes problemas para os equipamentos que precisam de uma tensão adequada para funcionar (PINTO, 2013).

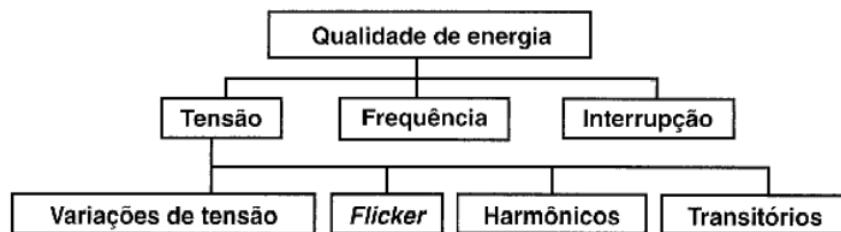
As grandezas supracitadas são denominadas de distúrbios, a QEE, também pode ser influenciada pelos problemas aos quais o sistema elétrico sempre enfrenta: chaveamento de banco de capacitores, problemas nos transformadores, conexão e desconexão de grandes grupos

de cargas, alimentação de cargas não-lineares e alguns fenômenos externos como descarga atmosféricas, etc. (CASTRO, 2019).

Sendo assim, pode-se concluir que os problemas de qualidade de energia são influenciados pelos problemas internos, isto é, situações associadas as operações no sistema, fenômenos externos, que são aspetos da natureza, estes são mais imprevisíveis e as características dos dispositivos utilizados para execução das atividades.

Para que haja gestão ou procedimentos que visam controlar os níveis de distúrbios e igualmente proporcionar uma energia de melhor qualidade, o Operador Nacional do Sistema (ONS), padronizou os valores da qualidade energia, em que chamou muita atenção para os valores de distúrbios de tensão. Assim, é aceitável uma variação de tensão de 5% em relação a tensão nominal, dentro do limite de tensão de 13,8 Kv até 440 Kv e para frequência de 60Hz. Em outras palavras, na ocorrência de qualquer distúrbio no sistema, a frequência terá 30 segundos para voltar ao intervalo de 59,9–60Hz. A frequência não poderá ir além de 66Hz ou cair abaixo de 56,5Hz (PINTO, 2013). Neste trabalho as evidências serão em torno da distorção harmônica. A Figura 7 apresenta em síntese os problemas de QEE associados a tensão.

Figura 7 – Principais distúrbios associados a tensão.



Fonte: (PINTO, 2013).

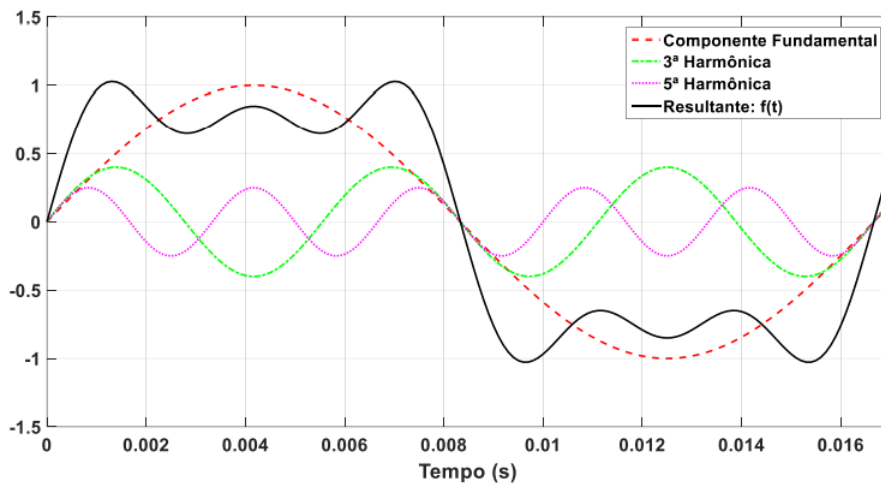
## 2.6 Distorções Harmônicas

As distorções harmônicas são fenômenos associados as deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação a onda senoidal da frequência fundamental. Elas são muito comuns nos sistemas de geração de energia. Por isso, quando se faz uma análise energética não é incomum perceber que a tensão e a corrente estão distorcidas na rede elétrica, isto ocorre porque as cargas não lineares colocam na rede uma frequência diferente da fundamental. De referir que a frequência fundamental no Brasil é de 60HZ. (ANEEL, 2015). Estes problemas

estão a crescer devido a inserção de sistemas fotovoltaicos conectados a rede de distribuição. Desta forma, identificar e regular os limites harmônicos injetados no ponto de conexão é um grande desafio, tanto para os consumidores, assim como para as distribuidoras.

Na realidade, a grande preocupação é com a relação aos harmônicos gerados pelo chaveamento dos inversores de frequência e as cargas não lineares em geral (transformadores, diodos, transistores, tiristores etc). Essas cargas têm correntes não senoidais e quando são submetidas a uma fonte tensão senoidal, neste caso a corrente eficaz do circuito e a potência aparente tornam-se diferentes da frequência de 60HZ, ou seja, quando o sinal da frequência fundamental é somado às componentes harmônicas, a onda resultante é deformada, gerando uma onda ainda periódica não senoidal (JUNIOR, 2021). A Figura 8 é uma representação da forma de onda do componente principal, distorções e o resultante .

Figura 8 – Representação da distorção harmônica.



Fonte: ( CASTRO, 2019).

Na figura 8, percebe-se que a forma de onda de amplitude de frequência fundamental (60 HZ ) é somada com as ordens de terceira e quinta harmônicas (180HZ e 300 HZ), respectivamente, o que resultou em uma onda não senoidal.

