CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIÇÃO E ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NA USINA FOTOVOLTAICA DO CEFET-MG CAMPUS NEPOMUCENO

Ana Paula Sales Esteves

MEDIÇÃO E ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO DO CEFET-MG CAMPUS NEPOMUCENO

Trabalho apresentado como requisito parcial para a Conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

COMISSÃO EXAMINADORA

_____

Prof. Me. Márcio Wladimir Santana

_____

Profª. Dra. Juliana Vilela Lourençoni Botega

_____

Prof. Me. Ítalo Arthur João Wilson Silva Meireles

Nepomuceno, 13 de dezembro de 2022

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais, Tarley e Maria, por todo apoio durante minha trajetória.

Ao meu sobrinho Gael que trouxe muita luz e alegria.

À Vó Maria que estaria orgulhosa de mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar perseverança durante toda a minha vida.

Aos meus pais que são minha base, exemplo e sempre me apoiaram em minhas escolhas.

Ao meu namorado Argenis, meu grande parceiro, pelo incentivo em realizar meus sonhos e por estar sempre presente.

Agradeço ao meu orientador Prof. Márcio Wladimir por aceitar me conduzir no meu trabalho, pelas contribuições dadas durante todo processo, por todo incentivo de sempre ir além e por me fazer encantar pela temática de qualidade de energia.

À professora Juliana pela dedicação e comprometimento.

Aos meus familiares, amigos que me apoiaram e acreditaram em mim.

Ao CEFET-MG, minha casa de longa data, por todo desenvolvimento proporcionado e a todos os funcionários que me acolheram, apoiaram e fizeram parte da minha rotina.

Aos mestres por todo conhecimento partilhado e por toda dedicação.

EPÍGRAFE

“É necessário o coração em chamas para manter os sonhos aquecidos. Acenda fogueiras”.

-Sérgio Vaz

RESUMO

Mudança de hábitos, eletrificação de diversos setores, trazem uma imensa responsabilidade no quesito geração de energia para suprir o aumento do consumo de energia elétrica e uma das apostas é na geração distribuída, especialmente a fotovoltaica que tem ganhado o mercado nos últimos anos. A energia fotovoltaica traz benefícios econômicos e técnicos. Para as concessionárias, surge um desafio que é monitorar a qualidade de energia entregue por esses sistemas conectados à rede. Este trabalho traz uma abordagem relativa aos fenômenos relacionados de qualidade de energia elétrica (QEE) e seus respectivos indicadores, além de uma análise da QEE entregue pelo sistema fotovoltaico do CEFET-MG Campus Nepomuceno. Utilizando o analisador de qualidade de energia MAR722 da fabricante Megabras, por meio das medições realizadas, verificou-se se os dados obtidos estão em conformidade com o módulo 8 do PRODIST.

Palavras-chave: Qualidade de Energia Elétrica; Analisador da Qualidade de Energia; Energia Solar fotovoltaica.

ABSTRACT

Changing habits, electrification of various sectors, bring an immense responsibility in terms of energy generation to meet the increase in consumption of electric energy and one of the bets is on distributed generation, especially photovoltaic system that has won the market in recent years. The energy photovoltaics brings economic and technical benefits. For electric power utilities, a challenge that is to monitor the quality of energy delivered by these systems connected to the electricity distribution network. This work brings a brief approach to the phenomena related to QEE and their respective indicators, as well as an analysis of the quality of electrical energy delivered by the photovoltaic system of CEFET-MG Campus Nepomuceno. Using the power quality analyzer MAR722 from the manufacturer Megabras, through the measurements carried out, it was verified if the data obtained are in accordance with module 8 of PRODIST.

Key words: Power quality; Power Quality Analyzer; Photovoltaic Solar Energy

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Faixa de Operação para a tensão de suprimento. 6
Figura 2-Triângulo Retângulo de Potência (ADAPTADO). 6
Figura 3-Forma de onda típica do efeito de harmônicas 7
Figura 4-Sistema Trifásico Equilibrado.....8
Figura 5-a) Desequilíbrio de Tensão b) Assimetria de Tensão 8
Figura 6-Limites da Percepção Visual para Flutuações de Tensão Associadas a Ondas Senoidais e Quadradas 9
Figura 7-Flutuação de Tensão 10
Figura 8-frequência fundamental.....11
Figura 9-Voltage Sag 12
Figura 10-Voltage Swell 13
Figura 11-Interrupção de curta duração 14
Figura 12-Diagrama fotovoltaico de acordo com a carga utilizada. 15
Figura 13-Sistema On Grid.....16
Figura 14-Exemplo de Sistema Híbrido.....17
Figura 15-MAR722 25
Figura 16-Layout Geral da localização e do sistema fotovoltaico.....27
Figura 17- Localização dos módulos e dos inversores.....28
Figura 18-Estudo Operacional do MAR722.....29
Figura 19-Ponto de Medição 32
Figura 20- Quadro de medição do sistema fotovoltaico 32
Figura 21- Tensão em Regime Permanente 34
Figura 22-Fator de Potência na saída do inversor 35
Figura 23-Tendência Harmônica 36
Figura 24-Tendência do Desequilíbrio 37
Figura 25-Tendência Flicker.....38
Figura 26-Tendência de Variação da Frequência 39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Ponto de Conexão em Tensão nominal inferior a 2,3 KV (220/127) 19
Tabela 2- Indicadores de Harmônicos.....20
Tabela 3- Limites das distorções harmônicas em totais (em % da tensão fundamental) 22
Tabela 4- Limite para o indicador de desequilíbrio de tensão 22
Tabela 5- Limites para flutuação de tensão 23
Tabela 6- Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração – VTCD.....24
Tabela 7- Normalização seguida pelo MAR722 26
Tabela 8- Aspectos do Monitoramento de Qualidade de Energia do equipamento...31
Tabela 9- Eventos de Tensão 34
Tabela 10- Evento Flicker 38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EM – European Norm

