



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

CLARA COSTA XAVIER

ESTATÍSTICA DE FALHAS EM SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS

RIO LARGO, AL
2023

CLARA COSTA XAVIER

ESTATÍSTICA DE FALHAS EM SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia de Energia do Campus de Engenharia e Ciências Agrárias – CECA, da Universidade Federal de Alagoas – UFAL, como requisito para obtenção do Título de Engenheira de Energia.

Orientador: Prof. Dr. João Messias dos Santos

RIO LARGO, AL
2023

Catalogação na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

X3e Xavier, Clara Costa.

Estatística de falhas em sistemas solares fotovoltaicos. / Clara Costa Xavier. – 2023.

56f.: il.

Orientador(a): João Messias dos Santos.

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

Inclui bibliografia

1. Eficiência. 2. Energia elétrica. 3. Geração. 4. Efficiency. 5. Electricity. 6. Generation.
I. Título.

CDU: 621.472(81)

Folha de Aprovação

CLARA COSTA XAVIER

Estatística de falhas em sistemas solares fotovoltaicos

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 14 de setembro de
2023.

Documento assinado digitalmente
gov.br JOAO MESSIAS DOS SANTOS
Data: 09/10/2023 21:14:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. João Messias dos Santos, CECA/UFAL (Orientador)

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br PAULO PEDRO DA SILVA
Data: 11/10/2023 14:47:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo Pedro da Silva, CECA/UFAL (1º Avaliador)

Documento assinado digitalmente
gov.br CARLOS ASSIS DINIZ
Data: 10/10/2023 18:58:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Carlos Assis Diniz, CECA/UFAL (2º Avaliador)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a toda a minha família, que sempre me apoiou, principalmente aos meus pais, pois sempre foram meu suporte e meus maiores incentivadores;

Ao meu namorado, que esteve ao meu lado durante toda a graduação e me ajudou em todos os momentos que precisei;

Aos meus amigos, que sempre estiveram próximo a mim e se mantiveram pacientes e compreensivos, especialmente Roberta, Jessica, Wesley e Tâmara, que foram os que mais me auxiliaram nessa jornada;

E aos meus professores e orientador, que tornaram possível eu chegar onde estou hoje.

RESUMO

A energia solar fotovoltaica é uma das fontes renováveis que mais cresce atualmente no Brasil e no mundo. Com isso, existe uma grande preocupação com a eficiência da geração e com os erros que podem afetar o funcionamento do sistema solar. Em decorrência dessa preocupação, quatro análises estatísticas foram realizadas com o objetivo de compreender quais são os tipos de falhas mais recorrentes, onde elas estão localizadas e quais suas causas. Com isso, os dados utilizados nas análises foram extraídos da plataforma de monitoramento dos sistemas, que foi cedida por uma empresa instaladora do estado de Alagoas, contendo informações das falhas, para um período de 6 meses, e da tensão da rede de distribuição, para dois períodos, de 15 e de 30 dias, durante o funcionamento dos sistemas solar. Tendo em vista a necessidade de entender onde estavam os maiores problemas que essa energia enfrenta, o estudo foi realizado e obteve um resultado surpreendente, já que a quantidade e os tipos de falhas em alguns sistemas foram muito grandes, entre os principais, queda de rede/ilhamento, subtensão e sobretensão.

Palavras-chave: Eficiência; energia elétrica; geração.

ABSTRACT

Photovoltaic solar energy is one of the fastest growing renewable sources in Brazil and in the world, therefore, there is a great concern with the efficiency of generation and with the errors that can affect the functioning of the solar system. As a result of this concern, 4 statistical analyzes were carried out with the aim of understanding what are the most recurrent types of failures, where they are located and what their causes are. With that, the data used in the analyzes were extracted from the systems monitoring platform, which was provided by an installation company in the state of Alagoas, containing information on failures, for a period of 6 months, and on the voltage of the distribution network, of two periods, 15 and 30 days, during the functioning of the solar systems, the day. In view of the need to understand where the biggest problems that this energy faces were, the study was carried out and obtained a surprising result, since the number of failures in some systems were very large, where they were of different types, the main ones being, mains/island drop, undervoltage and overvoltage.

Keywords: efficiency; electricity; generation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Comparaçao entre fontes renováveis e não renováveis na matriz energética..... | 15 |
| Figura 2 - Radiação eletromagnética e espectro visível da luz. | 16 |
| Figura 3 - Efeito fotovoltaico..... | 17 |
| Figura 4 - Gap de energia. | 17 |
| Figura 5 - Componentes de um sistema solar fotovoltaico..... | 18 |
| Figura 6 - Célula fotovoltaica..... | 18 |
| Figura 7 - Módulo fotovoltaico | 19 |
| Figura 8 - Funcionamento do inversor..... | 20 |
| Figura 9 - Inclinação dos raios solares..... | 22 |
| Figura 10 - Plataforma de monitoramento..... | 29 |
| Figura 11 – Página do site do monitoramento de um sistema solar. | 30 |
| Figura 12 - Diagrama de Pareto das falhas do inversor SG110CX. | 46 |
| Figura 13 - Gráfico X da tensão da rede para amostra de 15 dias..... | 47 |
| Figura 14 – Gráfico X da tensão da rede para amostra de 15 dias com limites da NBR 16149..... | 47 |
| Figura 15 - Gráfico X da tensão da rede para amostra de 30 dias..... | 48 |
| Figura 16 - Gráfico X a tensão da rede para amostra de 30 dias utilizando como limites de controle os valores de acordo com a NBR16149. | 49 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Descrição dos códigos das falhas apresentados pelos inversores em caso de mau funcionamento | 25 |
| Tabela 2 – Comparação entre a quantidade de inversores por modelo e a quantidade de falhas e o tempo que demoraram para se recuperar uma de falha..... | 38 |

Sumário

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 12 |
| 2. REFERENCIAL TEÓRICO | 14 |
| 2.1 Meio ambiente..... | 14 |
| 2.2 Fontes de energia renováveis | 14 |
| 2.3 Energia solar | 15 |
| 2.3.1 O sol e a radiação solar | 15 |
| 2.3.2 Efeito fotovoltaico..... | 16 |
| 2.3.3 Componentes de um sistema solar fotovoltaico | 17 |
| 2.3.3.1 Módulos fotovoltaicos | 18 |
| 2.3.3.2 Inversores | 20 |
| 2.3.3.3 Fatores que afetam o rendimento do sistema solar fotovoltaico | 21 |
| 2.3.3.4 Orientação dos módulos | 21 |
| 2.3.3.5 Ângulo de instalação..... | 22 |
| 2.3.3.6 Sombreamento | 22 |
| 2.3.3.7 Temperatura..... | 23 |
| 2.3.3.8 Rede de distribuição | 23 |
| 2.3.3.9 Má execução da instalação | 23 |
| 2.4 Monitoramento do sistema..... | 23 |
| 2.5 Sungrow | 24 |
| 2.5.1 Linhas e modelos de inversores | 24 |
| 2.5.2 Falhas nos sistemas | 24 |
| 2.6 Uso da ferramenta estatística no controle de processos..... | 26 |
| 2.6.1 Estatística descritiva | 26 |
| 2.6.2 Distribuição de frequência | 27 |
| 2.6.3 Medidas de resumo | 27 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.6.4 | Controle estatístico do processo | 27 |
| 2.6.5 | Controle de Qualidade | 28 |
| 3. | MATERIAL E MÉTODOS..... | 29 |
| 3.1 | Material Utilizado..... | 29 |
| 3.1.1 | Modelos de inversores | 30 |
| 3.1.2 | Variáveis analisadas | 31 |
| 3.2 | Análise de dados | 31 |
| 3.2.1 | Estratificação dos dados | 31 |
| 3.2.2 | Análises estatísticas | 31 |
| 3.2.2.1 | Tabela de distribuição de frequência | 32 |
| 3.2.2.2 | Medidas de posição | 33 |
| 3.2.2.3 | Gráfico de Pareto | 33 |
| 3.2.2.4 | Gráfico de Controle | 34 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 35 |
| 4.1 | Estatística Descritiva..... | 35 |
| 4.2 | Distribuição de frequência de falhas considerando cada modelo de inversor | 37 |
| 4.3 | Medidas de posição e dispersão | 37 |
| 4.4 | Controle de Qualidade..... | 38 |
| 4.4.1 | Diagrama de Pareto Geral..... | 38 |
| 4.4.2 | Diagrama de Pareto por Modelo de Inversor | 40 |
| 4.4.2.1 | Modelo SG3K-S | 40 |
| 4.4.2.2 | Modelo SG8K3-D | 41 |
| 4.4.2.3 | Modelo SG15KTL-M | 42 |
| 4.4.2.4 | SG20RT | 43 |
| 4.4.2.5 | SG33CX | 44 |
| 4.4.2.6 | SG110CX..... | 45 |
| 4.4.3 | Gráfico de Controle para a tensão da rede de distribuição. | 46 |

| | |
|-----------------------------------|----|
| 4.4.3.1 Amostra para 15 dias..... | 46 |
| 4.4.2.2 Amostra para 30 dias..... | 48 |
| 5. CONCLUSÃO..... | 50 |
| REFERÊNCIAS | 51 |

1. INTRODUÇÃO

A sociedade está em constante desenvolvimento e precisou de anos para chegar aonde está atualmente. Com isso, diversos recursos da natureza foram explorados a fim de suas matérias-primas e seus produtos serem utilizados. Juntamente a isso, a crescente demanda por energia fez com que alguns recursos fossem utilizados desenfreadamente, sem medir os riscos que poderiam trazer para o planeta e para a humanidade (SOARES, 2017).

Em pleno início do século 21, a maior parte da energia utilizada mundialmente ainda é baseada nos combustíveis fósseis, importantes contribuintes da poluição do meio ambiente e do aquecimento global. Apesar disso, o Brasil é um dos países que não segue esse padrão. Ele tem uma grande parcela da matriz energética vinda de fontes renováveis, em que a participação de hidráulica, biomassa, solar e eólica faz um papel fundamental quanto a contribuição no combate à poluição do planeta, e na busca pela diminuição de riscos que vem junto a alta demanda por energia, já que essas são fontes que se complementem, pois são intermitentes, e não contínuas (BEN, 2022).

Para fazer toda a regulamentação do setor elétrico, foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, agência vinculada ao Ministério de Minas e Energia, foi ela que, por meio da Resolução normativa ANEEL nº 482/2012, permitiu que os consumidores brasileiros produzissem sua própria energia elétrica (DANTAS, 2019).

Atualmente, as questões envolvendo a crescente demanda de energia e a escassez de algumas fontes fez com que as tarifas pagas nas contas de energia elétrica aumentassem consideravelmente. Com isso muitas pessoas procuraram alternativas e passaram a investir em micro e minigeração distribuída de energia elétrica (BEZERRA, 2022).

Tendo em vista fatores como o a grande disponibilidade do sol, que é a fonte da geração, a não necessidade de uma grande área para instalação e a possibilidade dos sistemas serem alocados nos próprios locais de consumo, como residências, comércios e indústrias, a energia solar fotovoltaica passou a ter um grande destaque atualmente (OLIVEIRA, 2020). A procura por soluções para a diminuição das contas de energia somado a fatores decisivos na energia solar fotovoltaica fez com que o

investimento nessa forma de geração ao longo dos anos tornasse ela no ano de 2022 a segunda maior fonte de energia elétrica do Brasil (ANEEL/ABSOLAR, 2023).

Apesar dos pontos positivos que cercam a energia solar, alguns fatores reduzem sua eficiência, como problemas na rede de distribuição de energia elétrica, já que a maioria dos sistemas fotovoltaicos são a ela conectados, somados a erros de projeto, erros de instalação e defeitos nos equipamentos que compõem todo o sistema (OLIVEIRA, 2020). Dessa forma, para prevenir ou solucionar esses problemas, todos os inversores dispõem de monitoramento remoto, onde é possível verificar todos os seus parâmetros, incluindo a curva de geração e uma lista com os erros que estão acontecendo e suas possíveis soluções.

Apesar disso, o uso de ferramentas que possam ajudar aos gestores na tomada de decisões, como por exemplo o uso da estatística no controle de qualidade desses equipamentos tornando-se cada vez mais necessários (SANTOS, 2011).

Sendo assim, com o controle de qualidade será possível identificar se o processo está sendo desempenhado de forma correta ou não, se existe alteração em algum parâmetro e quais os tipos de alterações, a fim de manter a qualidade necessária para que o produto seja utilizado sem prejuízos pelos consumidores e informar aos gestores do processo sua performance (SAMOHYL, 2009).

Com isso, o objetivo desse trabalho foi aplicar ferramentas estatísticas da qualidade para analisar sistemas solares fotovoltaicos conectados a rede de distribuição de energia elétrica no estado de Alagoas, a fim de entender seus processos e identificar se estão ocorrendo alterações nos seus parâmetros produtivos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Meio ambiente

Todos os recursos necessários para a sobrevivência dos seres humanos são extraídos de alguma forma do meio ambiente, como a comida e as matérias-primas de diversos produtos usados em larga escala pela população (GALEMBECK, 2009).

A exploração desses recursos acabou causando diversas transformações nos ecossistemas da terra e trazendo um grande nível de poluição. Dessa forma, atualmente, existe uma preocupação para que essas constantes transformações sejam minimizadas utilizando recursos que não se esgotem e que emitam menos poluição (MAY, 2010).

Então, a necessidade de fontes renováveis, que fossem inesgotáveis, e que não causassem tantos impactos, fez com que recursos que antes não eram explorados diretamente passassem a ser utilizados, como a energia solar fotovoltaica (PEREIRA, 2016).