## 2.7 Norma Nacional e Recomendação Internacional

Os problemas técnicos na rede de distribuição de energias tendem a aumentar com o avanço da inserção GDFV na rede. Porque com o aumento de GDFV, aumenta também os níveis de preocupações com os conteúdos harmônicos gerados em todos os pontos do sistema. Nesse sentido, a norma nacional Procedimentos de Distribuição (PRODIST) modulo 8 e recomendação

internacional de Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 519, estabeleceram limites para regular os níveis de distorção harmônica para componentes de tensões e correntes nas centrais geradoras, distribuidoras, agentes importadores ou exportadores de energia elétrica e os consumidores em geral.

### 2.7.1 ANEEL-Prodíst Modulo 8

A ANEEL, através da resolução normativa Nº 956/ 2021, estabeleceu os procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional-PRODIST, isto é, diretrizes que devem ser seguidas para melhor fornecimento de energia elétrica. As regras estão organizadas em 11 módulos.

O PRODIST módulo 8, é exclusivamente direcionado a qualidade de fornecimento de energia elétrica. Nele está todas as considerações que devem ser seguidas para que haja a máxima eficiência na distribuição de energia elétrica. Este modulo está estruturado em quatro pontos-chaves, que são: qualidade de produto, qualidade de serviço, qualidade comercial, segurança de trabalho e instalações (ANEEL, 2021).

Um dos tópicos de extrema relevância na qualidade de produto (Caracterização dos fenômenos que afetam a onda de tensão) está relacionado com distorção harmônica que é um fenômeno recorrente nos sistemas de geração de energias. Foram estabelecidos limites de distorção harmônica para os valores de tensões. A Tabela 1 apresenta os limites de distorção harmônica para os valores de tensão.

Tabela 1 – Limites para distorção harmônica de tensão de acordo com PRODIST módulo 8.

| INDICADOR | TENSÃO NOMINAL |                  |                 |
|-----------|----------------|------------------|-----------------|
|           | V 1.0 Kv       | 1.0 Kv <V <69 Kv | 69 Kv V <230 Kv |
| DTT95%    | 10,00%         | 8,00%            | 5,00%           |
| DTTP95%   | 2,50%          | 2,00%            | 1,00%           |
| DTTI95%   | 7,50%          | 6,00%            | 4,00%           |
| DTT395%   | 6,50%          | 5,00%            | 3,00%           |

Fonte: (ANEEL-PRODIST, 2021).

Os níveis de tensões mostrados na tabela 1 detalham o seguinte: Quanto maior o nível de tensão em que se trabalha, menor é a distorção harmônica permitida.



### 2.7.2 IEEE-519

Apesar de ser comumente tratada como uma norma, a IEEE-519 é na realidade uma recomendação ao nível internacional sobre os níveis de tensões e correntes harmônicas permitidos no sistema. Não é apenas uma reflexão sobre o que ocorre dentro das instalações elétricas, mas também, preocupa-se com os fenômenos que ocorrem no ponto de conexão entre os consumidores.

Geralmente, nesta recomendação foi destacada os aspetos relacionados com as questões harmônicas, nomeadamente: resposta do sistema, métodos para condução da análise e fluxo de potência harmônico. Possui várias guias e modelos de sistemas susceptíveis a distorção. No que tange a corrente, a recomendação foi feita baseada no nível de tensão e no nível de curto-circuito, situações que não foram observadas nas considerações do PRODIST módulo 8. A tolerância para as correntes harmônicas recomendadas pela IEEE-519 são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Limites para distorção harmônica das componentes de corrente-IEEE-519.

| Icc/IL    | 3 h <11 | 11 h <17 | 17 h <23 | 23 h <35 | 35 h <50 | DHT (%) |
|-----------|---------|----------|----------|----------|----------|---------|
| <20       | 4       | 2        | 1,5      | 0,6      | 0,3      | 5       |
| 20 <50    | 7       | 3,5      | 2,5      | 1        | 0,5      | 8       |
| 50 <100   | 10      | 4,5      | 4        | 1,5      | 0,7      | 12      |
| 100 <1000 | 12      | 5,5      | 5        | 2        | 1        | 15      |
| >1000     | 15      | 7        | 6        | 2,5      | 1,4      | 20      |

Fonte: (IEEE, 2014).

É importante salientar que, os limites supracitados pelas duas entidades são baseadas nas experiências com os medidores, permitindo deste modo realizar os cálculos através das análises estatísticas. Portanto, a tolerância é de 20% segundo as recomendações IEEE-519, que muitas das vezes é tomado como ponto referência tendo em conta que a norma nacional PRODIST, não estabeleceu limites de distorção para as correntes harmônicas, o que equivale dizer que a norma IEEE-519 é mais detalhado. Outra observação é que os limites de distorções de tensão no ponto de ligação são da responsabilidade das concessionárias e os limites de distorção de corrente neste mesmo ponto, são da responsabilidade dos consumidores (OLIVEIRA *et al.*, ).

## 2.8 Cargas Não Lineares

Um dos fatores que certamente contribuem para o aumento da taxa de distorção harmônica na rede elétrica são as cargas não lineares. Uma carga é considerada não linear quando a corrente do circuito que alimenta essa carga possui outros componentes além de 60 Hz. São exemplos destes tipos de cargas: inversores, transformadores, lâmpadas fluorescentes, tiristores, transistores e vários dispositivos de eletrônica de potência amplamente produzidas e que fazem parte dos processos de geração de energia elétrica.

A proliferação das cargas desta natureza, também é bastante influenciada pela disseminação da GD. O grande desafio para com a qualidade de energia é com relação aos harmônicos produzidos por estas cargas, uma vez, que são aspetos frequentes e permanentes no sistema, diferentemente dos problemas criados pelas cargas lineares (JUNIOR, 202). Dentre as cargas que interagem com a rede os inversores de frequência são as que mais emitem conteúdos harmônicos. Esse dispositivo é o elo de ligação entre os dois sistemas, razão pelo o qual a maioria das análises sobre a distorção harmônica incidem sobre seus o comportamentos (RIBEIRO, 2017).