CRESEB- Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sérgio Brito

ABSOLAR- Associação Brasileira de Energia Solar

ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica

QEE- Qualidade de Energia Elétrica

PRODIST- Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica

CEMIG- Companhia Energética de Minas Gerais

IEE- Institute of Electrical and Electronics Engineers

IEC- International Electrotechnical Commssion

DIT- Demais Instalações de Transmissão

ONS- Operador Nacional do Sistema Elétrico

SDMT-Sistema de Distribuição de Média Tensão

SDAT- Sistema de Distribuição de Alta Tensão

SFCR- Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

LISTA DE SÍMBOLOS

GW- Gigawatt

KVA- Quilovoltampère

KW- Quilowatt

KVAr- Quilovoltampère reativo

Hz- Hertz

Pu- valores por unidade

CA- Corrente alternada

CC- Corrente contínua

RMS-Valor eficaz

Wp- Wattpico

KWp- Quilowattpico

V-Volt

KV- Quilovolt

THD- Total Harmonic Distotion

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 2
2 REFERENCIAL TEÓRICO 4
2.1 Qualidade de Energia Elétrica 4
2.1.1 Variações de Tensões em Regime Permanente 5
2.1.2 Fator de Potência 6
2.1.3 Harmônicos 7
2.1.4 Desequilíbrio de Tensão 7
2.1.5 Flutuação de Tensão 9
2.1.6 Variação de Frequência 10
2.1.7 Variações de Tensão de Curta Duração-VTCD 11
2.2 Sistema Fotovoltaico 14
2.2.1 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos 15
2.3 PRODIST 17
2.3.1 Indicadores de Variações de Tensão em Regime Permanente 19
2.3.2 Índice de Fator de Potência 19
2.3.3 Indicadores de Harmônicos 20
2.3.4 Indicador de Desequilíbrio de Tensão 22
2.3.5 Indicador de Flutuação de Tensão 22
2.3.6 Faixa de Operação da Variação da Frequência 24
2.3.7 Indicadores de Variação de Tensão de Curta Duração-VTCD 24
2.4 Analisador de Qualidade de Energia MAR722 25
3 METODOLOGIA 27
3.1 Sistema Fotovoltaico 27
3.2 Estudo Operacional 28
3.3 Medição 31
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 34
5 CONCLUSÃO 40
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 41

1 INTRODUÇÃO

Mudança de hábitos e a eletrificação de diversos setores como o de transportes são algumas das motivações para se buscar novas fontes de energia a fim de suprir o aumento do consumo de energia elétrica, ainda mais quando a principal fonte energética é a hidráulica, correspondendo a 52,2% da matriz elétrica brasileira, conforme dados apresentados pela Associação Brasileira de Energia Solar (ABSOLAR) e ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) em 2022. Visto que, no início do século XXI e recentemente nos anos de 2013 e 2014 viveu-se uma crise hídrica como aponta Mota (2015), apesar das hidrelétricas serem uma fonte de energia renovável, se fez necessário a busca e incentivo por novas fontes de energia para se incorporarem a matriz elétrica do país.

No cenário atual, a energia fotovoltaica é a fonte de energia que mais cresce no mundo. Na América Latina, o mercado cresceu 44% em 2021, sendo o Brasil e o Chile os destaques da região. Tamanho desenvolvimento, trouxe olhos atentos do mundo para o Brasil que entrou no top 10 dos maiores mercados de energia solar nos últimos cinco anos e que traz expectativas de aumento de instalações de 54GW até 2026, números comparáveis ao da Alemanha, que é o maior mercado de energia solar da Europa, conforme os dados apresentados no relatório da *"Global Market Outlook for Solar Power 2022-2026".*

Embora ainda pequena a participação da energia fotovoltaica na matriz elétrica brasileira, este tipo de energia traz potenciais benefícios para o sistema elétrico, entre eles adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, melhoria no perfil de tensão, o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas, melhoria na eficiência energética, energia limpa, sustentável, renovável, entre outros (MATOS et al, 2013; ANEEL,2022).

Diante deste cenário, surge a grande preocupação com a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) injetada na rede, pois novas tecnologias podem contribuir com novos eventos de QEE. A Qualidade de Energia Elétrica está relacionada a problemas de energia manifestados na tensão, corrente ou variações na frequência de modo que resultem na falha ou mau funcionamento dos equipamentos. Com o desenvolvimento tecnológico, especialmente com a eletrônica de potência, as concessionárias e os

consumidores estão preocupados com a qualidade de energia pelos seguintes motivos (OLIVEIRA, 2000):

- Os equipamentos de hoje são muito sensíveis a distúrbios;
- Uso de equipamentos que podem aumentar os níveis de distorções harmônicas;
- Vida útil dos equipamentos;
- Exigência parte dos consumidores para que as concessionárias de energia melhorem a qualidade de energia fornecida.

Com o aumento crescente de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR), as concessionárias encontram um novo desafio que está na qualidade de energia entregue por esses sistemas e na sua interface (PUFAL, 2012). É importante salientar que a qualidade de energia elétrica deve atender todas as normas previstas pela ANEEL e às padronizações e regras contidas no PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, que em seu módulo 8 regulamenta a QEE.