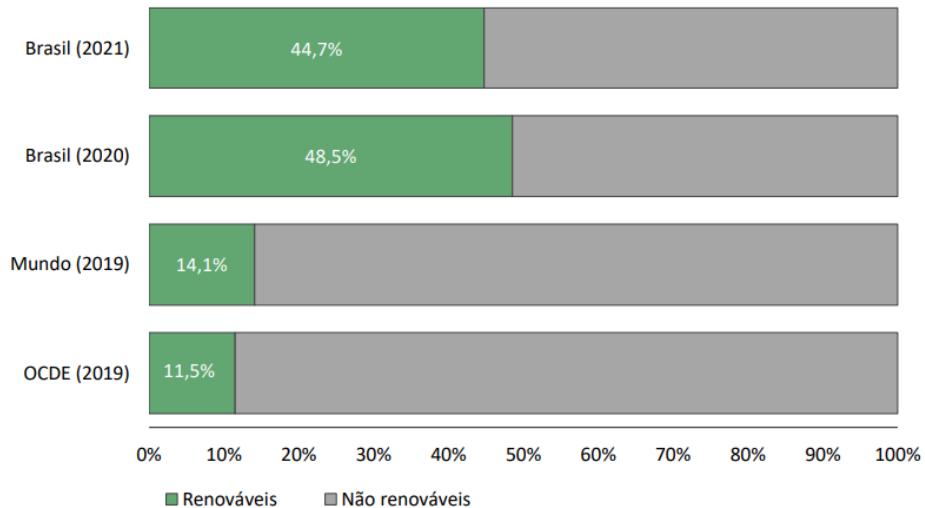
2.2 Fontes de energia renováveis

À medida que a sociedade foi se desenvolvendo, a demanda por energia foi aumentando, e junto a isso, a preocupação com efeitos causados no planeta fez com que as fontes de energia renováveis, que são aquelas que não correm o risco de se esgotar devido ao seu uso, passassem a ser exploradas (EPE, 2022).

Com isso, em países com proporções continentais foi possível explorar diversos tipos de fontes devido as condições existentes em seu território, condicionados ao seu clima favorável, sendo as principais fontes renováveis exploradas biomassa, solar, eólica e hidrelétrica (Figura 1) (MAUAD, 2017).

Figura 1 - Comparação entre fontes renováveis e não renováveis na matriz energética.

Participação das renováveis na OIE
Fonte: Agência Internacional de Energia (AIE) e EPE para o Brasil. Elaboração: EPE



Fonte: BEN, 2022.

Diferente de países com grandes proporções, mas que estão localizados em regiões de clima temperado, onde todas as estações do ano são muito bem definidas, o Brasil apresenta um clima que possibilita a exploração da energia proveniente do sol durante praticamente todo o ano, principalmente nas regiões norte e nordeste. Devido a isso, a energia solar fotovoltaica teve um aumento expressivo dentro da matriz elétrica do país nos últimos anos (ABSOLAR, 2023).

2.3 Energia solar

2.3.1 O sol e a radiação solar

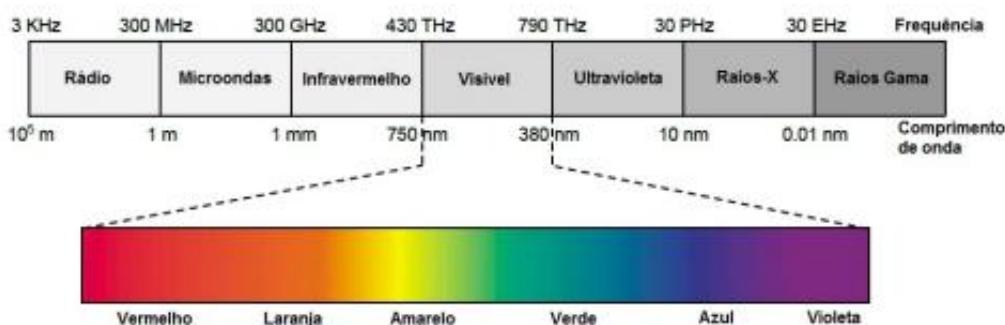
O sol, principal estrela do sistema solar, é a fonte de 99,97% de toda a energia encontrada na biosfera, e por isso, também é responsável por toda a vida encontrada na terra, seja direta ou indiretamente (FERREIRA, 2006).

De acordo com Milone (2018), a energia que esse astro produz é proveniente de diversas reações termonucleares que ocorrem em seu núcleo, porém a maior parte dela é utilizada para manter as condições de temperatura e pressão internas. Somente uma pequena parte é emitida para o universo em forma de radiação eletromagnética, onde do total, apenas 1400 W por metro quadrado chega na superfície da terra, o que

representa a geração de aproximadamente 10 bilhões de Itaipu somando toda a área do planeta terra (STENSMANN, 2022).

A radiação eletromagnética (Figura 2) que chega na atmosfera terrestre pode ser definida de duas formas, sua maior parcela é definida como não visível, em que, a agitação de átomos e células leva a mudança de temperatura dos corpos, e a menor parcela é definida como luz visível, parte que é possível enxergar, a exemplo das cores, onde essas radiações são diferenciadas pelo seu comprimento de onda e pela sua frequência (VILALVA, 2012).

Figura 2 - Radiação eletromagnética e espectro visível da luz.



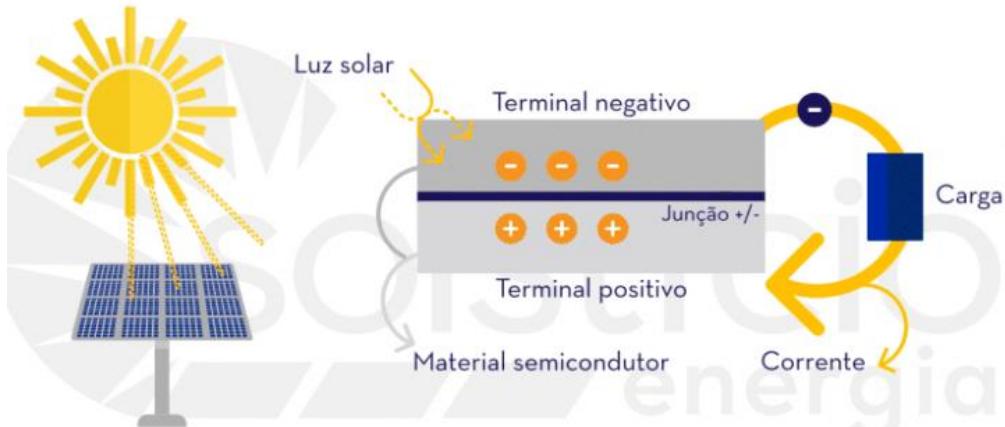
Fonte: Comunicação por luz visível: Conceitos, aplicações e desafios, 2017.

Ao longo do desenvolvimento da sociedade, estudos com a radiação que chegava à superfície da terra foram realizados, dessa forma foi descoberto um fenômeno chamado de efeito fotovoltaico, que posteriormente veio a ser usado como gerador de energia elétrica em locais remotos (REIS, 2020).

2.3.2 Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico (Figura 3) é um fenômeno físico que foi observado há muitos anos por um físico francês chamado Edmond Becquerel, que percebeu que alguns materiais semicondutores tinham a capacidade de absorver a energia presente nos fôtons da radiação proveniente do sol, transformando-a em energia elétrica (ZILLES, 2012).

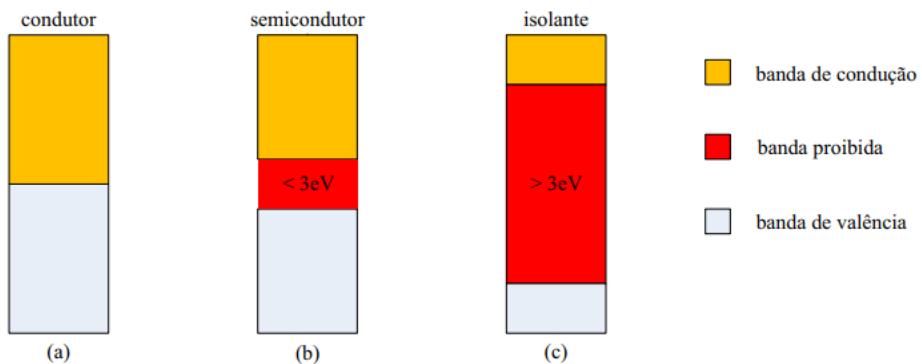
Figura 3 - Efeito fotovoltaico



Fonte: <https://www.solsticioenergia.com/2017/08/17/como-funciona-celula-fotovoltaica/>. Acessado em: 22 de novembro de 2022.

Esses materiais são compostos por duas bandas: uma de valência, cheia de elétrons semi livres, e uma de condução, parcialmente vazia, que são separadas por uma lacuna chamada de *Gap* (Figura 4), ou banda proibida, que pode chegar a até 3 elétron-volt, onde os elétrons são obrigados a passar para ir de uma banda a outra (PINHO, 2014).

Figura 4 - Gap de energia.



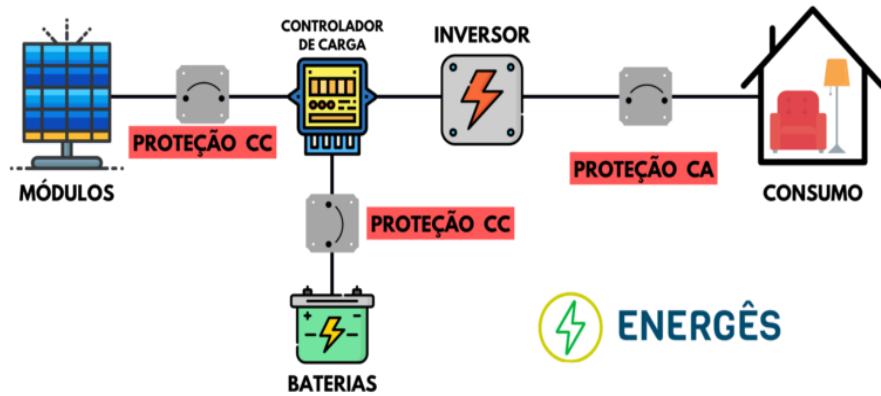
Fonte: PINHO, 2014.

2.3.3 Componentes de um sistema solar fotovoltaico

Os componentes de um sistema solar fotovoltaico (Figura 5) são divididos em blocos, podendo ter dois ou três. O primeiro é o bloco gerador, onde tem os módulos, a estrutura usada como suporte e todo o cabeamento necessário para fazer a ligação desses módulos. O segundo é composto pelos inversores de energia, controladores de carga e os dispositivos de proteção. Já o terceiro bloco é composto pelas baterias,

atualmente sendo usados apenas nos casos de sistemas que não são conectados à rede de distribuição de energia elétrica (PINHO, 2014).

Figura 5 - Componentes de um sistema solar fotovoltaico.

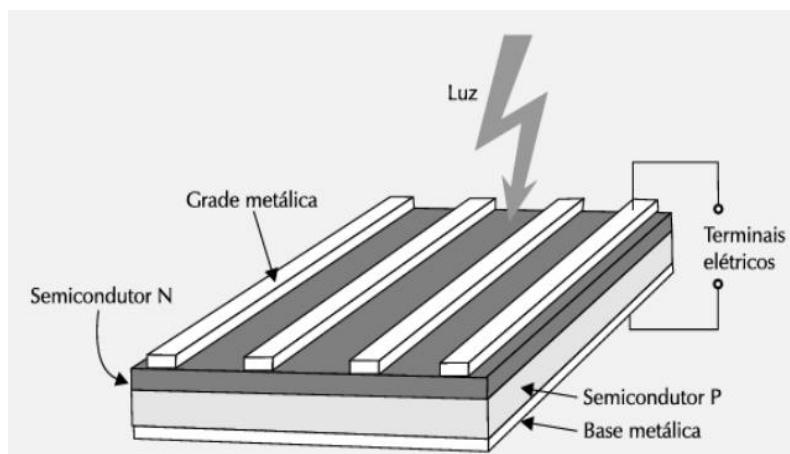


Fonte: ENERGÊS, 2020.

2.3.3.1 Módulos fotovoltaicos

As células fotovoltaicas (Figura 6) são responsáveis pela conversão da radiação solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Elas são constituídas por duas camadas de material semicondutor, sendo uma positiva e uma negativa, com base metálica na parte inferior e uma grade metálica na parte superior. Essas duas camadas de material semicondutor servem para gerar a corrente elétrica, já a base inferior e a grade superior servem para fazer a coleta dela (VILLALVA, 2012).

Figura 6 - Célula fotovoltaica.

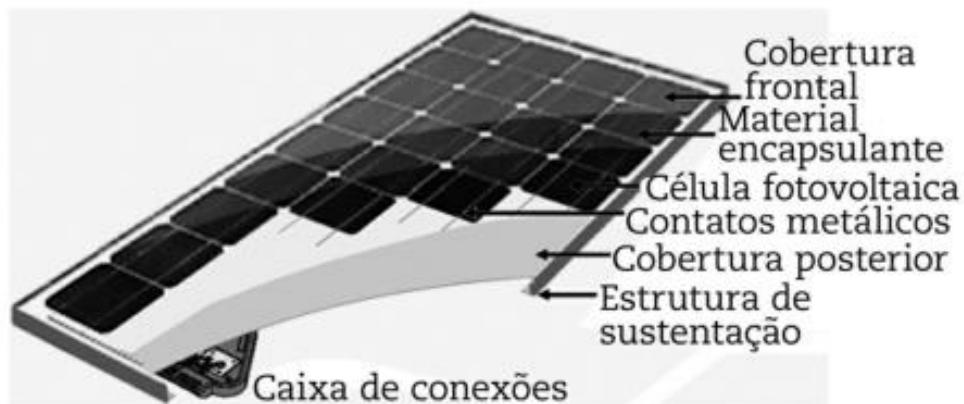


Fonte: VILLALVA, 2012.

As células mais comumente utilizadas, conseguem gerar, em condições ideais, cerca de 4,5 A de corrente e aproximadamente 0,48 V de tensão. Assim, quando conectadas, em série e/ou em paralelo e nas configurações necessárias, elas conseguem fornecer os valores ideais para o funcionamento de equipamentos e para a distribuição na rede (ZILLES, 2012).

A estrutura física do módulo (Figura 7) é composta pelos contatos metálicos, que tem o objetivo de fazer a conexão entre as células; por um filme encapsulante e isolante, que fica sobre as células; por um vidro antirreflexivo, que funciona como uma cobertura frontal e serve para proteger as células e aumentar a absorção da luz; por uma cobertura posterior, usada como protetora de alguns componentes e isolante elétrico; pelas caixas de conexões, que tem por finalidade conectar os módulos; e pela estrutura metálica, que serve para dar firmeza e proteção, principalmente em casos de eventos severos (ZILLES, 2012).

Figura 7 - Módulo fotovoltaico



Fonte: ZILLES, 2012

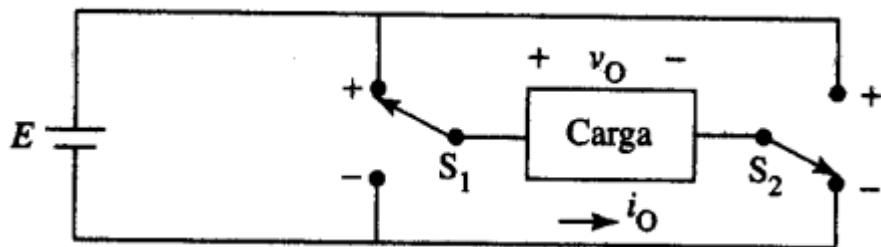
Os módulos precisam estar conectados uns aos outros para fornecer a quantidade de energia necessária para o inversor, de forma que eles são ligados em série para aumentar a tensão e conectados em paralelo para se obter uma corrente maior (MOURA, 2021).