Nesse sentido, todos os equipamentos com as características não lineares, contribuem de alguma forma para a injeção dos harmônicos, seja ela em maior ou menor quantidade, embora os mais significativos são apontados aos inversores. Sendo assim, cada carga possui seu espectro harmônico, sua característica e seu nível de complexidade dentro do sistema. Por isso, antes de conectar uma fonte fotovoltaica no sistema deve-se conhecer o espectro ou quantidade de fontes harmônicas que eventualmente estariam presentes. Porque qualidade de energia depende muito do nível dos harmônicos injetados na rede. Um sistema harmonicamente poluído pela a magnitude das cargas não lineares corre sérios riscos de comprometer não apenas o sistema operacional das distribuidoras, como também os consumidores (MARTINS, 2003).

## 2.9 Inversores

Tal como foi referido no tópico anterior, basicamente os inversores fotovoltaicos são dispositivos que convertem a energia gerada em corrente contínua para a corrente alternada. A energia fornecida pelos módulos fotovoltaicos não seria útil para alimentar a maioria dos nossos equipamentos sem a intervenção dos inversores (JUNIOR, 2021).

As potencialidades deste dispositivo não se restringe apenas num único domínio. Ele é usado nos sistemas de geração de energias, nas indústrias e residências. Outras funções dos

inversores fotovoltaico não muito conhecidos são: registrar os dados das operações, conexão e desconexão da rede em razão do surgimento de condições de ilhamento, condições de irradiância incidente e detecção de perdas de isolamento (CASTRO, 2019).

Para a escolha de um determinado inversor é preciso levar em consideração suas características técnicas e o seu modelo, que muita das vezes são desenvolvidos pelos fabricantes, em referência a curva de eficiência para um determinado valor de tensão (NASCIMENTO, 2021). Seja como for, isso não impede que suas desvantagens sejam motivos de grandes preocupações. A Figura 9 mostra o modelo dos inversores tipicamente usados no sistema fotovoltaico.

Figura 9 – Inversores fotovoltaicos trifásicos.



Fonte: (AUTOR, 2022).

## 2.10 Representação das Distorções Harmônicas

Quando se deseja efetuar um estudo sobre as distorções harmônicas, é necessário levar em consideração os valores de referência de distorção harmônica total estabelecidos pela literatura. Quer dizer, só pela comparação entre os valores obtidos num determinado estudo com os valores aceites pela literatura pode-se quantificar os níveis dos harmônicos presentes num sistema (ANEEL-Prodlist, 2021).

Deste modo, a metodologia para análise harmônica pode ser baseada em princípios matemáticos que resultam na transformada no domínio de tempo ou no domínio de frequência (Fourier). Embora seja possível obter resultados satisfatórios através destes métodos, eles não são eficientes, uma vez que, exigem muitos esforços para alcançar os resultados (VARIZ, 2006).

Nesta lógica, segundo ANEEL as distorção harmônicas podem ser calculadas das seguintes formas:

### Equação para o cálculo das tensões harmônicas

$$IHD_v = \frac{V^h}{V^1} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Onde:

$V^h$  = tensão harmônica de ordem h;

h = ordem harmônica individual;

$V^1$  = tensão fundamental medida.

### Equação para o cálculo das correntes harmônicas

$$IHD_i = \frac{I^h}{I} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

Onde:

$I^h$  = corrente harmônica;

h = ordem harmônica individual;

$I^1$  = Corrente fundamental medida

#### 2.10.1 Equação para calcular Distorção harmônica total

##### Para indicadores de Tensão

$$THD_v = \frac{(V^{H2})}{V^1} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

##### Para indicadores da corrente

$$THD_i = \frac{(I^{H2})}{I^1} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

As nomenclaturas das variáveis apresentadas nos cálculos dos componentes harmônicos individuais, são as mesmas verificadas da detecção harmônica total para tensão e corrente.

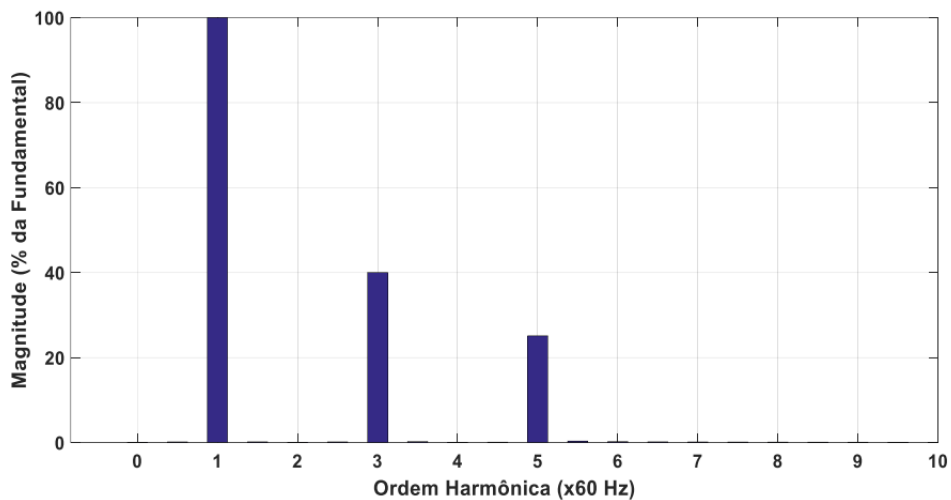
#### 2.11 Ordem Harmônica

A ordem de um componente harmônico pode dizer o quanto ele é prejudicial. A magnitude dos problemas que eles causam dependem das suas amplitudes. As harmônicas pares não são tão preocupante uma vez que apresentam amplitudes menores. Enquanto que as harmônicas ímpares são extremamente perigosos, frequentes, outrossim, responsáveis pela maioria dos problemas relacionados a qualidade de energia elétrica (CASTRO, 2019).