Diante disso, o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, assim como muitas instituições de ensino, investiu em sistemas fotovoltaicos em suas unidades, trazendo economia que possibilita investimentos importantes e por uma instituição mais sustentável. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar a QEE entregue pelo sistema fotovoltaico da Unidade Nepomuceno.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Qualidade de Energia Elétrica

Qualidade de Energia Elétrica pode ser definida como sendo uma medida de quão bem a energia elétrica pode ser utilizada pelos consumidores. Essa medida inclui características de continuidade de suprimento e parâmetros considerados seguros para uma operação eficiente. A QEE trata de problemas que afetam seus consumidores ou usuários indiretos, que vão desde os incômodos visuais provocados pela variação luminosa até a interferência em equipamentos eletrônicos sensíveis. (DECKMANN et al., 2017).

Quanto às normatizações vigentes, há uma tendência de se rediscutir as normas de âmbito nacionais para se chegar a um consenso internacional. Porém, no Brasil, algumas normas internacionais são adotadas integralmente ou adaptadas podendo acarretar incoerências, sendo que em muitos casos não há consenso entre elas. A norte-americana IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) se preocupa com o impacto de uma unidade consumidora sobre a rede, de uma forma generalizada, uma vez que não se é analisado o que está presente na instalação do consumidor, analisando somente o impacto das cargas. Já a visão europeia da IEC (*International Electrotechnical Commission*) faz a regulamentação de cada equipamento considerando os de maiores usos e que causam grandes impactos, buscando o controle individual destes aparelhos que possam ter um impacto negativo em termos de QEE. Essa é uma das dificuldades para a unificação das normas (DECKMANN et al., 2017).

Entre os parâmetros a considerar na seção 8.1 do módulo 8 do PRODIST, estão indicados os fenômenos relacionados à qualidade de energia elétrica, sendo divididos em (ANEEL,2021):

a) fenômenos de regime permanente:

i. variações de tensão em regime permanente;

ii. fator de potência;

iii. harmônicos;

iv. desequilíbrio de tensão;

v. flutuação de tensão;
vi. variação de frequência.

b) fenômenos de regime transitório:
i. variações de tensão de curta duração – VTCD.

2.1.1 Variações de Tensões em Regime Permanente

A conformidade de tensão em regime permanente refere-se à comparação do valor de tensão obtido por leitura (TL) apropriada no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensão especificados como adequados, precários e críticos. Estes valores são obtidos por meio de comparações à tensão de referência (TR), sendo tensão nominal ou contratada. (ANEEL, 2021; DECKMANN et al., 2017).

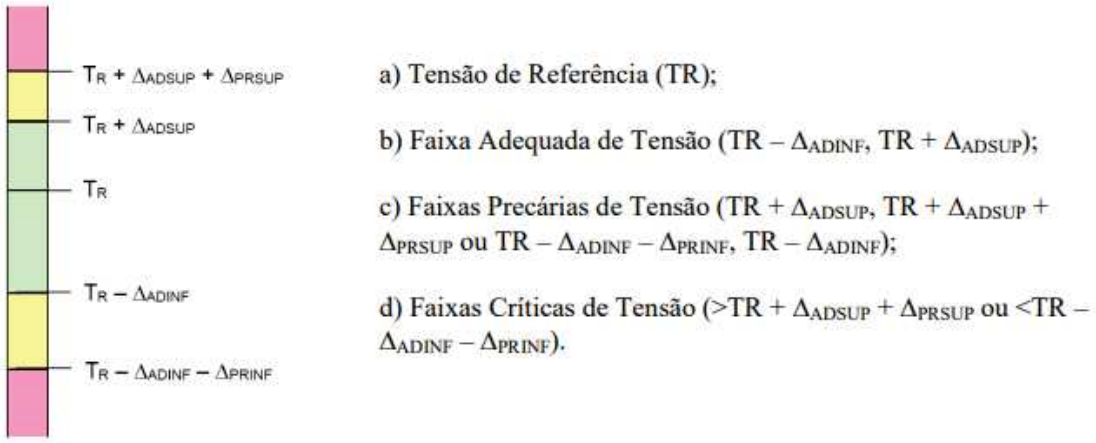
Obtidas as leituras, calcula-se os índices de Duração Relativa da transgressão para tensão Precária (DRP) e o para tensão Crítica (DRC), que estarão relacionados a um mês civil. As grandezas nlp e nlc representam, respectivamente, o maior valor entre as fases do número de leituras situadas nas faixas precária e crítica (DECKMANN et al., 2017; ANEEL, 2021).

A seguir são apresentadas as fórmulas para se obter os indicadores após as 1008 leituras válidas.

$$DRP = \frac{nlp}{1008} * 100[\%] \qquad DRC = \frac{nlc}{1008} * 100[\%] \tag{1}$$

Os valores limites individuais para DRP e DRC são 3% e 0.5% respectivamente. A Figura 1, apresenta a faixa de operação para a tensão de suprimento e suas respectivas classificações conforme sua variação.

Figura 1- Faixa de Operação para a tensão de suprimento.