2.3.3.2 Inversores

A energia gerada pelos módulos fotovoltaicos está na forma de corrente contínua (CC), e devido a isso, essa energia não pode ser consumida pelas residências, nem injetada na rede, já que a distribuição da energia ocorre por meio da corrente alternada. Por esse motivo, faz-se necessária a utilização dos inversores, responsáveis por promover a conversão da energia de corrente contínua para corrente alternada (CA), além de sincronizar a tensão na saída do equipamento com a tensão da rede (PINHO, 2014).

Os inversores fazem essa conversão por meio de elementos de chaveamento (Figura 8). No caso dos inversores monofásicos, o circuito mais simples é representado por duas chaves que ligam e desligam a energia gerada pelos módulos à carga, de forma alternada, transformando a tensão para o formato de onda retangular (DA SILVA, 2019).

Figura 8 - Funcionamento do inversor



Fonte: DA SILVA, 2019.

Esses equipamentos possuem dois terminais, sendo uma entrada, para a energia gerada nos módulos, e uma saída, para a rede de distribuição ou residência. Com isso, os inversores seguem regras de funcionamento, definidas pelos fabricantes ou por normas técnicas estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (URBANETZ JUNIOR, 2012).

Os fabricantes pré-estabelecem os parâmetros de funcionamento de acordo com a potência do equipamento para evitar a ocorrência de falhas que possam trazer danos, como, corrente e tensão máxima e mínima para a entrada e para a saída (PINHO, 2014).

Já a ABNT estabelece normas seguidas pelas concessionárias de energia elétrica, para evitar acidentes, a exemplo a Norma Brasileira 16149:2013 (NBR 16149:2013), que estabelece que os sistemas fotovoltaicos devem parar de injetar

energia elétrica na rede de distribuição, parando o seu funcionamento, caso a tensão da rede esteja 20% menor ou 10% maior que a tensão nominal, que, no caso do estado de Alagoas, é de 220 V.

Com relação a energia gerada pelos módulos, existe uma região de operação onde há um ponto de máxima potência, e com isso, os inversores conectados a rede já possuem a função de buscar sempre operar dentro dessa região. Dessa forma, os inversores possuem entradas para dividir os módulos e maximizar esse ganho, conhecidos como *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), (URBANETZ JUNIOR, 2012).

2.3.3.3 Fatores que afetam o rendimento do sistema solar fotovoltaico

O rendimento de um sistema solar pode ser influenciado por diversos fatores, e assim eles tanto podem fazer com que a geração tenha uma queda pequena, quanto podem fazer com que esse rendimento seja reduzido até zero. Alguns desses fatores são: orientação de instalação dos módulos, ângulo de instalação, sombreamento, temperatura dos equipamentos e falhas, sejam elas por parte da rede de distribuição, ocasionadas pela má instalação dos componentes do sistema ou causadas por problemas relacionados ao inversor (ARAÚJO, 2016).

2.3.3.4 Orientação dos módulos

Os raios solares são ondas eletromagnéticas paralelas entre si, e que ao passar pela atmosfera, a menor parcela sofre efeito da difusão e toma todas as direções, já sua maior parte, chega em linha reta à superfície terrestre. Porém, esses raios não chegam perpendiculares, eles fazem um certo ângulo com a horizontal, que varia ao longo dos dias e dos meses do ano devido ao ângulo de inclinação da terra e aos movimentos que ela faz, como rotação e translação (VILLALVA, 2012).

Devido a isso, a orientação que os módulos serão instalados é escolhida de forma que se consiga ter o maior aproveitamento dos raios solares. Então, não é recomendado que sejam instalados para o leste nem para o oeste, pois assim a energia não seria aproveitada durante todo o dia, apenas durante a manhã ou à tarde. Com isso, é recomendado que eles sempre estejam virados para a linha do equador. Assim, quando está no Sul deve ser orientado para o norte e quando está no norte deve ser orientado para o sul (PINHO, 2014).

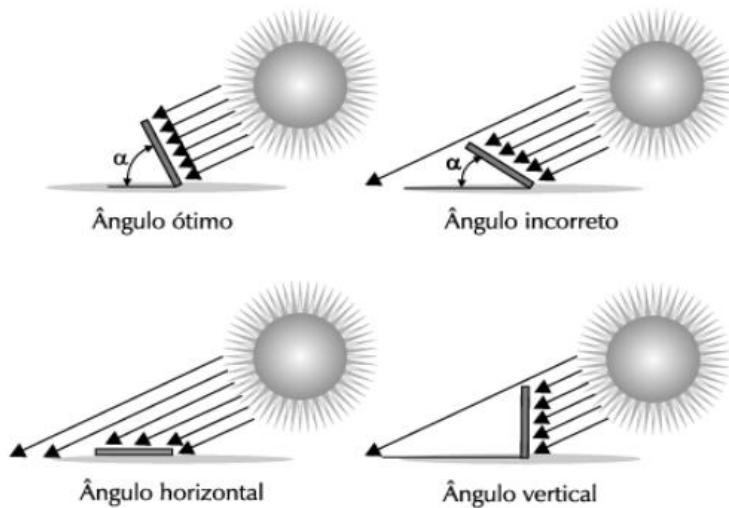
Também é orientado que em casos que não seja possível colocar todos os módulos na mesma orientação, eles devem ficar dispostos de forma que os módulos de uma mesma MPPT fiquem na mesma orientação, ou seja, se um inversor tiver 2 MPPT's ou mais, é possível utilizar mais de uma orientação (MOTA, 2013).

2.3.3.5 Ângulo de instalação

O ângulo em que os módulos são instalados faz muita diferença na eficiência da geração do sistema, assim, combinado com a orientação correta é possível maximizar a captação dos raios solares e obter um rendimento maior (VARGAS, 2021).

Esse ângulo (Figura 9) varia de acordo com a latitude da localização. Assim, quando os módulos estão mais próximos da linha do equador, o ângulo recomendado feito com a horizontal é aproximadamente zero e à medida que a localização muda e vai em direção aos polos, esse ângulo deve aumentar (PINHO, 2014).

Figura 9 - Inclinação dos raios solares



Fonte: VILLALVA, 2012.

2.3.3.6 Sombreamento

Muitos sistemas são instalados sem levar em consideração o sombreamento que pode ser causado nos módulos por estruturas que os cercam, como casas mais altas, prédios e árvores, ou nos casos de sistemas instalados em solo, o relevo do terreno e a vegetação. Esses fatores afetam diretamente o rendimento do sistema,

pois uma placa sombreada é o suficiente para interferir na geração (CARVALHO, 2021).

2.3.3.7 Temperatura

Quando estão sob altas temperaturas, os módulos fotovoltaicos tem uma diminuição no rendimento, isso acontece devido a tensão e a temperatura serem inversamente proporcionais, pois, quando a temperatura aumenta, a tensão cai (STAMBUK, 2017).

2.3.3.8 Rede de distribuição

Os sistemas que são ligados à rede de distribuição de energia elétrica, conhecidos como ongrid, funcionam de modo que a energia que não é consumida logo após a geração pelos equipamentos dentro das residências é injetada na rede de distribuição de energia. Dessa forma, para proteção do próprio equipamento e de pessoas que venham a vir fazer manutenções na rede, quando falta energia por parte da concessionária, o inversor é obrigado a parar seu funcionamento, o que acaba diminuindo o rendimento do sistema solar (ZILLES, 2016).

2.3.3.9 Má execução da instalação

A etapa da instalação em um sistema solar deve ser feita com todo o cuidado possível e deve seguir à risca todas as especificações de projeto e de normas a fim de evitar quaisquer problemas ou acidentes. Todo equipamento mal instalado, ou instalado incorretamente, pode ocasionar não somente a redução da eficiência como também a perda do próprio equipamento (PINHO, 2014).

2.4 Monitoramento do sistema

O monitoramento remoto dos sistemas é fundamental para seu bom funcionamento. Esse monitoramento é feito através de equipamentos eletrônicos, chamados de **dataloggers**, que ficam conectados aos inversores e transmitem todos os dados de geração para plataformas online que são disponibilizadas pelos próprios

fabricantes ou por algumas empresas especializadas nesse tipo de monitoramento (PIOMBINI, 2018).

É por meio dessas plataformas que tanto empresas instaladoras, quanto o cliente final pode acompanhar o desempenho do seu sistema. Nelas é possível fazer o acompanhamento da geração em tempo real, fazer análises acerca do desempenho e tomar medidas nos casos que forem necessários (PINHO, 2014).

2.5 Sungrow

A Sungrow é uma empresa fabricante de inversores solares fundada em 1997 na China pelo professor universitário Cao Renxian. Atualmente é uma das marcas de inversores mais utilizados no mundo todo. Ela dispõe de inversores de potência pequena, utilizados em sistemas de microgeração, como modelos de 3, 6, 8 e 10 kW, como também de potência maiores, como 110 kW, utilizados em sistemas de minigeração (SUNGROW, 2022).

2.5.1 Linhas e modelos de inversores

A empresa tem diversas linhas de inversores, em que em cada linha existem alguns modelos com potências diferentes. A existência de mais de um tipo de inversor por potência se deve a alguns fatores tecnológicos, estéticos e técnicos. Alguns deles se devem ao fato de que com o passar do tempo, estudos vão sendo realizados e novas tecnologias, com maior rendimento, vão sendo desenvolvidas, além de que, análises são feitas sempre para verificar aparecimento de defeitos que não poderiam aparecer no início do funcionamento, e para melhoria da apresentação do equipamento e harmonia com o ambiente. Assim, algumas linhas acabam sendo descontinuadas e param de ser comercializadas (SUNGROW, 2022).

2.5.2 Falhas nos sistemas

Quando o sistema apresenta alguma anormalidade no seu funcionamento, o inversor, na sua tela ou na plataforma de monitoramento, acusa que está ocorrendo alguma falha, essa falha é apresentada por meio de códigos numéricos que variam de 01 até 581 (Tabela 1), onde cada uma delas representa o que está ocorrendo, ou onde essa falha está ocorrendo (SUNGROW, 2018).

Tabela 1 – Descrição dos códigos das falhas apresentados pelos inversores em caso de mau funcionamento.

| CÓDIGOS | DESCRÍÇÃO DA FALHA | CÓDIGOS | DESCRÍÇÃO DA FALHA |
|---------|--|---------|---|
| 002 | Sobretensão de rede. | 041 | Falha de amostragem da corrente de fuga. |
| 003 | Sobretensão transitória da rede. | 042 | Anomalia no dispositivo |
| 004 | Subtensão da rede. | 044 | A temperatura ambiente é menor que a temperatura na qual o inversor pode operar normalmente. |
| 005 | Subtensão transitória da rede. | 053 | O DSP escravo detecta que a tensão da rede excede o valor de proteção. |
| 008 | Sobrefrequência da rede. | 100 | A corrente de saída CA excede o limite superior. |
| 009 | Subfrequência da rede. | 101 | A frequência da rede excede o valor de proteção, que é superior ao valor de proteção do erro 008. |
| 010 | Queda de rede/ Ilhamento/ Desconexão CA. | 102 | A frequência da rede está abaixo do valor de proteção, que é menor que o valor de proteção do erro 009. |
| 012 | Vazamento excessivo de corrente | 200 | Falha na Sobretensão do hardware do barramento. A tensão do barramento excede o valor de proteção |
| 015 | Sobretensão de rede. | 202 | Falha de Sobrecorrente do hardware FV. A corrente de PV1 |

| | | | |
|-----|---|---|--|
| | | | ou PV2 excede o valor de proteção. |
| 011 | Sobrecorrente de injeção CC. | 203 | A tensão de entrada FV excede a tensão do barramento. |
| 016 | A potência do módulo é excessivamente alta e fora da faixa de operação do inversor | 306 | Falha de incompatibilidade da alimentação de entrada e saída |
| 020 | Tensão excessivamente alta do barramento | 452; 453; 454 | Polaridade invertida de PV / Falha de conexão reversa da string |
| 038 | Falha do relé no lado da rede. | 536; 537; 538 | Alarme de reverso de PV / Polaridade reversa da string |
| 039 | Baixa resistência de isolamento do sistema, causada por mau isolamento do aterramento do módulo/cabo ou por umidade | 548; 549; 550; 551; 552; 553; 554; 555; 558; 559; 563 | Alarme de anomalia de PV / Anomalia na corrente de saída da string |
| 040 | Anomalia no dispositivo | 580; 581 | Anomalia na corrente de saída da string |

Fonte: Adaptado de SUNGROW, 2018.

Apesar de algumas falhas terem descrição semelhante ou até a mesma, elas representam problemas com pequenas diferenças, como a localização dessa falha, ou diferentes causas (SUNGROW, 2021).

2.6 Uso da ferramenta estatística no controle de processos

2.6.1 Estatística descritiva

Nessa modalidade da estatística a intenção é resumir os dados através de diagramas e gráficos. Então é necessário ter o conhecimento acerca de alguns conceitos importantes sobre os dados a serem estudados (REIS, 1999).

Os indivíduos que são o centro de um estudo são chamados de população e a amostra é uma parcela dessa população, enquanto que a variável é uma característica de um indivíduo da população, e podem ser divididas em variáveis qualitativas, as que não podem ser medidas, e variáveis quantitativas, as que podem ser quantificadas. Já dentro das variáveis quantitativas existem dois tipos, as contínuas, que podem assumir qualquer número, e as discretas, que assumem apenas números inteiros, que podem ser contados. (SASSI, 2020).

2.6.2 Distribuição de frequência

A distribuição de frequência é uma ferramenta importante da estatística descritiva, pois com ela é possível resumir os dados de forma mais simples. A base de dados deve ser disposta de modo que os indivíduos estejam separados por linhas e cada coluna represente uma variável. Assim é possível extrair informações como a contagem de indivíduos por variável. (SASSI, 2020).

Em alguns casos, pode ainda ser difícil identificar algum comportamento. Porém é possível observar os valores maiores e menores, e até concentrações de valores, de uma amostra (GUEDES, 2005).