Os componentes pares possuem sequência zero, todavia não é um problema, uma vez que grande parte não chega no sistema de distribuição. Ao passo que as harmônicas ímpares são as que mais entram no sistema de distribuição sobretudo as da 3ª e 5ª ordem harmônica (OLIVEIRA, 2016).

Devido à estas particularidade, os componentes pares normalmente são desprezados, porque a magnitude suas correntes são muitos baixas em relação a corrente da frequência fundamental. Por ouro lado, conforme aumenta a ordem harmônica ímpar a corrente deste diminui. A Figura 10 ilustra esta concepção.

Figura 10 – Ordem harmônica.



Fonte: (CASTRO, 2019).

## 2.12 Impactos Causados pelos Harmônicos na Rede Elétrica

Tal como foi referido nos capítulos anteriores, os prejuízos para com as distorções harmônicas são enormes. Todos os intervenientes sofrem com um sistema harmonicamente poluída. Desde os cabos, os transformadores, maquinas rotativas e os capacitores, prejudicam com a presença deste fenômeno. Quando existe distorções muito grandes os equipamentos podem queimar, a capacidade de transporte de energias fica muito limitado e consequentemente aumentam as perdas no sistema (CASTRO, 2019).

Para Souza (2018), uma das consequências dos harmônicos no sistema de distribuição é a ocorrência de ressonâncias harmônicas em determinados pontos do sistema, o que Pode fazer com que os fusíveis e capacitores se danifiquem, transformadores e motores se sobreaqueçam, também ocasiona vibrações ou falhas de operação dos disjuntores, mau funcionamento de relés,

problemas de controle de equipamentos, interferência eletrônica, medições incorretas de energia elétrica, etc.

Deste modo, a solução seria encontrar alternativas seguras para monitoramento do sistema em tempo real, mas antes, é necessário conhecer os pontos do sistema que emitem maior ou menor conteúdo harmônico, considerando diferentes horários da geração fotovoltaica.

### **2.13 Métodos para Detecção e Controle da Distorção Harmônica Gerados pelo Sistema Fotovoltaico conectado à Rede**

A disseminação da GD é um fato incontestável, visto que suas vantagens são evidentes, e tudo isso foi originado a partir de altos investimentos motivados pelas políticas e incentivos governamentais nesse âmbito que são enormes. Nesse sentido, torna-se viável analisar todos os desdobramentos desta nova forma de geração de energia e sua influência na qualidade de energia. Porque suas tecnologias são portadores de harmônicos, ou seja, os harmônicos são gerados pela presença de cargas não lineares no sistema que são principais tecnologias da GDFV.

Diante disso, a utilização do *software OpenDSS* é justamente uma das melhores formas de modelar, controlar e analisar fluxo harmônico em diferentes pontos do sistema. Por isso, ANEEL adotou recentemente esta ferramenta como plataforma computacional padrão para realização dos estudos referentes ao setor de distribuição de energia elétrica (DIAS, 2019).

Esta metodologia é vista como uma das melhores formas de prever o comportamento da GD na conexão com a rede de distribuição, porque permite quantificar e qualificar os níveis de problemas conforme a natureza da conexão. Geralmente, estima-se a poluição harmônica das correntes e tensões na barra onde o sistema fotovoltaico seria conectado e detectar seus reflexos sobre os demais elementos do circuito (JUNIOR, 2021).

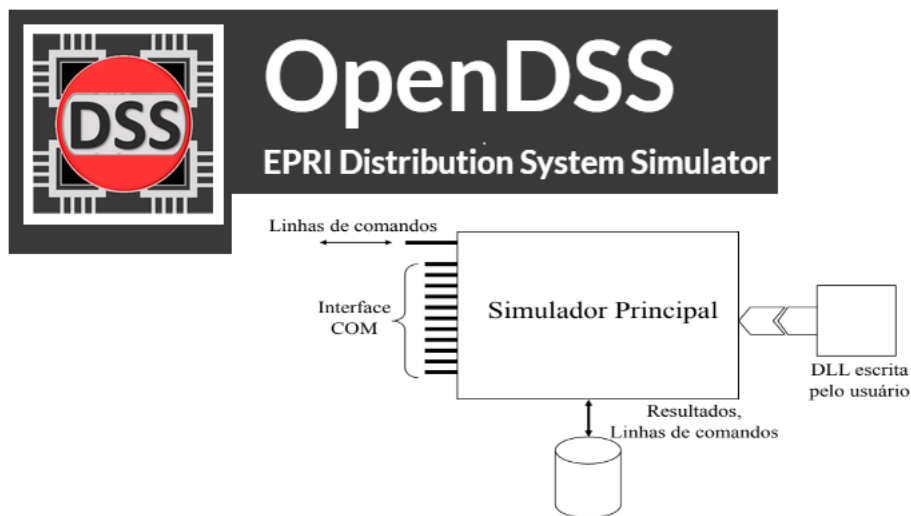
Nessa perspectiva, recomenda-se definir os parâmetros da entrada, as especificações das curvas de temperatura e de irradiação que são pontos fortes e indispensáveis a serem declarados no *software*, como também aplicar diferentes condições ao sistema. O espectro de frequência dos módulos fotovoltaicos deve ser alterado, a potência e até mesmo necessário variar a localização, no sentido de permitir a construção de diferentes cenários para melhor visualizar momentos de alta ou baixa poluição harmônica (JUNIOR, 2021).

## 2.14 OpenDSS

O *OpenDSS* é um *software* de código aberto diretamente voltado às distribuidoras. Essa ferramenta é utilizada para diversas finalidades e possui facilidade de integração com muitas linguagens de programação, principalmente o *Python*, e consegue não só resolver os problemas de frequência e tensão, como também, facilitar na execução de muitas operações no sistema (DUGAN; MONTENEGRO, 2013).