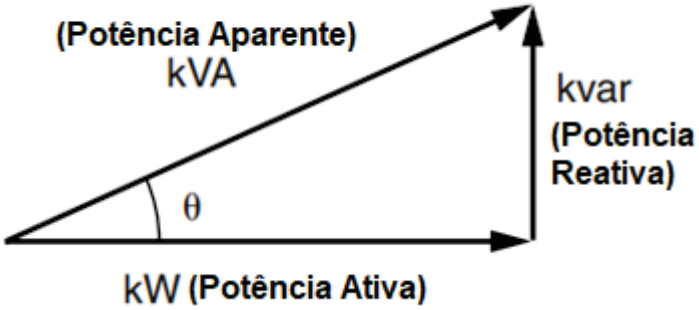


Fonte: (DECKMANN et al., 2017)

2.1.2 Fator de Potência

Fator de potência é definido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente consumidas por um dispositivo ou equipamento (POMILIO,2007). A Figura 2, mostra o Triângulo Retângulo de Potência.

Figura 2-Triângulo Retângulo de Potência (ADAPTADO).



Fonte: (DUGAN, Roger C. et al, 2004)

A equação do fator de potência é descrita a seguir:

$$Fp = \frac{P}{S} \tag{2}$$

sendo:

Fp- fator de potência;

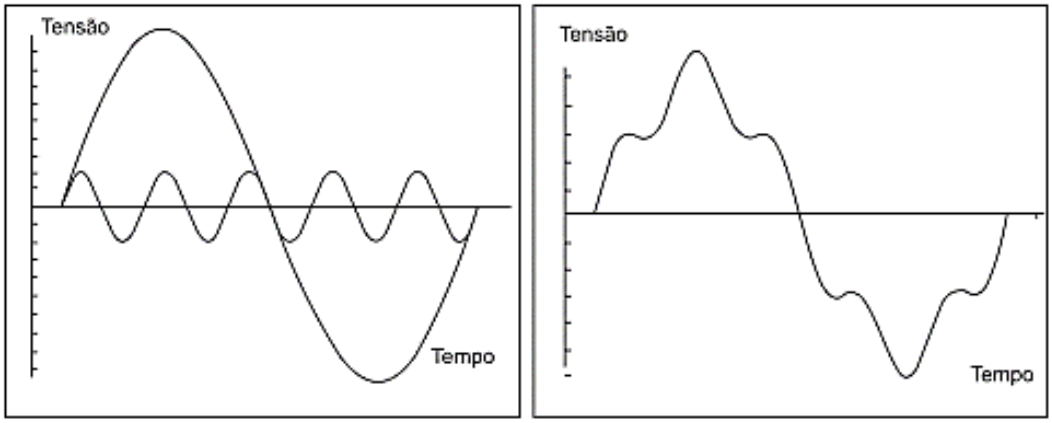
P- Potência ativa;

S- Potência Aparente.

2.1.3 Harmônicos

As distorções harmônicas são sinais senoidais com frequências múltiplas inteiras que causam deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental (MERKLE,2018; ANEEL,2021). Diferentemente da grande maioria dos equipamentos, os novos dispositivos não se comportam de forma linear, gerando harmônicas no sistema por injetarem na rede formas de ondas diferentes das senoidais puras de mesma frequência (BELISKI,2017). A Figura 3 apresenta a influência da componente harmônica na onda fundamental da tensão de fornecimento.

Figura 3-Forma de onda típica do efeito de harmônicas



Fonte: (ADALBÓ, 2001)

2.1.4 Desequilíbrio de Tensão

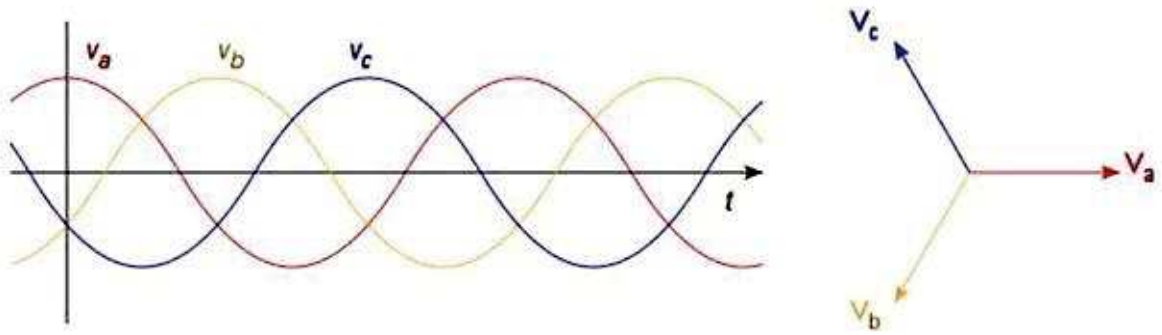
O desequilíbrio em um sistema elétrico trifásico está relacionado a divergência de valores de tensão sejam em módulo, defasagem angular diferentes de 120° elétricos ou apresentar ambas as condições simultaneamente nas fases de um sistema (PAULILO,2013).

As origens destes desequilíbrios podem estar nos sistemas de distribuição, quando as cargas monofásicas são distribuídas inadequadamente, ocasionando no circuito tensões de sequência negativa, ou quando o consumidor atendido por

alimentação trifásica possui uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária (OLIVEIRA, 2000).