2.6.3 Medidas de resumo

Além da distribuição de frequência, é possível resumir as informações sobre os dados estudados usando medidas de resumo, onde elas podem utilizar um único número para representar uma base de dados de variáveis quantitativas, como média, moda e mediana, ou podem utilizar medidas de dispersão, onde elas calculam o quanto distante os valores vistos estão da média, como desvio médio, variância e desvio padrão (GUEDES, 2005).

2.6.4 Controle estatístico do processo

O controle estatístico do processo (CEP) visa avaliar a qualidade do processo utilizando ferramentas estatísticas do controle de qualidade. As variáveis extraídas do resultado de um processo são conhecidas como efeitos da qualidade, enquanto as variações influenciadas pelo meio externo são conhecidas como causas da qualidade. Nos processos estudados, o melhor produto é aquele que apresenta menor dispersão e a qualidade é mais estável (BARBOSA, 2006).

Utilizando esse método é possível manter um controle de qualidade (CQ) dos produtos, procurando garantir que o processo esteja estável, evitando variações, defeitos e consequentemente perdas, melhorando o sistema de produção (GOUVEIA, 2018).

2.6.5 Controle de Qualidade

O controle de qualidade tem como objetivo garantir que os consumidores recebam produtos com a qualidade necessária para utilização, além de tentar garantir economia e segurança, referindo-se ao produto mais apropriado, e não o mais caro (COSTA, 2018).

A qualidade é resultado do trabalho em conjunto de um grupo de pessoas, até da alta gestão da empresa fornecedora do produto, e por isso, para se chegar ao resultado almejado, é necessário que uma série de medidas sejam implantadas planejadamente, pensadas para aquela empresa e para o tipo de produto fornecido, e de forma gradual (COSTA, 2018).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material Utilizado

Para este trabalho foram considerados sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede de distribuição que funcionam com inversores do fabricante Sungrow e com módulos mono e bifaciais. Os dados foram coletados entre o período de 01 de janeiro de 2022 até 30 de junho de 2022, a partir da plataforma de monitoramento online do fabricante de inversores Sungrow, disponibilizada por uma empresa instaladora/integradora, que fica localizada na cidade de Maceió.

O trabalho foi elaborado de forma que três amostras foram analisadas, em que a primeira é referente a ocorrência de falhas nos sistemas fotovoltaicos, onde os dados analisados foram extraídos da sessão de falhas da plataforma de monitoramento (Figura 10), que são disponibilizadas no formato de planilhas do Excel e conteve um total de 40.120 dados, com 7 variáveis.

Figura 10 - Plataforma de monitoramento.

Fonte: AUTORA (2023).

Já a segunda e a terceira amostra apresentam os dados referentes a tensão da rede durante o período em que o sistema deve estar em funcionamento. Esses dados foram retirados da seção de “curvas” do monitoramento, que fica dentro da interface exclusiva de cada sistema solar (Figura 11), conhecida como planta do sistema, e são apresentadas no formato de planilha do Excel (Figura 12). Dessa forma, a segunda amostra conteve dados de uma única planta e foram extraídas para

uma duração de 15 dias, compreendendo o período de 01 de junho de 2022 até 15 de junho de 2022. Já a terceira, apresenta dados de outra planta e compreendeu o período de 01 de junho de 2022 até 30 de junho de 2022, totalizando 30 dias.

Figura 11 – Página do site do monitoramento de um sistema solar.

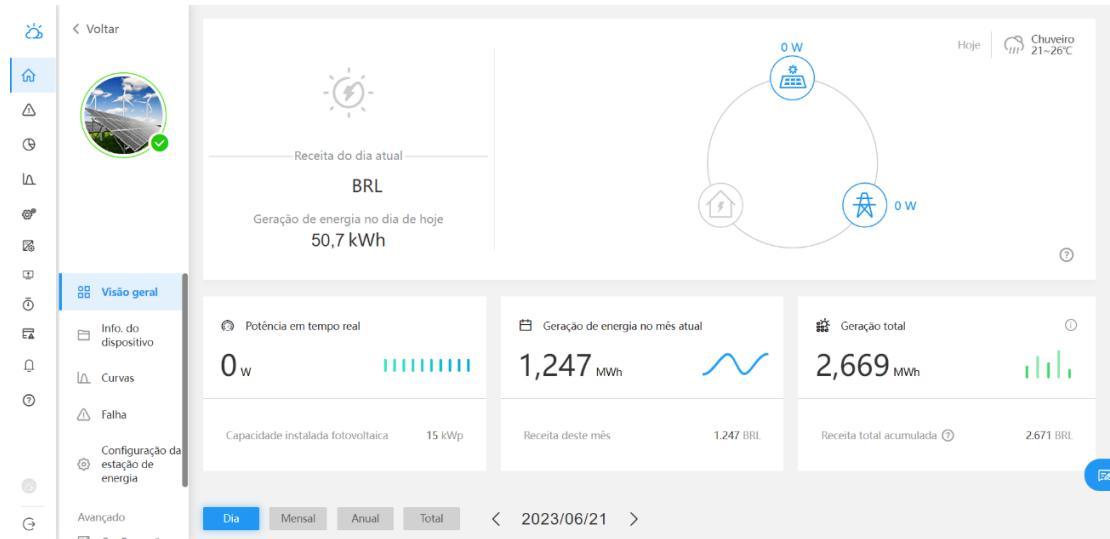


Figura 12: Planilha extraída da sessão de curvas da plataforma de monitoramento contendo os dados de tensão da rede.

| Horário | SG75CX_001_001/Tensão da Fase A(V) | SG75CX_001_001/Tensão da fase B(V) | SG75CX_001_001/Tensão da fase C(V) |
|------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 2022-06-01 05:15 | 213,2 | 218,2 | 213,2 |
| 2022-06-01 05:30 | 214,4 | 218,4 | 214,4 |
| 2022-06-01 05:45 | 216,0 | 220,0 | 215,2 |
| 2022-06-01 06:00 | 216,0 | 220,0 | 214,4 |
| 2022-06-01 06:15 | 214,4 | 217,6 | 212,8 |
| 2022-06-01 06:30 | 215,2 | 219,2 | 214,4 |
| 2022-06-01 06:45 | 213,6 | 217,7 | 212,2 |
| 2022-06-01 07:00 | 213,6 | 217,5 | 212,0 |
| 2022-06-01 07:15 | 213,6 | 217,6 | 212,0 |
| 2022-06-01 07:30 | 214,6 | 217,9 | 213,5 |
| 2022-06-01 07:45 | 218,4 | 222,4 | 216,8 |
| 2022-06-01 08:00 | 214,4 | 218,4 | 213,8 |
| 2022-06-01 08:15 | 217,6 | 221,6 | 216,8 |
| 2022-06-01 08:30 | 216,8 | 219,3 | 216,0 |

Fonte: AUTORA (2023).

3.1.1 Modelos de inversores

Como material de estudo, o trabalho utilizou as falhas apresentadas em 17 diferentes modelos de inversores de 4 linhas distintas, com potências variando de 2 kW até 110 kW: SG2K-S, SG3K-S, SG3K-D, SG4K-D, SG5K-D, SG6K-D, SG8K3-D,

SG12KTL-M, SG15KTL-M, SG20KTL-M, SG15RT, SG20RT, SG33CX, SG40CX, SG50CX, SG75CX, SG110CX.

3.1.2 Variáveis analisadas

Para a realização desse trabalho foram utilizadas as seguintes variáveis:

- a) Nome da usina: Demonstra em qual planta fotovoltaica a falha está ocorrendo;
- b) Código de falha: Apresenta qual a falha e onde ela está ocorrendo;
- c) Nome do alarme: Descreve de forma simples a falha que está ocorrendo;
- d) Nome do dispositivo: Mostra em qual dispositivo a falha está ocorrendo, para quando existe mais de um inversor no mesmo sistema fotovoltaico;
- e) Tipo de dispositivo: Apresenta qual o modelo de inversor que o erro está ocorrendo;
- f) Tempo de ocorrência (TO): Momento exato em que a falha começou a ocorrer;
- g) Tempo de recuperação (TR): Momento exato em que a falha parou de ocorrer no sistema;
- h) Tempo de reestabelecimento: Demonstra o tempo que o equipamento demorou para ter o seu funcionamento reestabelecido, é calculado através da subtração de TR e TO;
- i) Tensão da rede: Mostra a tensão CA de cada fase em um determinado instante.

3.2 Análise de dados

3.2.1 Estratificação dos dados

Através das planilhas obtidas, os dados analisados foram estratificados, ou divididos, de três formas diferentes para a primeira amostra: por código de falha, por tempo de reestabelecimento e por tipo de dispositivo. Já para a segunda e para a terceira amostra, os dados foram estratificados pela média de tensão da rede.

3.2.2 Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos a análises estatísticas conforme as ferramentas a seguir:

- Estatística descritiva
- Tabela de distribuição de frequência
- Medidas de posição
- Gráfico de Pareto

- Gráfico de Controle

3.2.2.1 Tabela de distribuição de frequência

A primeira análise realizada consistiu em elaborar tabelas de distribuição de frequência para duas variáveis encontradas dentro da primeira amostra, são elas, “Código de falha” e “Tempo para o sistema ser reestabelecido”, onde, na primeira variável, uma tabela foi elaborada contendo todos os dados de falhas e seis tabela para os dados estratificados por modelo de inversor, e na segunda variável, mais uma tabela foi construída.

Para a primeira tabela, foram separados todos os dados referentes a variável “Código de falha”, depois disso, por meio do cálculo da frequência, foi identificado quantas vezes cada falha ocorreu durante o período do estudo. Após se chegar ao resultado, foram calculados os outros componentes da tabela, a frequência acumulada (FA), e a frequência relativa acumulada (FRA), onde foi preciso colocar a frequência na ordem decrescente, depois, foi preciso ir somando cada célula com o valor da sua anterior, a fim de no final, se obter o valor total acumulado da quantidade de falhas ocorridas, para enfim, calcular a FRA, na qual dividimos o valor da FA para cada falha, pela FA total, que é igual a 40.120.

Já para as tabelas que são divididas por modelo, foi utilizada a filtragem das variáveis no Excel para extrair os dados dos seguintes modelos: SG3K-S, SG8K3-D, SG15KTL-M, SG20RT, SG33CX, SG110CX, com esse resultado, a análise aplicada anteriormente foi repetida.

Para a segunda variável, foram separados os dados “Tempo de ocorrência (TO)” e “Tempo de recuperação (TR)” para calcular o “Tempo para o sistema ser reestabelecido (TSR)” meio da fórmula:

$$TRS = TR - TO,$$

foi calculado o “Tempo para o sistema ser reestabelecido”, ou quanto tempo cada falha demorou para ser solucionada, a frequência foi calculada utilizando intervalos de tempo de 15 em 15 minutos, como 15, 30 e 45 minutos, e com esses resultados, o método de análise anterior foi feito novamente.

3.2.2.2 Medidas de posição

Para essa análise foi construída uma tabela estratificada por modelo de inversor contendo dados como valor máximo, mínimo e a média por inversor da quantidade de falhas existentes e do “tempo para o sistema ser reestabelecido (TSR)”.

Após obter esses resultados a tabela foi construída, onde cada linha representa os dados de um modelo de inversor e cada coluna representa informações como qual modelo, quantidade de inversores por modelo, qual a análise, máximo, mínimo e a média por inversor.

3.2.2.3 Gráfico de Pareto

Para a primeira amostra, foram elaborados 8 gráficos, um para a variável “Código de falha”, englobando todos as falhas existentes, um para a variável “Tempo de Reestabelecimento”, e um para cada um dos 6 modelos de inversores escolhidos entre os existentes nos dados.

Para os 7 gráficos que tem como base os códigos de falhas, foi utilizada como base a tabela de distribuição de frequência para a variável, construída anteriormente, em que, inicialmente foi selecionada toda a coluna da Frequência a partir daí, foi criado o gráfico de colunas/barras, posteriormente foram inseridos nesse mesmo gráfico os outros dados contidos na tabela, a Frequência Relativa Acumulada (FRA), também no eixo vertical e os “Códigos Existente”, no eixo horizontal, com isso feito, foi alterado o tipo de gráfico, fazendo uma combinação entre o gráfico de barras e o de linhas, onde as barras representam a Frequência por “Código Existente”, e a linha representa a FRA por “Código Existente”.

Já para o gráfico que tem como base a variável “tempo para o sistema ser reestabelecido (TSR)”, inicialmente foi selecionada a coluna contendo os dados de Frequência e criado o gráfico de barras, depois disso foram adicionados os dados da “FRA” no eixo vertical e o “Intervalo de Tempo” no eixo horizontal, após isso o tipo de gráfico foi alterado para uma combinação entre gráfico de barras e linha, onde a Frequência de cada intervalo de tempo era apresentada pelas barras e “FRA” dos intervalos era representada pela linha.

3.2.2.4 Gráfico de Controle

Nas últimas amostras foram realizadas análises sobre a qualidade da tensão da rede de distribuição, percebida pelos inversores. Dessa forma, a partir da planilha com os dados, foram calculadas as médias entre as 3 fases da tensão para cada instante observado e posteriormente suas amplitudes.

Com esses resultados foram calculados os limites utilizados nos gráficos, o limite superior de controle (LSC), o limite médio (LM) e o limite inferior de controle (LIC), para a média da tensão e para a amplitude.