Com este recurso é possível determinar e modelar vários problemas harmônicos. Ele apresenta modelos para os equipamentos de geração distribuída conectados em redes de distribuição de forma a poder modelar vários elementos de forma estocástica. O elemento *PvSystem* do *openDSS* é modelo idealizado para representar a geração fotovoltaica. A Figura 11 mostra a estrutura *OpenDSS*.

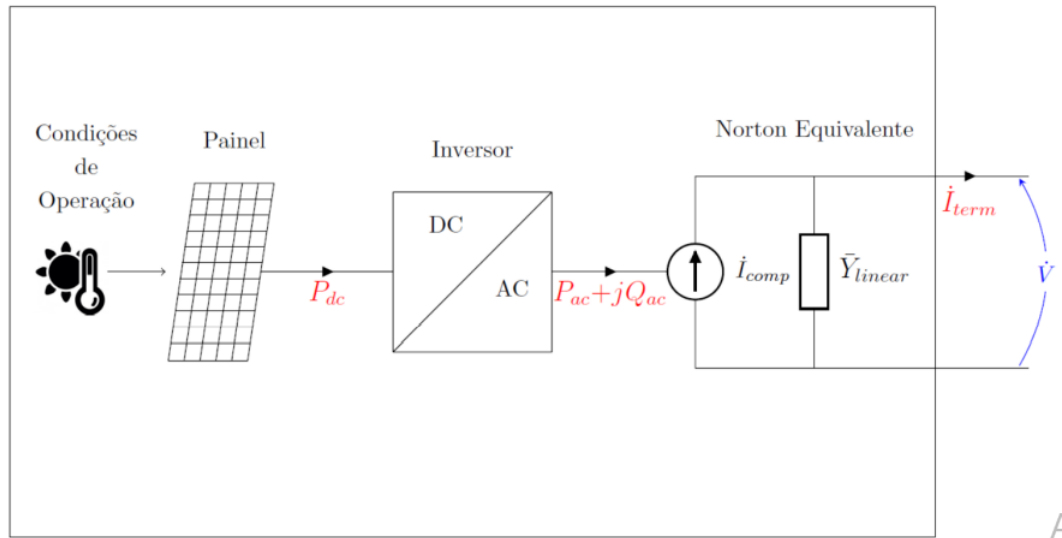
Figura 11 – Estrutura de *OpenDSS*.



Fonte: Adaptada de EPRI (2019).

### 2.14.1 PvSystem

O *PvSystem* é a representação de um sistema fotovoltaico conectado numa rede de distribuição no *software OpenDSS*, isto é, a criação de modelos para representar a GDFV conectados a rede (DUGAN; MONTENEGRO, 2013). Neste conjunto está o inversor que é o principal gerador dos harmônicos no sistema fotovoltaico e vários outros elementos do sistema fotovoltaico. A Figura 12 apresenta o elemento *PvSystem* no *OpenDSS*.

Figura 12 – Modelo *PvSystem* no *OpenDSS*.

Fonte: ( EPRI,2020).

## 2.15 Espectro de Frequência Curvas de Temperatura e Irradiação

### 2.15.1 Espectro De Frequência

O espectro de frequência corresponde o espectro harmônico gerado pelo sistema, sendo este elemento crucial para representar a resposta harmônica. Ele é uma função da potência em (pu) do equipamento. Então, como os inversores são elementos cruciais e que fazem interconexão dos dois sistemas, modelar o sistema *OpenDSS*, equivale dividi-lo em faixas de espectros de frequências (RADATZ, 2015). Na maioria dos casos os espectros são divididos em três níveis de potência, a saber: Nível alto, baixo e médio.

Com os níveis estabelecidos nos espectros pode-se determinar o comportamento harmônico em (pu) de cada componente no sistema. Sendo assim, a geração é considerada baixa quando a potência injetada está abaixo de 25% da potência nominal, média quando está entre 25% e 80% e alta quando é acima de 80%. Importante salientar que os momentos de baixa irradiação correspondem a baixa geração, igualmente aumento da distorção harmônica no sistema (JUNIOR, 2021).

### 2.15.2 Irradiação e Temperatura

A irradiação e temperatura são essências quando se deseja utilizar o modelo *PvSystem* para análise do sistema fotovoltaico. Quando não tiver estes dois Parâmetros a solução deve passar pela utilização do elemento *generator* do *OpenDSS*, que do resto modela quase todas as



tecnologias da geração distribuída conectadas numa rede de distribuição de energia.

Estas curvas em consonância com a potência do inversor possuem seguintes comportamentos: Conforme aumenta a temperatura espera-se uma diminuição da potência dos módulos, quando o sistema opera com potências mais elevadas do inversor espera-se que ele tenha uma maior eficiência. Lembrando que a eficiência dos módulos é diretamente proporcional a irradiação incidente (DUGAN; MONTENEGRO, 2013). Estes parâmetros são declarados como variáveis de entrada no *PVsystem*. O Quadro 1 mostra os parâmetros do *PvSystem*.

Quadro 1 – Parâmetros do *PvSystem* no *OpenDSS*.

| <b>PARÂMETROS</b>  | <b>DESCRIÇÃO</b>                       |
|--------------------|--|
| <b>KV</b>          | <b>Tensão nominal em Kv</b>            |
| <b>Bus1</b>        | <b>Barra1 do sistema</b>               |
| <b>KVA</b>         | <b>Potência nominal do inversor Kv</b> |
| <b>PF</b>          | <b>Fator de potência</b>               |
| <b>Irrad</b>       | <b>Irradiação base</b>                 |
| <b>Pmp</b>         | <b>Ponto de máxima Potência</b>        |
| <b>Temperature</b> | <b>Temperatura nominal</b>             |
| <b>Effecure</b>    | <b>Curva de eficiência</b>             |
| <b>Ptcurre</b>     | <b>Potência /Temperatura</b>           |
| <b>Daily</b>       | <b>Irradiação diária (24pontos)</b>    |
| <b>TDaily</b>      | <b>Temperatura diária</b>              |

Fonte: (AUTOR, 2022).