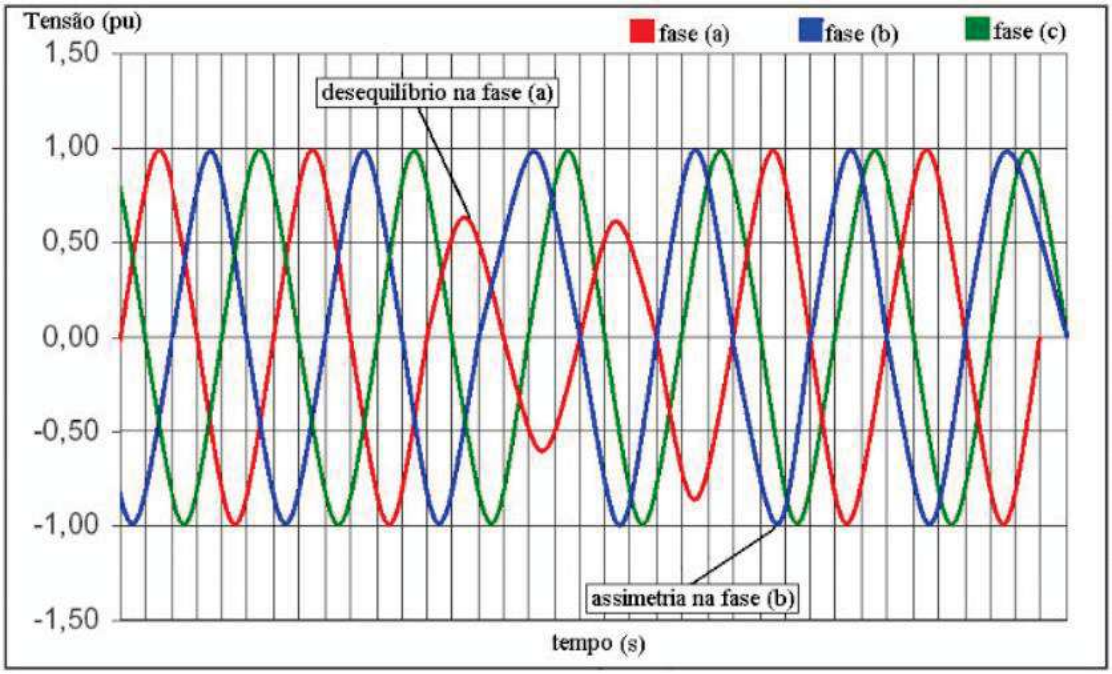
As Figuras 4 e 5 representam um sistema trifásico equilibrado e sistema trifásico desequilibrado respectivamente, neste caso, observa-se que o desequilíbrio ocorre na amplitude da fase A.

Figura 4-Sistema Trifásico Equilibrado



Fonte: (GUIMARÃES, 2020)

Figura 5-a) Desequilíbrio de Tensão b) Assimetria de Tensão



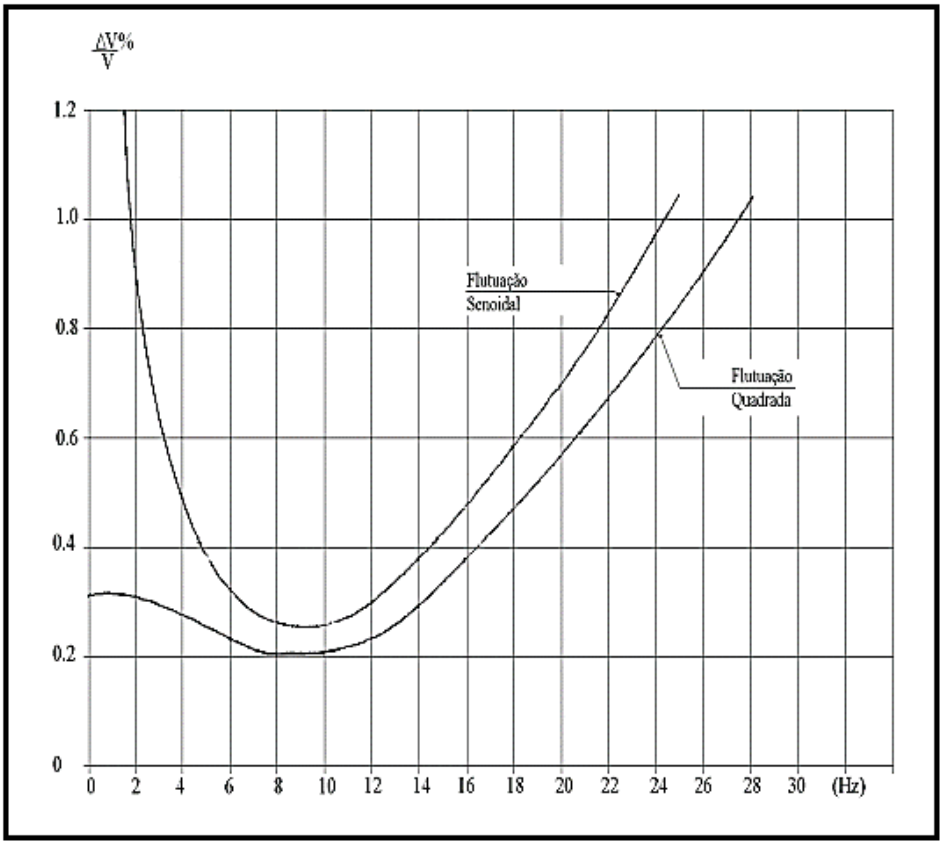
Fonte: (Xavier, 2005)

2.1.5 Flutuação de Tensão

Variações regulares ou irregulares no valor eficaz ou na amplitude da tensão, que muitas vezes causa o efeito de cintilação, também chamado de *flicker*, que é a impressão visual resultante das variações do fluxo luminoso das lâmpadas. (DECKMANN et al., 2017; ANEEL,2021).

A intensidade do efeito *flicker* está associada aos seguintes fatores: amplitude das oscilações; frequência da moduladora; e duração do distúrbio ou ciclo de operação da carga perturbadora. A Figura 6, representa os limiares da percepção visual para flutuações de tensão variações da ordem de 0,25% da tensão nominal, sendo consideradas em baixas frequências 1 a 15 Hz. Contudo, para as variações graduais, ocorre uma acomodação visual, provocando um nível de irritação visual tolerável para o ser humano (OLIVEIRA,2000).