O cálculo para obter os limites para a tensão foi feito de forma que primeiramente foi verificado o tamanho da amostra, sendo “n = 3”, posteriormente foram calculadas as médias entre as tensões das três fases (X) para todos os instantes observados, sendo um valor para cada instante. Após isso, foi calculada a média total entre as médias obtidas anteriormente (\bar{X}). Com esses valores foi possível calcular o desvio padrão (S) da amostra, em seguida foi identificado que o LM é igual a \bar{X} e posteriormente foram calculados o LSC e o LIC, por meio das equações (1) e (2), respectivamente:

$$LSC = \bar{X} + 3 \times S / \sqrt{n},$$

$$LCI = \bar{X} - 3 \times S / \sqrt{n},$$

Em que:

\bar{X} = Média geral das tensões, calculada a partir da média das três fases de cada instante

S = Desvio padrão

n = Tamanho da amostra

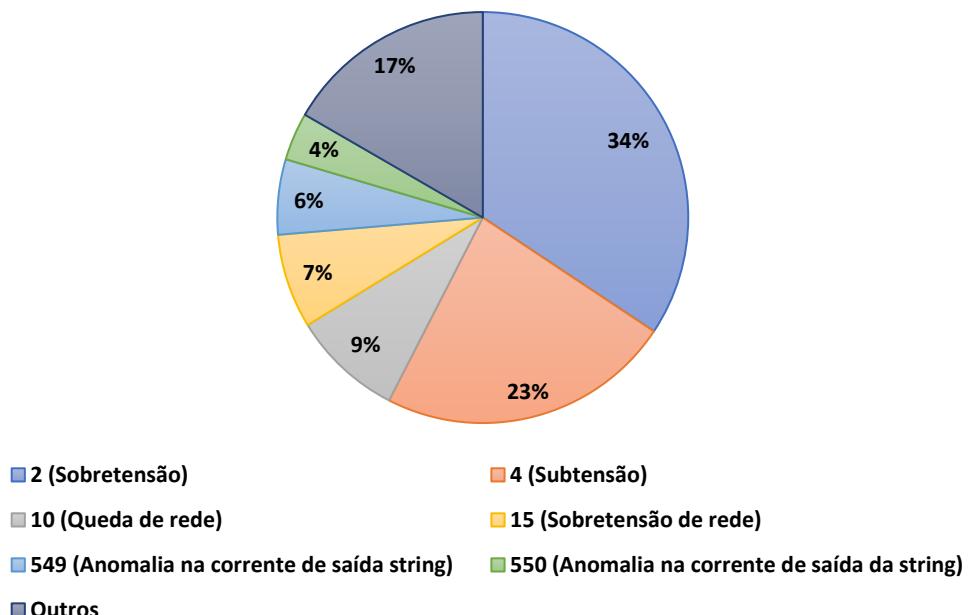
Em seguida foram construídos os gráficos de controle, onde de início foram selecionadas as colunas de “Média”, LSC, LM e LIC e criado o gráfico de linhas, onde os limites foram linhas constantes e o comportamento da tensão foi mostrado por meio de diversas curvas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estatística Descritiva

A Figura 13 mostra como foi a distribuição das falhas de acordo com os códigos existentes. Observou-se que durante o período analisado, ocorreu um total de 46 tipos de códigos, englobando todos os sistemas fotovoltaicos, sendo que as falhas provocadas por problemas após a saída do inversor, como queda de rede, sobretensão e subtensão, foram responsáveis por mais de 70% do total.

Figura 13 - Distribuição das falhas dos sistemas fotovoltaicos de acordo com o código, Maceió no ano de 2022.



Fonte: AUTORA, 2023.

Essas falhas podem ser causadas por diversos fatores, como problemas na rede de distribuição de energia elétrica, por folga nas conexões elétricas do inversor e dos quadros de energia, ou por sobrecarga dos circuitos elétricos da residência, comércio ou indústria.

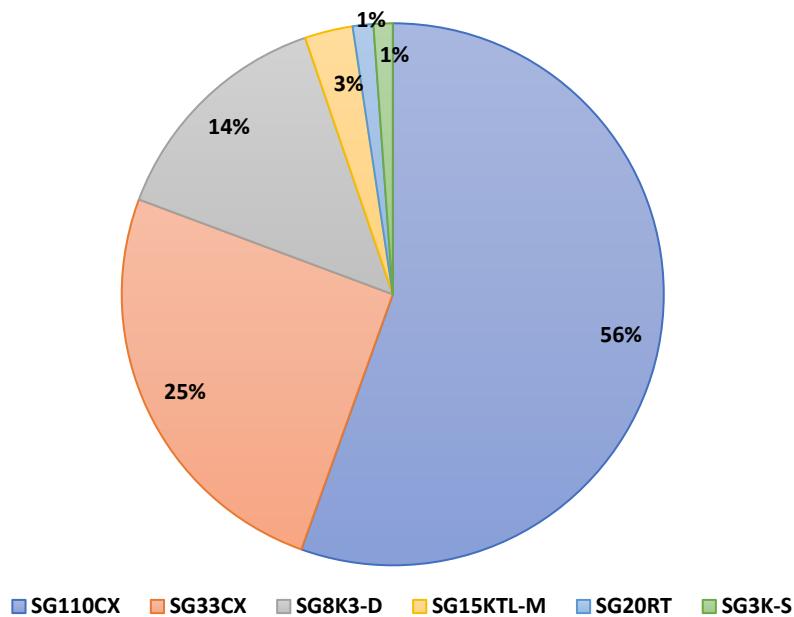
Já em um estudo feito em 2022, em um complexo de usinas com 24 inversores da fabricante ABB, foi identificado um resultado diferente, com ele foi averiguado que as falhas que mais ocorreram foram as referentes a oscilação fora dos intervalos definidos na corrente de saída do inversor; falha na caixa de conexão, mais

especificamente nos fusíveis; e falha de corrente de fuga cc, em que elas representaram juntas quase 80% das falhas analisadas (LIMA, 2022).

Na Figura 14, fica evidenciado como foi a distribuição das falhas de acordo com os modelos de inversores, em que foram selecionados 6 modelos dentre os existentes. Verificou-se que ocorreram no total 18.658 falhas, onde os modelos que menos apresentaram falhas foram os SG3KS e o SG20RS, já os que mais apresentaram falhas foram o SG110CX e o SG33CX.

Apesar de na Figura 14 ser observado que o modelo SG110CX foi o que teve uma maior ocorrência de falhas, não é possível afirmar que esse é o que mais apresentou defeitos, pois é necessário verificar quais as falhas que ocorreram. Se foram causadas por problemas de projeto, como o mau dimensionamento das proteções, acarretando constantes desligamentos do sistema; ou se foi devido problemas de instalação, como instalação dos módulos em configurações indevidas, ocasionando corrente reversa ou polaridade invertida nas strings; ou por defeitos internos aos inversores.

Figura 14 - Distribuição das falhas de acordo com o modelo do inversor



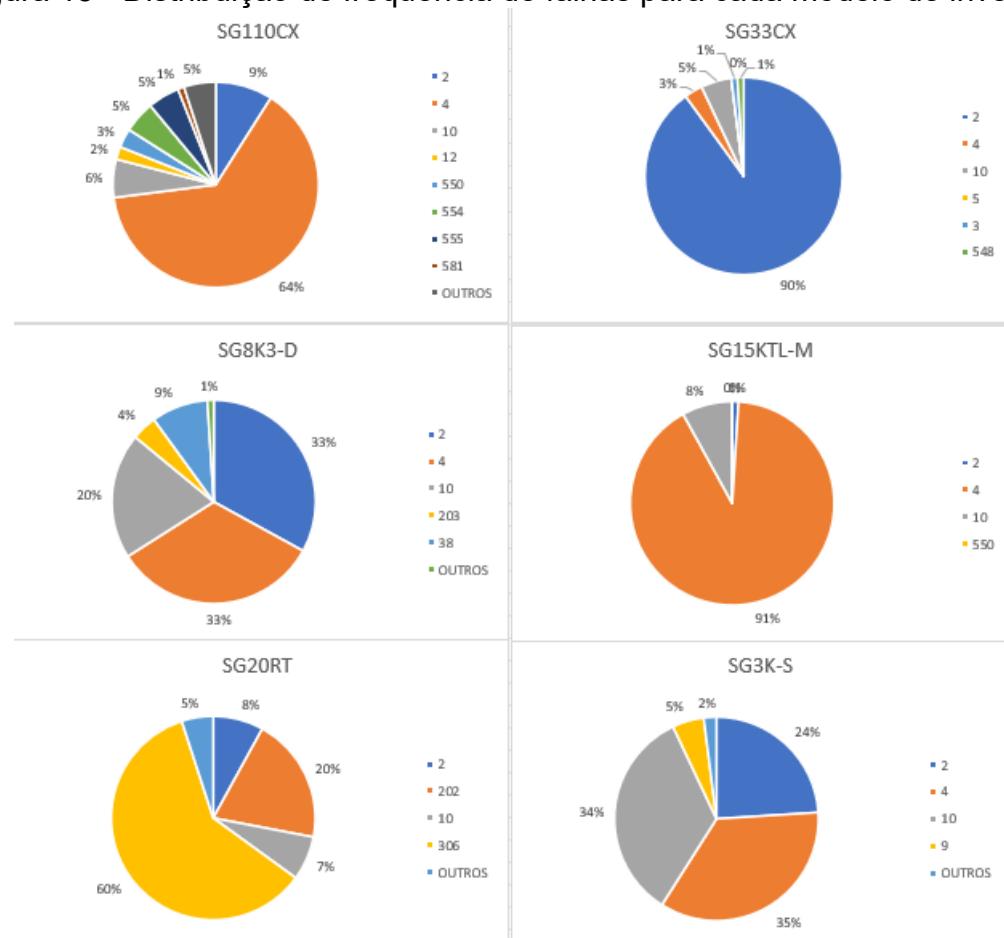
Fonte: AUTORA, 2023.

Também é necessário verificar a quantidade de inversores de cada modelo, pois quanto maior o número de inversores, maior é a tendência de ocorrência de falhas.

4.2 Distribuição de frequência de falhas considerando cada modelo de inverter

Ao analisar o mosaico de gráficos na Figura 15, constata-se que aproximadamente 67% dos modelos de inverter analisados apresentaram um único código que deteve mais de 60% de todas as falhas ocorridas e que 100% dos modelos apresentaram um código com mais de 30% das falhas.

Figura 15 - Distribuição de frequência de falhas para cada modelo de inverter.



Fonte: AUTORA, 2023.

Fica claro também que em 83% dos modelos, os códigos 04, 02 e 10 representaram as falhas que mais ocorreram. Apenas no modelo SG20RT que isso mudou, tendo os códigos 306 e 202 como os que mais ocorreram.

4.3 Medidas de posição e dispersão

No Tabela 2 é possível conferir algumas medidas de posição e dispersão para as variáveis falhas e tempo de restabelecimento. A tabela foi estratificada por modelo

de inversor. Verifica-se que em média ocorreram 244,06 falhas por inversor e com um tempo médio de estabelecimento de 12 minutos e 38 segundos.

Tabela 2 – Comparação entre a quantidade de inversores por modelo e a quantidade de falhas e o tempo que demoraram para se recuperar uma de falha.

| Inversor | | Falhas | | | | | Tempo de Reest. | | |
|-----------|------------|--------|-------|-----|-------|----------|-----------------|----------|--|
| Modelo | Quantidade | N | Máx | Mín | Méd | Máx | Mín | Méd | |
| SG110CX | 36 | 10.352 | 3.868 | 1 | 287,5 | 14:10:48 | 00:00:00 | 00:08:20 | |
| SG33CX | 10 | 4.705 | 4.173 | 2 | 470,5 | 23:59:00 | 00:00:00 | 00:07:09 | |
| SG20RT | 4 | 229 | 91 | 5 | 57,2 | 08:39:08 | 00:00:00 | 00:12:32 | |
| SG15KTL-M | 1 | 534 | 534 | 534 | 534 | 09:49:28 | 00:00:00 | 00:06:13 | |
| SG8K3-D | 31 | 2.625 | 731 | 7 | 84 | 17:30:00 | 00:00:00 | 00:17:05 | |
| SG3K-S | 7 | 213 | 91 | 14 | 6 | 09:18:06 | 00:00:00 | 00:24:29 | |

Fonte: AUTORA, 2023.

Constatou-se ainda que, o modelo SG110CX apresentou um inversor com apenas uma falha e um outro com 3.868 falhas, enquanto o modelo SG8K3-D apresentou um inversor com somente sete falhas e outro com 731 falhas. Essas diferenças nos valores podem ocorrer devido a alguns fatores, como tempo de instalado do sistema, se o local sofre com constantes problemas na rede de distribuição, defeitos de fabricação nos inversores e operação do sistema simultâneo com a instalação.

Verifica-se ainda, que o equipamento que mais apresentou falhas foi um dentre os 10 do modelo SG33CX, que teve a quantidade máxima de 4.173 falhas em apenas um inversor.

Já com relação ao tempo de reestabelecimento, observou-se que todos os modelos de inversor levaram no mínimo zero segundo para voltar a funcionar após a ocorrência de alguma falha. Isso é possível devido as falhas de caráter transitório, que ocorrem em milésimos de segundo e as falhas que não promovem a interrupção do funcionamento do sistema. Já o que demorou mais tempo para se restabelecer foi o modelo SG33CX com 23:59:00 (Tabela 2).

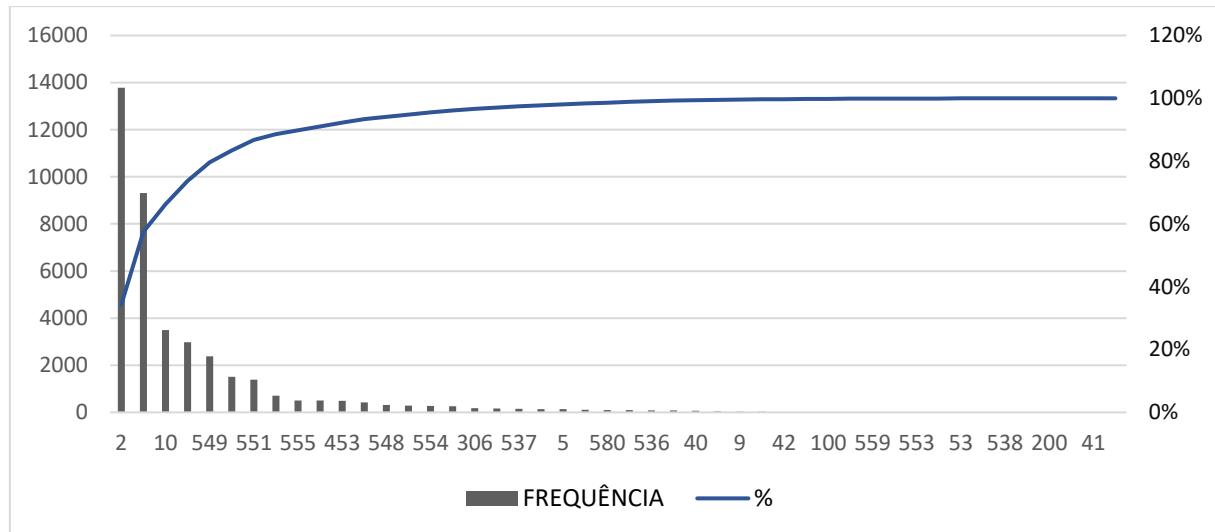
4.4 Controle de Qualidade

4.4.1 Diagrama de Pareto Geral

De acordo com o Figura 16, observar-se que cerca de 75% dos problemas foram causados pelas falhas de código 02 (sobretensão de rede), 04 (subtensão de

rede) e 10 (queda de rede/ilhamento), sendo que o código 02 é responsável por 34,34% das falhas.