### 3 COMPORTAMENTO DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO PERANTE A INSERÇÃO DOS GERADORES FOTOVOLTAICOS

Este capítulo trará análise sobre a inserção dos sistemas fotovoltaicos nas redes de distribuição, visando discriminar a subestação Acarape-CE da Enel e a rede teste IEEE-13 barras. Para tal, procura demonstrar que nas instalações elétricas acontecem infinidade de problemas com a inserção da GDFV. São redes tradicionalmente programadas para um funcionamento passivo e devem alimentar somente as cargas. Então, com a conexão da GDFV, começa a gerar novos desafios que precisam ser solucionadas do ponto de vista técnico.

#### 3.1 Subestação Acarape-CE

A subestação Acarape-CE da , está localizada no município de Acarape no interior do estado de Ceará. É uma instalação elétrica composta por equipamentos de distribuição de energia e de proteção e controle do sistema. No levantamento feito nesta unidade elétrica, constatou-se que existe apenas uma conexão fotovoltaica (usina fotovoltaica da UNILAB) no sistema. A Figura 13 apresenta a subestação de Acarape-CE.

Figura 13 – Subestação Acarape-CE.



Fonte: (AUTOR, 2022).

Esta subestação é um sistema trifásico equilibrado composta por 2 barras (69KV e 13,8 KV), respectivamente. Possui cargas monofásicas, bifásica e trifásica. A conexão fotovoltaica acontece na barra de 13,8 KV e no alimentador (ACP01C3). Este alimentador possui 161,618

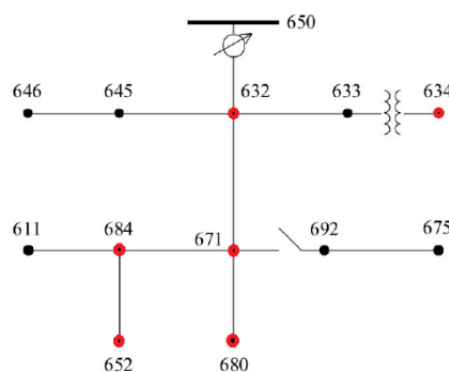
km de redes aéreas e cobre 6 municípios, a saber: municípios de Acarape, Baturité, Guaiúba, Pacoti, Palmácia e Redenção. Ela tem a capacidade para receber maior número de conexões fotovoltaicas. No entanto, a inserção de apenas uma usina fotovoltaica que é atendida em média tensão, apesar de modificar a configuração inicial da rede, mas ainda não foi detectado nenhum problema de conexão ou retorno de oscilação. Também, equivale afirmar que a taxa de distorção harmônica é insignificante. Por isso, não impacta negativamente na qualidade de energia.

### 3.2 Rede Teste IEEE-13 Barras

A rede IEEE-13 barras é uma rede disponibilizada pelo instituto de engenheiros eletrônicos e eletrônicos para os efeitos estudos e testes dos fenômenos que acontecem na rede de distribuição de energia elétrica. Ela foi desenvolvida para fornecer os profissionais da área de energia a possibilidade de testar suas hipóteses (RADATZ, 2015). É uma rede maior (13 barras) em relação a subestação de Acarape que conta com (2 barras) apenas.

Esse tipo de rede contém as cargas monofásicas, bifásicas e trifásicas destinadas para alimentar os consumidores residenciais e industriais. Essas cargas não são equilibradas como as cargas verificadas na subestação de Acarape, ou seja, possui cargas distintas, igualmente em desequilíbrio entre as fases. Porém, oferece um estudo maior e uma larga possibilidade de analisar a conexão fotovoltaica em diferentes âmbitos. A Figura 14 apresenta o diagrama unifilar da rede IEEE-13 barras com geradores fotovoltaicos conectados.

Figura 14 – Diagrama unifilar da rede IEEE-13 barras.



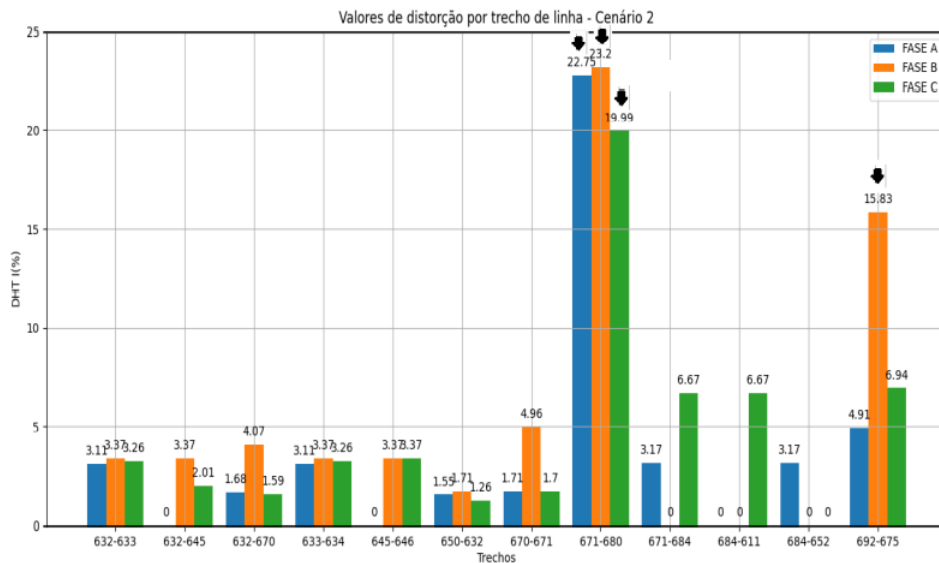
Fonte: (RADATZ, 2015).

O diagrama referido na Figura 14, demonstra de uma forma resumida a rede IEEE-13 barras. Estas barras possuem diferentes configurações e características diferentes. As conexões dos geradores fotovoltaicos no sistema são referenciados com pontinhos vermelhos.