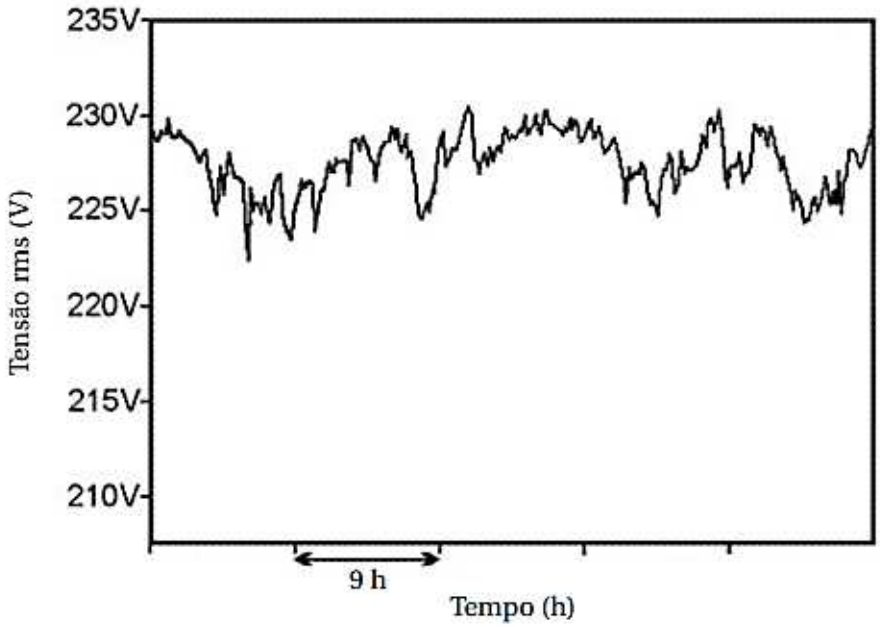
Figura 6-Limites da Percepção Visual para Flutuações de Tensão Associadas a Ondas Senoidais e Quadradas



Fonte: (OLIVEIRA,2000)

As causas do *flicker*, sejam elas repetitivas, esporádicas ou aleatórias estão relacionadas a alterações rápidas nas potências ativas e reativas das cargas elétricas. Fornos a arco são exemplos de fontes de flutuações aleatórias, no qual as amplitudes das oscilações dependem do estado de fusão do material, bem como do nível de curto-circuito da instalação. As flutuações repetitivas podem ocorrer com a presença de máquinas de solda, laminadores, elevadores de minas, ferrovias etc. As flutuações esporádicas têm como principal fonte a partida direta de grandes motores (PAULILLO, et al.,2012). A Figura 7 mostra um exemplo de flutuação de tensão.

Figura 7-Flutuação de Tensão



Fonte: (HANZELKA et al., 2006).

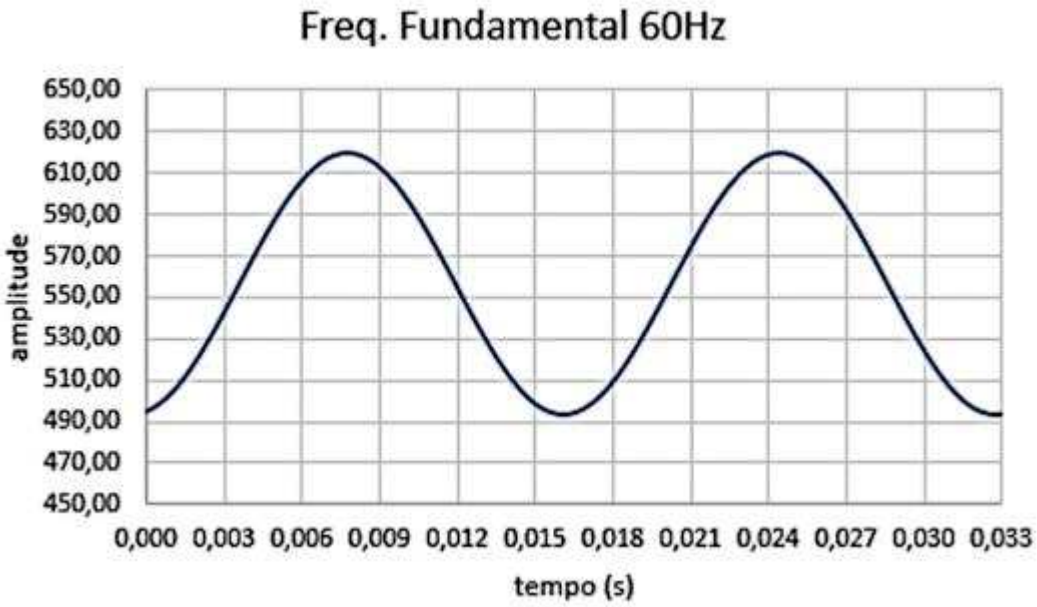
2.1.6 Variação de Frequência

A variação da frequência pode ser definida como o desvio da frequência fundamental do sistema, a partir do valor nominal determinado (DUGAN et al, 2004). Em condições normais de operação, o sistema de distribuição e os sistemas de geração a ele conectadas devem operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz (ANEEL,2021).