Figura 16 - Diagrama de Pareto para a variável Código de falhas de todos os painéis solares.



Fonte: AUTORA, 2023

Esses problemas foram causados por diversos fatores, principalmente as falhas de código 02, 04, 10 e 15, que ocorrem após a saída do inversor e têm como causas defeitos no quadro de distribuição, cabo sem isolamento e bornes folgados, distorções nas instalações elétricas de dentro da residência ou estabelecimento, ou por problemas na rede de distribuição de energia. Já as falhas de código 549, 550, 551, 20 e 555 foram causadas por problemas na saída de corrente de alguma string (módulos que ficam ligados em série) ou pela tensão estar muito alta no barramento. Além disso, elas indicam também onde esse erro está acontecendo, como em qual MPPT e em qual string.

Como analisado no gráfico, a maior parte das falhas vem de problemas na rede de distribuição de energia e de problemas nas instalações elétricas do sistema e das residências, com isso, é necessário realizar periodicamente manutenções preventivas, a fim de evitar que esses problemas possam vir a acontecer e manter o sistema sempre monitorado, pois assim é possível acompanhar o seu funcionamento e entrar em contato com a concessionária de energia elétrica para realização dos reparos necessários em caso de oscilações vindas da rede.

O princípio do Gráfico de Pareto se baseia em distribuições desiguais. É a lei das poucas causas significativas contra as muito triviais. As poucas causas significativas geralmente representam 80% do todo, enquanto as muito triviais representam cerca de 20% (DELERS, 2023).

Nesse estudo, verifica-se que para melhorar o processo, é importante concentrar esforços nas poucas causas significativas dos problemas ocasionados nos inversores, principalmente as falhas de código 02, 04 e 10 que representam quase 75% dos defeitos (DELERS,2023).

4.4.2 Diagrama de Pareto por Modelo de Inversor

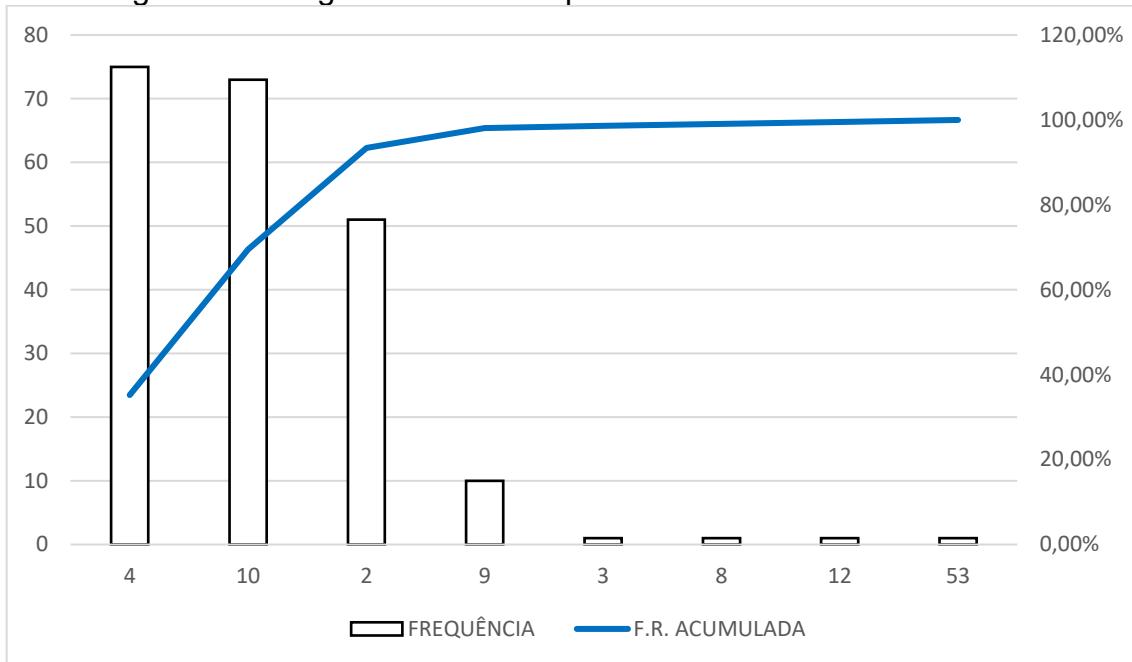
4.4.2.1 Modelo SG3K-S

O modelo SG3K-S apresenta um total de 7 inversores e de acordo com o gráfico 17, foi verificado que ocorreram 8 códigos de falhas, com um total de 213 falhas, sendo os códigos 4, 10 e 2 os que mais ocorreram, totalizando mais de 90% do total. Essas falhas são ocasionadas principalmente por subtensão de rede, queda de rede e sobretensão de rede respectivamente.

Já os códigos de falhas que menos ocorreram foram 9, 3, 8, 12 e 53, que somadas correspondem menos de 10% do total e representam as falhas de subfrequência da rede, sobretensão transitória da rede, sobreexperiência da rede, vazamento excessivo de corrente e anomalia no dispositivo.

Com isso, foi possível verificar que mais de 90% dos problemas que ocorreram no modelo foram causados por aproximadamente 37,5% dos tipos de códigos apresentados.

Figura 17 - Diagrama de Pareto para a falhas do modelo SG3K-S.



Fonte: Autora, 2023.

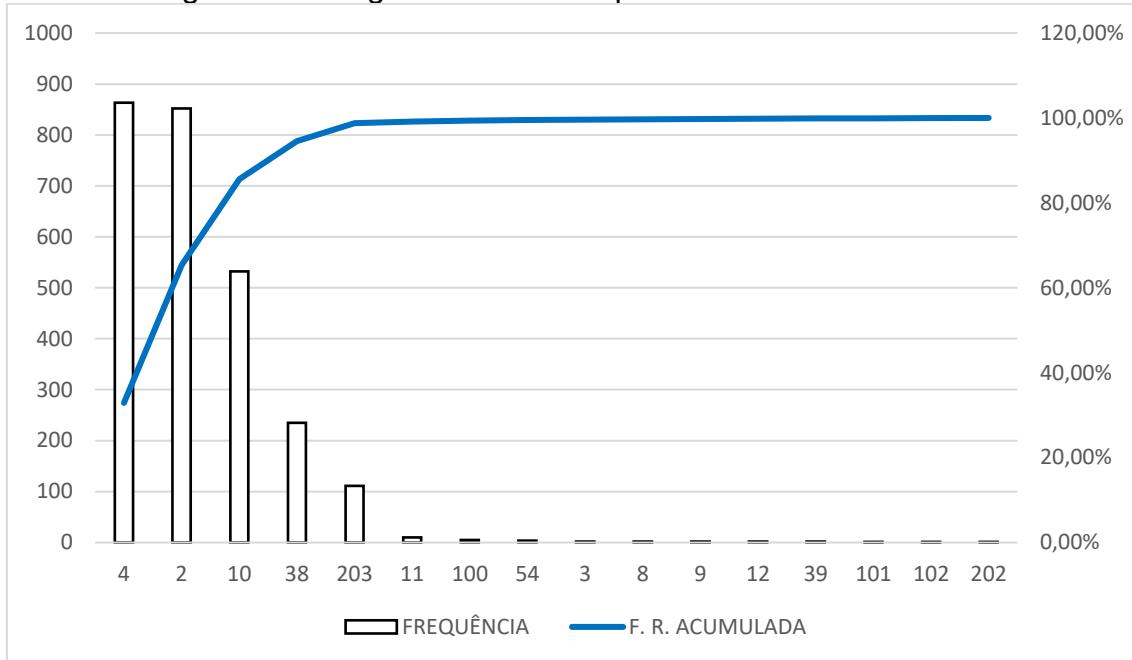
4.4.2.2 Modelo SG8K3-D

Foi verificado que existem 29 inversores do modelo SG8K3-D dentre os sistemas analisados, e que eles concentram 16 códigos de falhas, tendo um total de 2.625 falhas.

Por meio da Figura 18, foi determinado que as falhas que mais ocorreram foram as de código 4, 2 e 10, representando aproximadamente 85% do total, já as que menos ocorreram foram as de código 38, 203, 11, 100, 54, 3, 8, 9, 12, 39, 101, 102, 202 representando cerca de 15% das falhas. Isso demonstra que 85% de todas as falhas que ocorreram foram causadas por 18,75% dos tipos de códigos ocorridos no período do estudo nesse modelo.

O modelo em questão teve uma grande quantidade de códigos de falhas quando comparado com outros modelos, ele apresentou problemas não somente relacionados a saída, mas também relacionados a defeitos em dispositivos internos ao inversor, defeitos nas placas e arranjos das strings e MPPT's, problemas com isolamento causados por umidade.

Figura 18 - Diagrama de Pareto para falha do modelo SG83K-S.



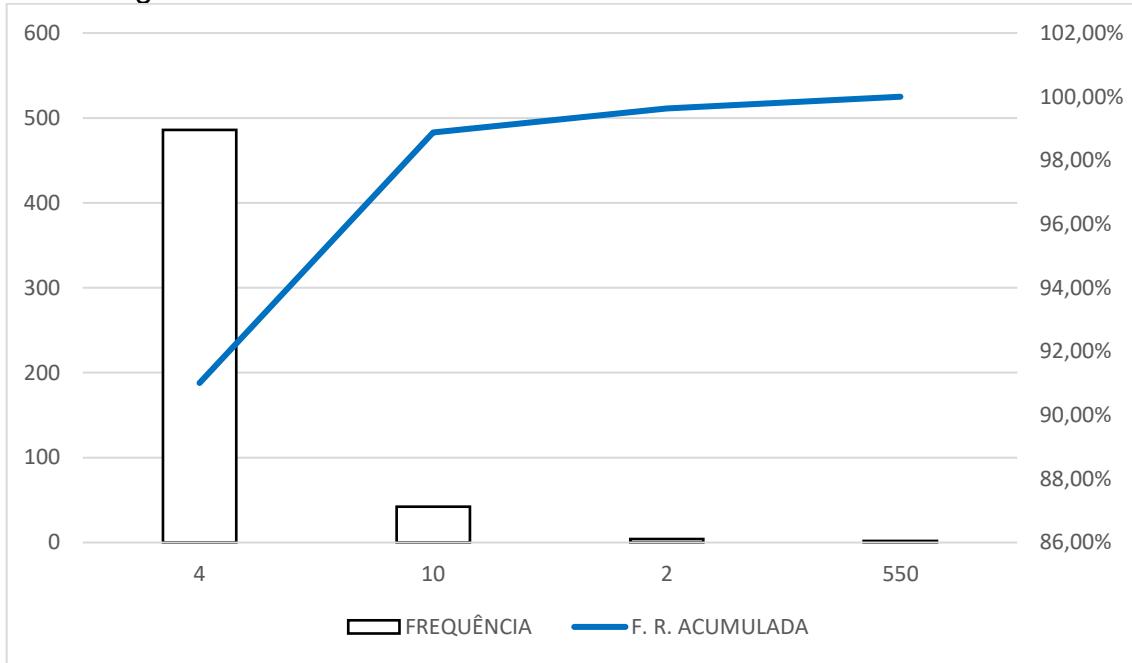
Fonte: AUTORA, 2023.

4.4.2.3 Modelo SG15KTL-M

Para o período analisado, observou-se que o modelo SG15KTL-M estava presente em apenas uma planta, com apenas um inversor. Isso aconteceu devido ao modelo ter sido descontinuado pelo fabricante em favor de um modelo com uma tecnologia nova, mais eficiente.

Nele ocorreu um total de 534 falhas, onde de acordo com a Figura 19, foram decorrentes de apenas 4 códigos de falhas. Foram elas subtenção de rede (Código 4), queda de rede (Código 10), sobretensão de rede (Código 2) e alarmes de anomalias de PV (Código 550). A falha de maior ocorrência foi a de código 4, sendo responsável por mais de 91% do total, já a que menos ocorreu foi a de alarmes de anomalias de PV, responsável por menos de 0,5%. Também foi possível verificar que o código 4 representa 25% dos códigos de falhas que ocorreram, dessa forma, 91% das falhas foram causadas por 25% dos tipos de problemas que ocorreram.

Figura 19 - Gráfico de Pareto das falhas do inversor SG15KTL-M.

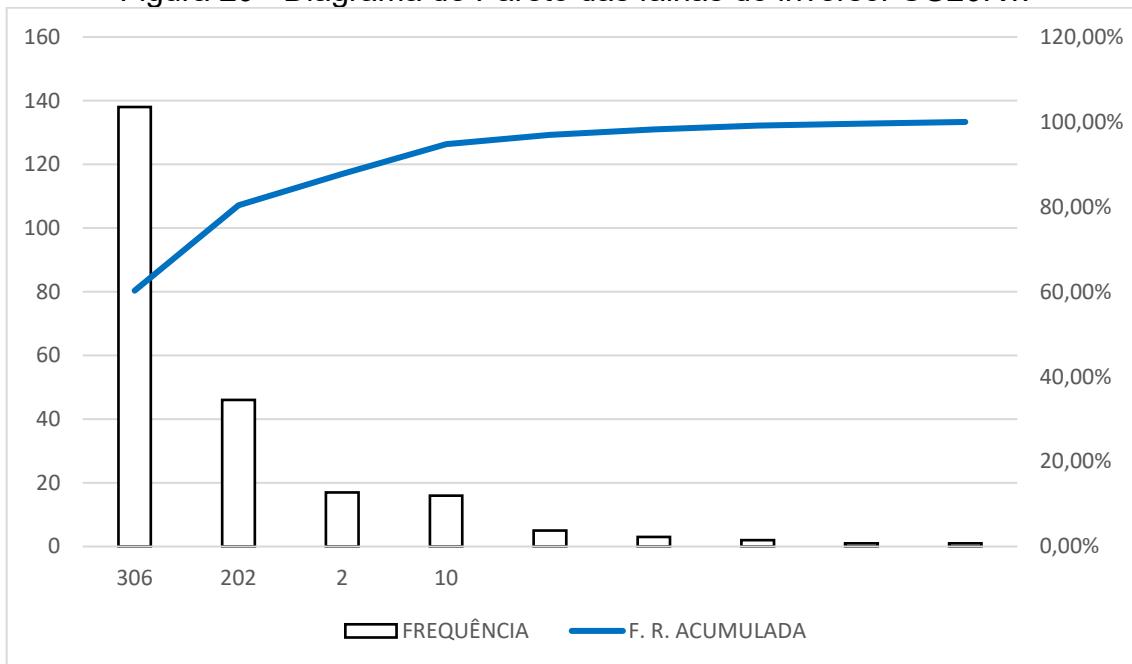


Fonte: AUTORA, 2023.