De acordo com o Júnior (2021), seguindo as indicações da Aneel, citadas no item (2.14), a rede IEEE-13 barras pode ser utilizada no software *OpenDSS*, para modelar diferentes pontos do sistema conectado com um, ou mais geradores fotovoltaicos. Para tal, é necessário criar cenários que representam as condições em que a irradiação varia dentro do sistema, sobretudo nos períodos de maior injeção harmônica.

**Cenário 1:** representa a situação em que existe apenas uma única conexão fotovoltaica na rede IEEE-13 barras. Fato que pode ser análogo a subestação de Acarape, uma vez que nela existe apenas uma única conexão fotovoltaica. Embora ambas possuem parâmetros elétricos diferentes, mas os efeitos podem ser mesmos. Para tal, a análise sobre a distorção harmônica de corrente no sistema conectado a um gerador fotovoltaico na barra 680, foi evidenciado para horário de 17h, período de baixa irradiação, e conseqüentemente, maior injeção dos harmônicos no sistema. A Figura 15 apresenta a taxa de distorção harmônica de corrente nos períodos de baixa irradiação solar.

Figura 15 – Taxas de distorção harmônica das correntes de cada fase para o cenário 1 às 17h.

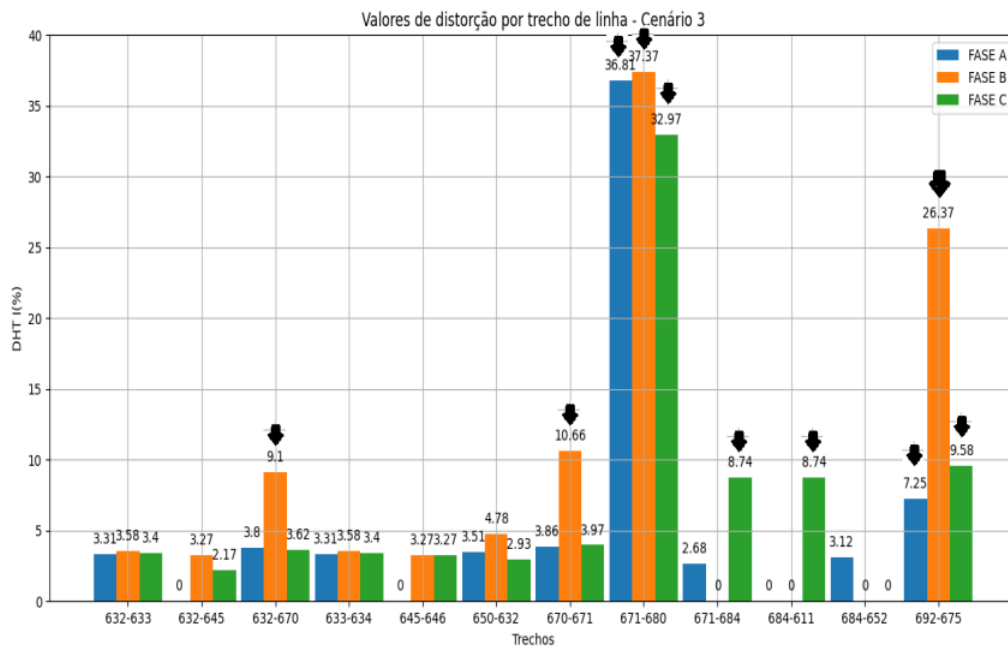


Fonte: (JUNIOR, 2021).

Com apenas uma conexão fotovoltaica na rede IEEE-13 barras, ocorre elevação na taxa de distorção harmônica de corrente. A tensão não varia muito, razão pela a qual não foi referenciada. A elevação da corrente pode ser justificada pela soma das harmônicas que inicialmente estavam no sistema, com a presença de apenas um gerador fotovoltaico. Essa elevação não é suficiente para prejudicar o sistema e os consumidores atendidos na rede. Cenário, que também que foi percebido na visita técnica realizada na subestação de Acarape-CE.

**Cenário 2:** representa a conexão de 6 geradores fotovoltaicos na rede IEEE-13 barras, ilustradas na figura 14, submetidas as mesmas análises que o primeiro cenário, e para as mesmas condições ou horário de irradiação solar (17h). A Figura16 é uma clara demonstração da poluição harmônica na rede IEE-13 barra.

Figura 16 – Taxas de distorção harmônica das correntes de cada fase para o cenário 2 às 17h.



Fonte: (JUNIOR, 2021).

### 3.3 Constatações Sobre o Comportamento das Redes de Distribuição Submetidas a GD

Evidente que não existe nenhuma rede livre de problema, principalmente no que diz respeito a distorção harmônica das tensões e correntes, porque este faz parte do comportamento dos dispositivos de eletrônica de potência usados para a geração de energia.

Por isso, mesmo antes da inserção da GD na rede de distribuição, as cargas não lineares disponíveis provocavam harmônicos, embora de forma despercebida ou seja que não impacta de forma negativa nos parâmetros elétricos (tensão, corrente, fluxo de potência) etc. Contudo, com a presença de uma unidade fotovoltaica na rede, as harmônicas inerentes as cargas iniciais somam com as que são geradas pelos inversores fotovoltaicos. Deste modo, uma quantidade expressiva de harmônicos aparecem de forma exponencial quando se tem maior quantidade dos sistemas fotovoltaicos conectados a rede, sobretudo nos momentos de baixa irradiação solar. Tais fatores, podem trazer consequências desastrosas para ambas as partes.

Neste caso, é necessário utilizar alguma técnica para resolver estas inconveniências.

### 3.4 Filtros Harmônicos

Os impactos harmônicos podem ser mitigados através de filtros harmônicos (equipamentos de proteção), destinados a estabelecer reduções e controle dos níveis de poluição harmônica no sistema. É uma das melhores técnicas encontradas ainda hoje para reduzir os níveis dos harmônicos.