Devido a impossibilidade de armazenamento de energia, é necessário um controle contínuo da geração de energia elétrica a fim de compensar possíveis

desequilíbrios entre geração e demanda, para isso, há a necessidade de sincronismo entre a velocidade das turbinas e dos geradores. Podemos entender essas variações como indicadores, se há uma redução da frequência acusa geração insuficiente e o aumento da mesma, acusa aumento da geração (DECKMANN et al., 2017; ANEEL,2021). A Figura 8 uma representação de uma frequência fundamental de 60 Hz.

Figura 8-frequência fundamental



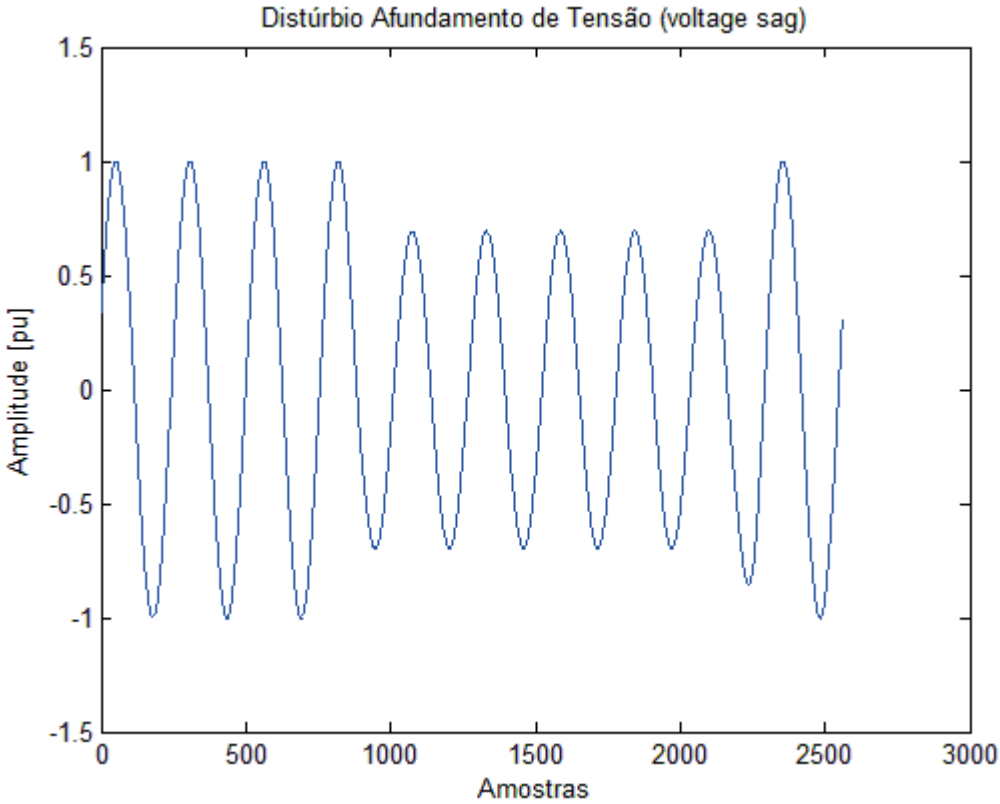
Fonte: (DIONISIO, 2016)

2.1.7 Variações de Tensão de Curta Duração-VTCD

As Variações Transitórias de Curta Duração (VTCD) são eventos de afundamento e elevação de tensão com duração de ½ ciclo a um minuto ou ainda pode ocorrer uma completa perda da tensão. Há uma dificuldade de classificação para os transitórios com duração menor que um ciclo da tensão fundamental da rede elétrica, os surtos e transitórios rápidos de tensão (DECKMANN et al., 2017).

Os eventos de afundamento de tensão, conhecidos também como *Voltage Sag* ou *Dips* estão associados, principalmente, a curto-circuitos ocorridos nas redes de distribuição, mas, pode também ser causado pela energização de grandes cargas, partida de grandes motores e pela corrente *inrush* de um transformador OLIVEIRA,2000). A Figura 9, mostra o distúrbio.