4.4.2.4 SG20RT

Quanto ao modelo SG20RT, foi verificado que ele estava presente em quatro plantas, cada uma dispondo de um inversor, totalizando 229 falhas sendo de 9 códigos diferentes. De acordo com a Figura 20, foi identificado que as falhas que mais ocorreram foram as de código 306, 202, 2 e 10, totalizando quase 95% de todas as ocorrências. Já as que menos ocorreram foram as de código 5, 4, 3, 41 e 200, representando aproximadamente 3% das falhas. Dentre as falhas que mais ocorreram, foi possível notar que a maior parte delas, códigos 306 e 202, se deram por anomalias na operação do sistema, no lado CC, responsáveis por mais de 80% das falhas ocorridas. Assim, é possível constatar que 22,22% dos códigos são as causas de 80% dos erros que acometeram os sistemas analisados.

Figura 20 - Diagrama de Pareto das falhas do inversor SG20RT.



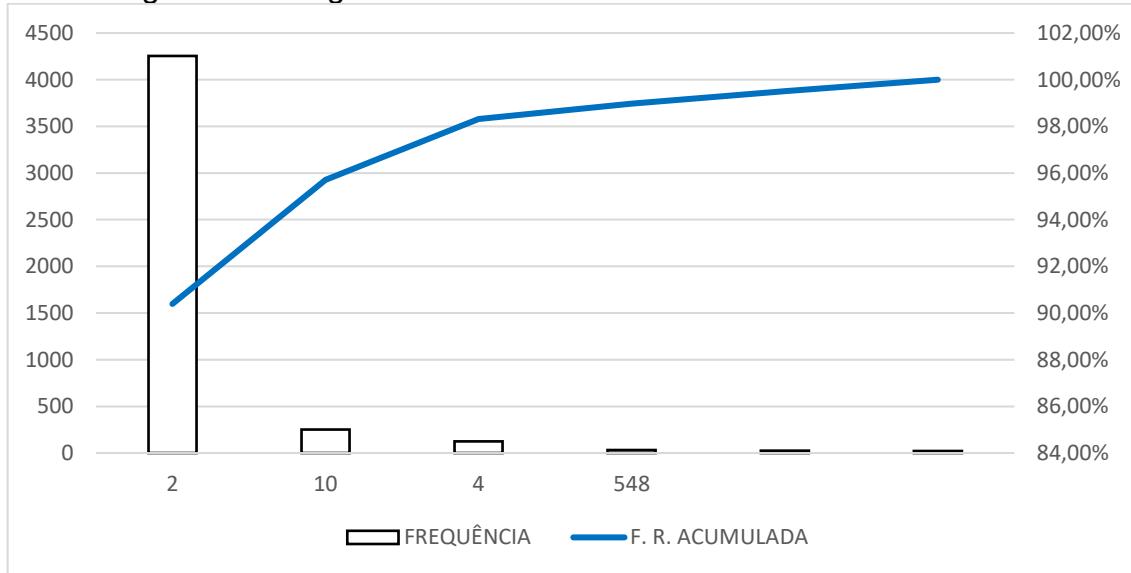
Fonte: AUTORA, 2023.

4.4.2.5 SG33CX

O inversor de modelo SG33CX estava presente em dez plantas e apresentou 4.705 falhas durante o período do estudo, distribuídas em 6 códigos diferentes, sendo que os erros que tiveram maior número de ocorrência foram os de sobretensão de rede (código 2), queda de rede (Código 10) e subtensão de rede (Código 4), representando aproximadamente 98,0% de todas as falhas, sendo o código 2 foi responsável por mais de 90% dos erros (Figura 21).

Verificou-se ainda, que aproximadamente 90 % dos problemas que ocorreram no modelo durante o período estudado foram causados por apenas 16,67% dos códigos de falhas ocorridos, portanto, são causas significativas que merecem maior atenção.

Figura 21 - Diagrama de Pareto das falhas do inversor SG33CX.



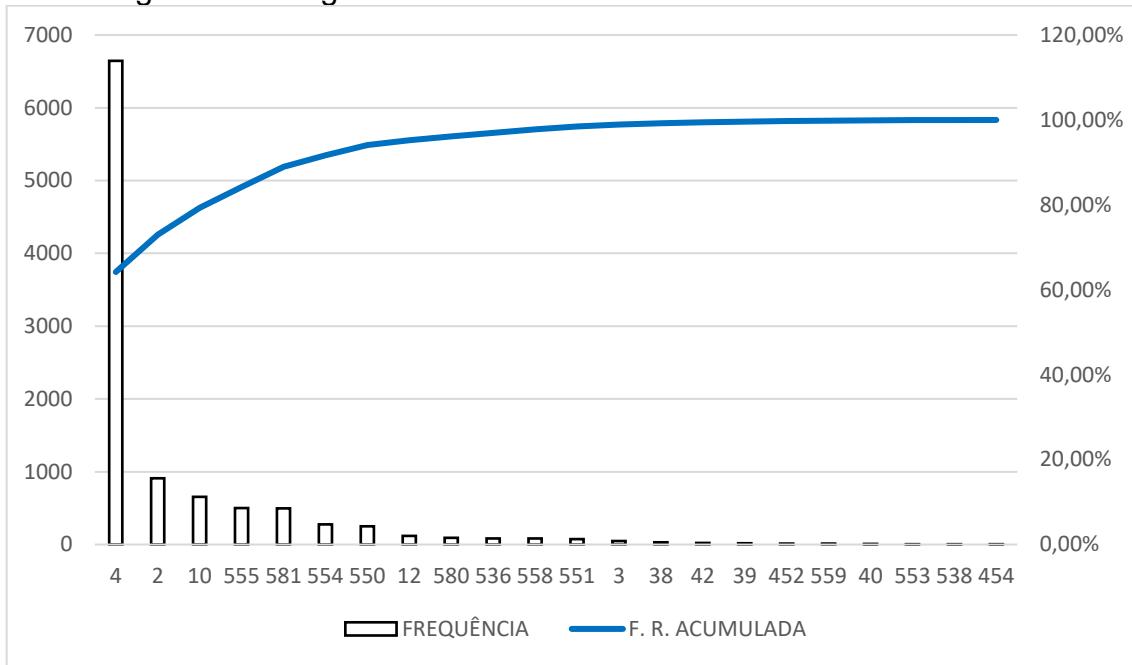
Fonte: AUTORA, 2023.

4.4.2.6 SG110CX

O modelo SG110CX apresentou 10.352 falhas em 36 inversores, sendo essa quantidade referente a 22 códigos de falhas, como é possível verificar na Figura 22, onde a falha de sobretensão de rede (código 04) foi a causadora de quase 65% do total. Por outro lado, essas falhas foram causadas por apenas 4,54% dos códigos, que devem ser priorizados para melhorar o processo.

Apesar disso, não é possível afirmar que o modelo SG110CX foi o inversor que mais sofreu com erros, pois a maioria dos sistemas que utilizam ele, ainda estavam em instalação enquanto já estavam funcionando, o que fazia com que, com uma certa frequência, placas fossem desligadas ou movidas de local, strings desligadas e mudadas, quadros de energia desligados e inversores desligados, promovendo uma grande ocorrência de falhas no monitoramento.

Figura 12 - Diagrama de Pareto das falhas do inversor SG110CX.



Fonte: Autora, 2023.

4.4.3 Gráfico de Controle para a tensão da rede de distribuição.

O gráfico de controle é utilizado para verificar a variabilidade de um processo, ou seja, se ele está sob controle ou não, com isso, para os dados com menos de nove variáveis, são utilizados dois gráficos, \bar{X} e \bar{R} (OLIVEIRA, 2013).

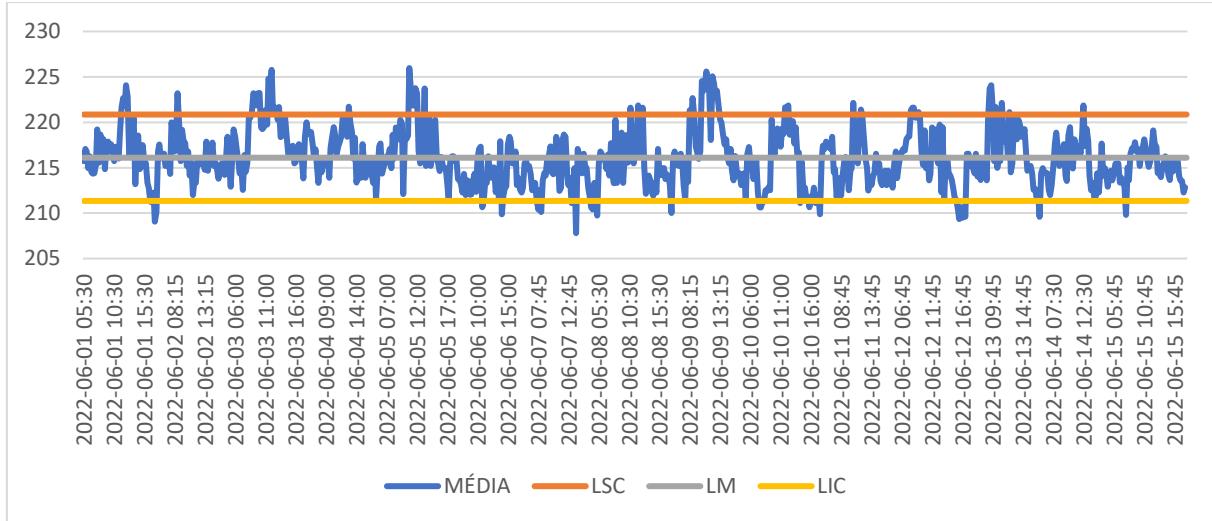
Para um processo estar fora de controle ele precisa apresentar um ou mais pontos fora dos limites de controle, sendo isso constatado em pelo menos um dos gráficos, \bar{X} ou \bar{R} (ROCHA, 2019).

4.4.3.1 Amostra para 15 dias

Na análise que utilizou os limites de controle calculados de acordo com a metodologia descrita, foi possível identificar por meio do gráfico \bar{X} que o processo não estava sob controle estatístico, já que existem diversos pontos fora dos limites de controle, além de não haver previsibilidade no seu comportamento.

Esse comportamento da curva na Figura 23 significa que a tensão da rede não está sob controle tendo oscilações expressivas, o que pode acabar trazendo impactos negativos para os consumidores.

Figura 13 - Gráfico \bar{X} da tensão da rede para amostra de 15 dias.

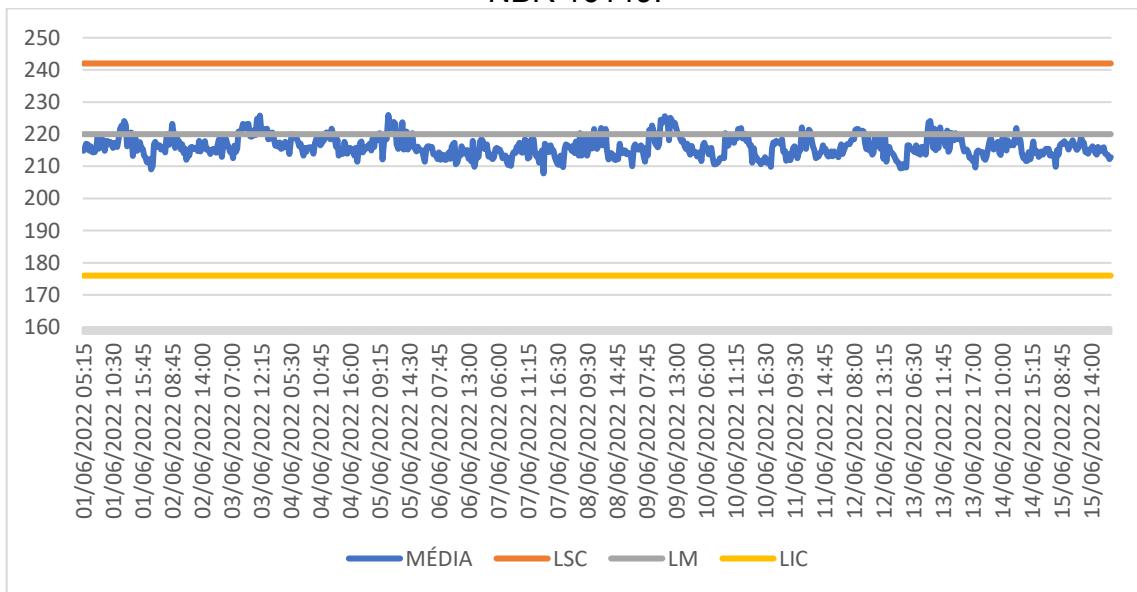


Fonte: AUTORA, 2023.

Já de acordo com a Figura 24, para a análise feita tendo como limites de controle os valores LSC igual a 242 V, LM igual a 220 V e LIC igual a 176 V, que são estabelecidos pela NBR 16149:2013, o processo está sob controle, já que todos os pontos analisados se mantiveram dentro dos limites de controle.

Isso quer dizer que durante o período estudado, o sistema em questão não apresentou falhas relacionadas a subtensão e sobretensão da rede de distribuição que vão além dos limites impostos pela NBR 16149.

Figura 14 – Gráfico \bar{X} da tensão da rede para amostra de 15 dias com limites da NBR 16149.



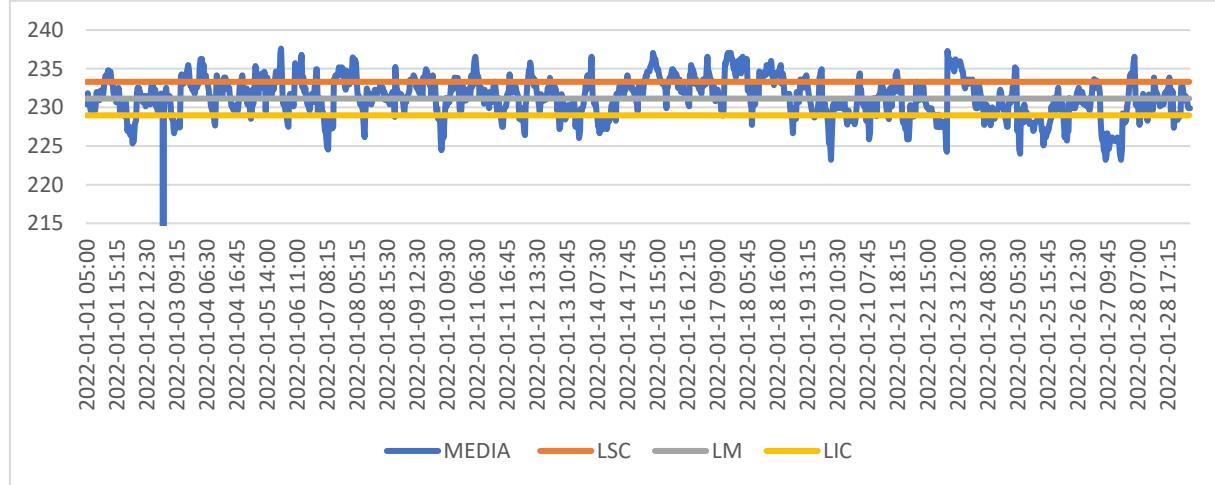
Fonte: AUTORA, 2023.