Este equipamento consegue reduzir a amplitude de uma ou mais correntes ou tensões harmônicas em uma determinada parte do sistema. Ele tem a função de receber o conteúdo de alta frequência, devido ao chaveamento, e assim dar a característica senoidal para a tensão que na sequência, passa pelo transformador de acoplamento. Os filtros também, auxiliam tanto no desempenho de filtragem assim como na compensação reativa, as instalações que apresentam muitas perturbações harmônicas na rede normalmente necessitam de compensação dos reativos. Funções que normalmente os filtros têm a capacidade de resolver uma vez instalados e conectados em paralelo com o sistema e próximo as cargas harmônicas(OLIVEIRA, 2016).

No que tange a filtragem, eles conseguem filtrar as correntes vindas das cargas harmônicas através dos seguintes procedimentos: as correntes fluem para o interior dos filtros e penetram no sistema em magnitudes que dependem da relação entre suas respectivas admitâncias para as frequências consideradas. O padrão desejado da admitância do circuito de filtragem pode ser obtido através da apropriada combinação de elementos capacitivos, indutivos e resistivos, formando, por exemplo, braços de filtros sintonizados ou amortecidos, em combinações variadas. O desempenho de filtragem é também determinado, em grande parte, pelos efeitos de variações de frequência e da temperatura ambiente (TEIXEIRA, 2009).

Portanto, com o *OpenDSS*, pode-se prever os comportamentos e níveis dos harmônicos no sistema, e para completar, isto é colocar em prática com maior eficiência, é necessário tomar a decisão de instalar os filtros passivos (capacitores, reatores e resistores), no sentido de proteger o sistema da melhor forma possível.

## 4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou o estudo sobre os impactos causados por harmônicos gerados pelos inversores na conexão entre a GDFV e a rede de distribuição. Com isso, foi possível considerar as vantagens da disseminação da GDFV conetada a rede, sem ignorar a preocupação quanto os harmônicos injetados por estas cargas na rede de distribuição.

Nota-se que a qualidade de energia é um parâmetro que depende não somente dos procedimentos de fornecimento de energia, como também dos princípios de funcionamento dos equipamentos no sistema, contudo, esse fato pode ser tão ineficiente quando o fornecimento é afetado pela presença massiva das cargas harmônicas. Diante disso, os problemas desta natureza podem ser mitigados e solucionados com a instalação dos filtros passivos.

Desta forma, recomenda-se identificar os pontos harmônicos do sistema no sentido de estabelecer uma metodologia de proteção segura na rede. Portanto, espera-se que a disseminação em larga escala da geração distribuída fotovoltaica no Brasil, possa ser compatibilizado com cumprimento escrupuloso das normas da ANEEL (PRODIST- modulo 8), recomendação (IEEE-519), como também, pela adoção dos mecanismo descritos neste trabalho, com intuito de garantir maior eficiência e eficácia nas redes de distribuição de energia elétrica.

### 4.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi abordado apenas os aspetos relacionados a distorção harmônica, como um dos parâmetros que impactam o sistema e influenciam negativamente a qualidade de energia elétrica. Existem outros factores que também são cruciais à qualidade de energia.

Portanto, a sugestão para trabalhos futuros seria investigar os problemas causados pelos transitórios oscilantes e impulsivos na conexão entre a GDFV e a rede distribuição. Dentro do mesmo domínio, também, sugere-se a modelagem destes problemas com o uso de *Matlab* em uma rede de distribuição real.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, M. d. O. L. Energia solar: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid. 2019.
- ANEEL, P. d. D. d. E. **Elétrica no Sistema Elétrico Nacional-PRODIST Módulo 8-Qualidade da Energia Elétrica Revisão 6**. 2015.
- ARRUDA, E. F. d. **Estimação de estados de distorções harmônicas em sistemas elétricos de potência utilizando estratégias evolutivas**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2008.
- DALVI, G. G. Avaliação de feed-in tariff para incentivo da geração distribuída solar fotovoltaica no brasil. Universidade Federal de Viçosa, 2017.
- DIAS, C. F. d. S. Análise dos impactos da geração distribuída em um alimentador de média tensão utilizando o software opendss. 2019.
- DUGAN, R. C.; MONTENEGRO, D. Reference guide: The open distribution system simulator. EPRI, 2013.
- JÚNIOR, O. M.; SOUZA, C. C. d. Aproveitamento fotovoltaico, análise comparativa entre brasil e alemanha. **Interações (Campo Grande)**, SciELO Brasil, v. 21, p. 379–387, 2020.
- NASCIMENTO, J. L. d. **Modelagem e validação de um sistema de geração fotovoltaica para avaliação de impactos da conexão em alimentador de distribuição**. Tese (Doutorado), 2021.
- OLIVEIRA, A. de; OLIVEIRA, J. C. de; VILAÇA, A.; FILHO, A. F. Uma contribuição para a quantificação e qualificação da distorção harmônica. In: **COBEP**. [S.l.: s.n.]. v. 97, p. 665–670.
- OLIVEIRA, T. T. d. Análise de distorção harmônica e fator de potência associados à inserção de geração fotovoltaica em rede de distribuição. 2016.
- RADATZ, P. Modelos avançados de análise de redes elétricas inteligentes utilizando o software opendss. **São Paulo**, 2015.
- SILVA, A. A. d. Inserção da micro e minigeração fotovoltaica distribuída no brasil para unidades consumidoras do grupo b. Fundação de Ensino e Pesquisa do Sul de Minas, 2016.
- TEIXEIRA, D. Â. Análise das distorções harmônicas: estudo de caso de um sistema industrial. Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- VARIZ, A. M. **Cálculo do Fluxo de Harmônicas em Sistemas Trifásicos Utilizando o Método de Injeção de Correntes**. Tese (Doutorado) — Tese de D. Sc., Coppe/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.