4.4.2.2 Amostra para 30 dias

Na análise para os 30 dias, utilizando os limites de controle de acordo com a metodologia, o resultado obtido mostrou que a tensão desvia dos limites de controle. De acordo com o Figura 25, foi possível verificar que o processo não estava sob controle, já que em diversos momentos os pontos ficaram fora dos limites, onde um deles chegou até a zero e não tinha uma previsibilidade.

Quando comparado com a Figura 26, os limites de controle foram inferiores, isso ocorreu devido ao perfil da variação da tensão, que não se manteve igual, o que consequentemente fez com que as médias e o desvio padrão fossem diferentes.

Figura 15 - Gráfico \bar{X} da tensão da rede para amostra de 30 dias.

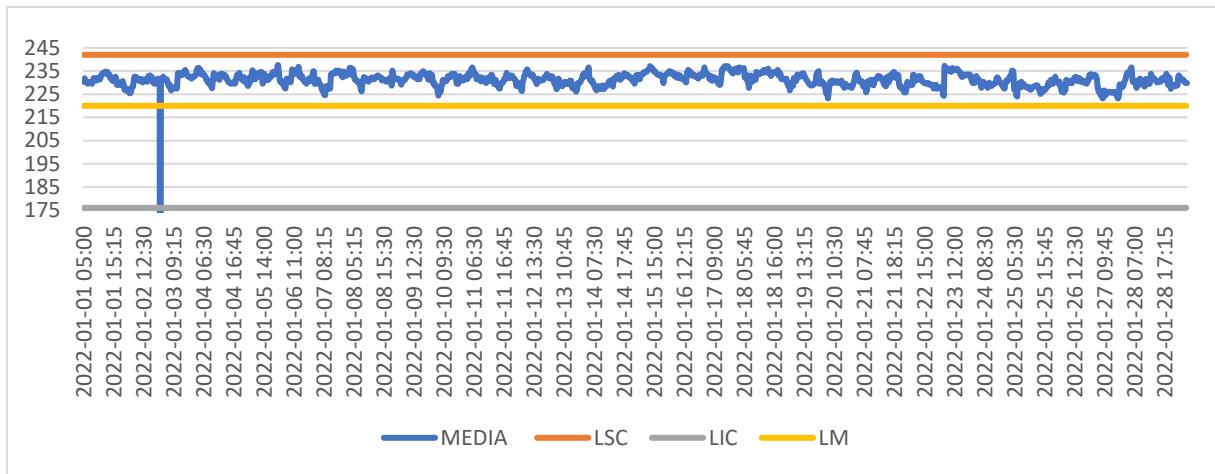


Fonte: AUTORA, 2023.

Já na análise para os 30 dias utilizando como limites os valores LSC igual a 242 V, LM igual a 220 V e LIC igual a 176 V, que são estabelecidos pela NBR16149:2013, o resultado não foi diferente, o processo também não estava sob controle, já que, além de haver variações fora dos limites de controle, praticamente todos os momentos em que a tensão foi medida, ela não estava equilibrada entre os limites superior e inferior, e nem com uma previsibilidade, ela se manteve entre o limite superior e o limite médio e imprevisível, o que não é interessante.

Isso significa que o sistema apresentou algumas falhas de subtensão e sobretensão de rede, além de uma falha de queda de rede/ilhamento, momento em que a tensão foi a 0 V.

Figura 16 - Gráfico \bar{X} a tensão da rede para amostra de 30 dias utilizando como limites de controle os valores de acordo com a NBR16149.



Fonte: AUTORA, 2023.

5. CONCLUSÃO

Tendo em vista os resultados obtidos nas análises realizadas, foi possível concluir que a maior parte das falhas que acometem sistemas solares fotovoltaicos foram provenientes de problemas após a saída do inversor. Porém, muitas das falhas que ocorreram foram relacionadas à questões que estão fora do controle dos instaladores e dos proprietários dos sistemas.

Quanto ao tempo de reestabelecimento, algumas falhas não interrompem o funcionamento e outras são tão rápidas, que o tempo de ocorrência é menor do que o tempo que precisa para o inversor se desligar, o que não impacta na geração de imediato, já as falhas que mais demoraram ocorrendo e fizeram os inversores ficarem um longo período parados, acabaram prejudicando o desempenho da geração.

Junto a isso, é possível dizer que o inversor é um importante aliado na realização de análises no funcionamento dos sistemas solares, pois eles além de sua função de conversão, também exercem a função de analisador de algumas grandezas.

Dessa forma, ficou claro que, para diminuir a quantidade das falhas ocorrem nos sistemas solares algumas medidas devem ser implementadas pelas concessionárias, pelas empresas integradoras/ instaladoras e pelos fabricante, tais como: fazer o dimensionamento da rede de distribuição de acordo com a quantidade de unidades consumidoras e de unidades geradoras do local em questão e seguir todas as normas técnicas; dimensionar e projetar os sistemas de acordo com as condições do local de instalação, com as normas e com as limitações dos equipamentos; e fazer testes de laboratórios nos equipamentos, a fim de encontrar defeitos que só seriam encontrados quando o mesmo estivesse funcionam.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil – Infográfico ABSOLAR. 2023. Disponível em:<ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica>. Acessado em: 23 de fevereiro de 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa N°482, de 17 de abril de 2012, Brasília, Distrito Federal, 2012.

ARAÚJO, Ana Júlia Nunes de; RANK, Narah Iuata; BUENO, Talita Bezerra de Araujo. Análise dos fatores de perdas nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em Curitiba. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2016

BARBOSA, Geraldo Veríssimo de Souza, Controle estatístico do processo. 2006.

BEZERRA, Francisco Diniz. Micro e Minigeração Distribuída e suas Perspectivas com a Lei 14.300/2022. 2022.

CARVALHO, Vitória et al. Sistemas fotovoltaicos: análise de perdas por Mismatch. Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica, v. 3, n. 2, p. 70-80, 2021.

CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA; CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, RJ: Especial 2014.

COSTA, Tiago. O mundo da qualidade. Clube de Autores, 2018.

DA SILVA, Jefferson Pereira. Apostila de Eletrônica de Potência. INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RN–(IFRN). Disponível em: http://professorcesarcosta. com. br/upload/imagens_upload/Apostila-Eletronica-Potencia-IFRN-Zona-Norte. pdf. Acesso em, v. 27, 2019.

DANIEL, Erica A.; MURBACK, Fábio Guilherme Ronzelli. Levantamento bibliográfico do uso das ferramentas da qualidade. *Gestão & conhecimento*, v. 8, n. 2014, p. 1-43, 2014.

DANTAS, Luiza Melcop de Castro Leal. Impactos regulatórios da revisão do sistema de compensação de créditos de energia elétrica provenientes de micro e minigeração distribuída na Resolução Normativa nº 482\2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica–ANEEL: Considerações sobre o Relatório de Análise de Impacto Regulatório nº 0004\2018–ANEEL. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso.

DELERS, Antoine. O princípio de Pareto para a gestão empresarial: Expandir o seu negócio com a regra 80/20. 50Minutos. es, 2023.

ENERGÊS, DO INÍCIO AO FIM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO OFF-GRID. Disponível em: <https://energes.com.br/do-inicio-ao-fim-sistema-solar-fotovoltaico-off-grid/>. Acesso em: 28 de janeiro de 2023.

FERREIRA, Williams Pinto Marques. Radiação solar em Sete Lagoas, MG. Embrapa Milho e Sorgo, 2006.

GALEMBECK, Fernando; PARDINI, Vera L. Alimentos, energia e matérias-primas: inovação no aproveitamento de recursos naturais. *Química Nova*, v. 32, p. 565-566, 2009.

GOUVEIA, Marco Aurélio da Cruz. Controle estatístico da qualidade. Londrina: Educacional, 2018.

GUEDES, Terezinha Aparecida et al. Estatística descritiva. Projeto de ensino aprender fazendo estatística, p. 1-49, 2005.

LOPES, Luís Felipe Dias. Apostila Estatística, 2003.

LIMA, Pedro de Borborema Mota. Análise de falhas em inversores de um complexo fotovoltaico. 2022.

MATHEUS, L. M. et al. Comunicação por luz visível: conceito, aplicações e desafios. 2017.

MAUAD, Frederico Fábio; FERREIRA, L. C.; TRINDADE, Tatiana Costa Guimarães. Energia renovável no Brasil. Análise das principais fontes energéticas renováveis brasileiras, p. 740-1, 2017.

MAY, Peter; LUSTOSA, Maria Cecília; VINHA, Valéria. Economia do meio ambiente. Elsevier Brasil, 2010.

MOTA, Paulo Vítor de Sousa. Desenvolvimento de um inversor para aplicações fotovoltaicas com MPPT integrado. 2013. Tese de Doutorado.

MOURA, Danilo da Silva. Uma abordagem sobre diretrizes básicas para a realização de uma manutenção preditiva em sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede. 2021.

NETO, CARLOS AUGUSTO PÖTTER. DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DE UM INVERSOR SOLAR FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. 2016.

NETO, Pedro Luiz de Oliveira Costa. Estatística. Editora Blucher, 2002.

NETO, Thyrso Villela. PESQUISAS EM ASTROFÍSICA NO INPE. INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA E ASTROFÍSICA

OLIVEIRA, Larissa dos Santos. Avaliação do desempenho de sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede em cidades do RN. 2020.

PEREIRA, Jorge Daniel Martins. Instalações Solares Fotovoltaicas para Autoconsumo: Análise e Perspetivas de Aplicação. 2016.

Pinho, J. T.; Galdino, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p. 47-499, 2014.

PIOMBINI, Eduardo Silva; MELO, Wellington Wallace Miguel; DO PRADO CAMPOS, Guilherme Amaral. Aplicativo Android para monitoramento remoto de módulos fotovoltaicos. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018. 2018.

RAMANERY, Fábio Pereira. Síntese e Caracterização de Nanopartículas Semicondutoras com Estrutura tipo Núcleo/Casca CdSe/CdS obtidas por Rota Coloidal Aquosa. 2012.

REIS, Elizabeth et al. Estatística aplicada. Lisboa: Edições Sílabo, 1999.

REIS, Mari Aurora Favero; PROCHNOW, Tania Renata; NETO, Agostinho Serrano Andrade. CIÊNCIAS E MATEMÁTICA EM PESQUISAS COM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE SILÍCIO EM ENGENHARIA. Revista de Ensino de Engenharia, v. 39, 2020.

SAMOHYL, Robert Wayne. Controle estatístico de qualidade. Elsevier, 2009.

SANTOS, Adriana Barbosa; ANTONELLI, Stella Carrara. Aplicação da abordagem estatística no contexto da gestão da qualidade: um survey b com indústrias de alimentos de São Paulo. Gestão & Produção, v. 18, p. 509-524, 2011.

SANTOS, Carla. Estatística descritiva. Manual de auto-aprendizagem, v. 2, 2007.

SASSI, Gilberto Pereira. Introdução à Estatística Descritiva para pesquisas em Informática na Educação. Jaques, PA; Siqueira; S.; Bittencourt, I.; Pimentel, M.(Org.) Metodologia de Pesquisa Científica em Informática na Educação: Abordagem Quantitativa. Porto Alegre: SBC, 2020.

SILVA, Rouverson P. da et al. Controle estatístico aplicado ao processo de colheita mecanizada de cana-de-açúcar. Engenharia Agrícola, v. 28, p. 292-304, 2008.

SOARES, Dora Patrícia Abreu. Impactos derivados da exploração dos recursos naturais: perspectiva dos alunos no contexto da educação para o desenvolvimento sustentável e direitos humanos. 2017.

STAMBUK, Richard Heinrich. Influência da temperatura de operação no desempenho de sistemas fotovoltaicos. 2017.

STENSMANN, Berenice. Energia emitida pelo sol. Instituto de física, 2022. Página inicial. Disponível em:

<https://ppgenfis.if.ufrgs.br/mef008/mef008_02/Berenice/aula4.html>. Acessado em: 17 de dezembro de 2022.

SUNGROW, Manual do usuário SG110CX, Inversor FV conectado à rede, 2019. Disponível em: <<https://sicesolar.com.br/wp-content/uploads/2019/10/manual-do-usuario-sg110cx.pdf>>. Acessado em: 23 de janeiro de 2023.

SUNGROW, Manual do Usuário SG2K-S / SG3K-S / SG3K-D / SG4K-D / SG5K-D/ SG6K-D / SG8K3-D Inversor Grid-Tie para Sistema Fotovoltaico, 2018. Disponível em: <<https://sicesolar.com.br/wp-content/uploads/2018/06/manual-do-usuario-inversor-sungrow-grid-tie.pdf>>. Acessado em: 11 de janeiro de 2023.

SUNGROW, Manual do usuário SG33CX, SG40CX, SG50CX, Inversor FV conectado à rede, 2019. Disponível em:<https://sicesolar.com.br/wp-content/uploads/2019/10/manual-do-usuario-sg33_40_50cx.pdf>. Acessado em: 07 de fevereiro de 2023.

SUNGROW, SG75CX, Inversor FV conectado à rede, Manual do usuário, 2021. Disponível em: <https://krannich-solar.com/fileadmin/user_upload/BR/SUNGROW_SG75CX_PTBR.pdf>. Acessado em: 27 de novembro de 2022.

SUNGROW. Disponível em: <<https://br.sungrowpower.com/AboutSungrow>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2022.

URBANETZ JUNIOR, Jair et al. Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade. 2012.

VARGAS, Michael Collin et al. Energia solar disponível e energia gerada em sistemas fotovoltaicos em diferentes inclinações e orientações de telhados de edificações. 2021.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. São Paulo: Érica, v. 2, 2012.

ZILLES, Roberto et al. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Oficina de textos, 2016.