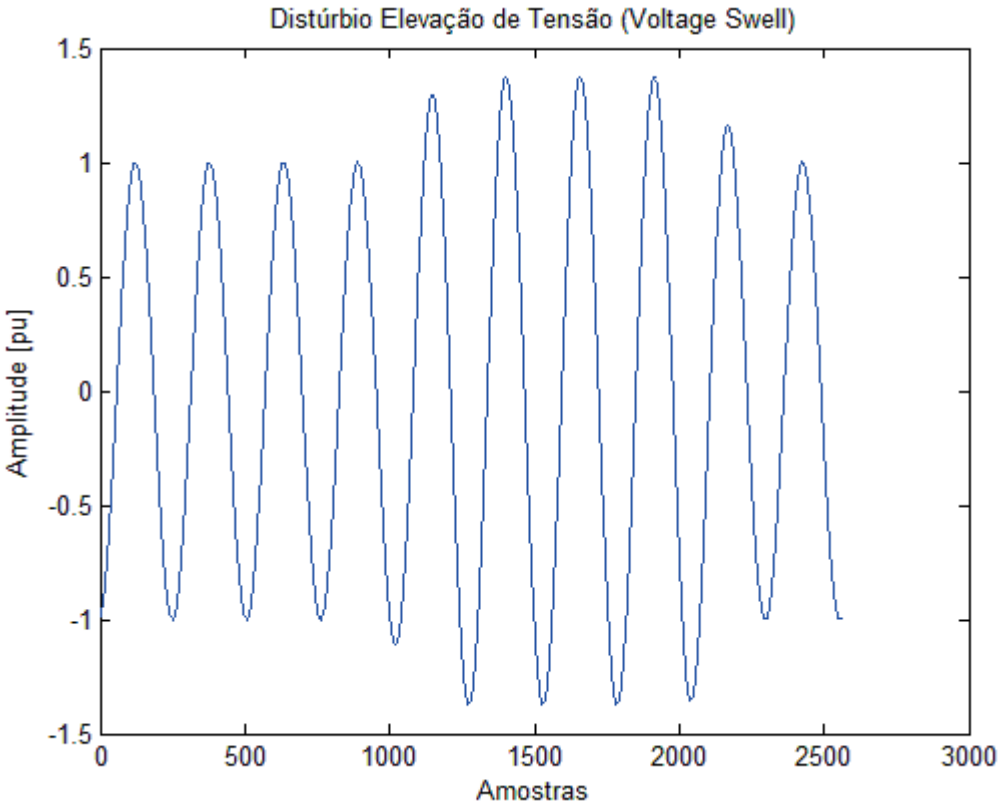
Figura 9-*Voltage Sag*



Fonte: (SANTANA, 2017)

As elevações de tensão, também conhecidas como *Voltage Swell*, estão relacionadas com as condições de falta no sistema, principalmente ao curto-circuito fase-terra, pois nestas condições as fases não defeituosas experimentam uma elevação de tensão. Além disso, podem estar associadas à saída de grandes blocos de cargas ou à energização de grandes bancos de capacitores, porém, com uma incidência pequena se comparada com as sobretensões provenientes de faltas fase-terra nas redes de transmissão e distribuição. A Figura 10 mostra um *Swell* (OLIVEIRA,2000).

Figura 10-*Voltage Swell*

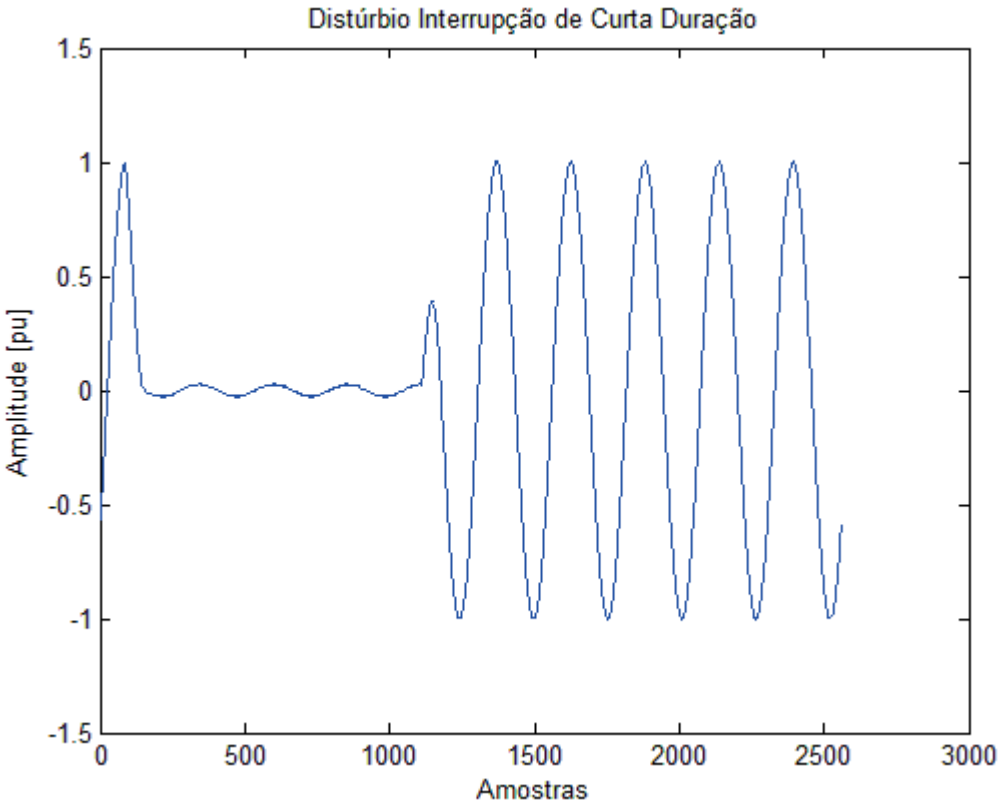


Fonte: (SANTANA,2017)

A Interrupção de curta duração ou *Interruption* ocorre quando o fornecimento de tensão decresce em um valor menor que 0,1 pu, sendo consequência de falhas nos equipamentos, efeito retardado em dispositivos de proteção, defeitos nos sistemas de energia ou mal funcionamento dos sistemas de controle. Quando ocorre, tem duração de meio ciclo até 3 minutos, dependendo da situação (DUGAN,2004; ANEEL,2021; ADALBÓ, 2001).

A Figura 11 mostra um exemplo de interrupção momentânea.

Figura 11-Interrupção de curta duração



Fonte: (SANTANA,2017)

2.2 Sistema Fotovoltaico

Em sistemas fotovoltaicos a energia proveniente do Sol é transformada diretamente em eletricidade por meio de células fotovoltaicas. Devido a suas características construtivas, há vantagens, pois, em caso de aumento da carga, a expansão da capacidade de geração simplesmente aumentando proporcionalmente o número de módulos fotovoltaicos. A primeira aplicação prática de energia solar fotovoltaica foi como fonte energética de satélites artificiais, o *Vanguard* I, já em 1958, era equipado com módulos de células de silício com a potência da ordem de poucas dezenas de miliwatts (PRIEB, 2002).

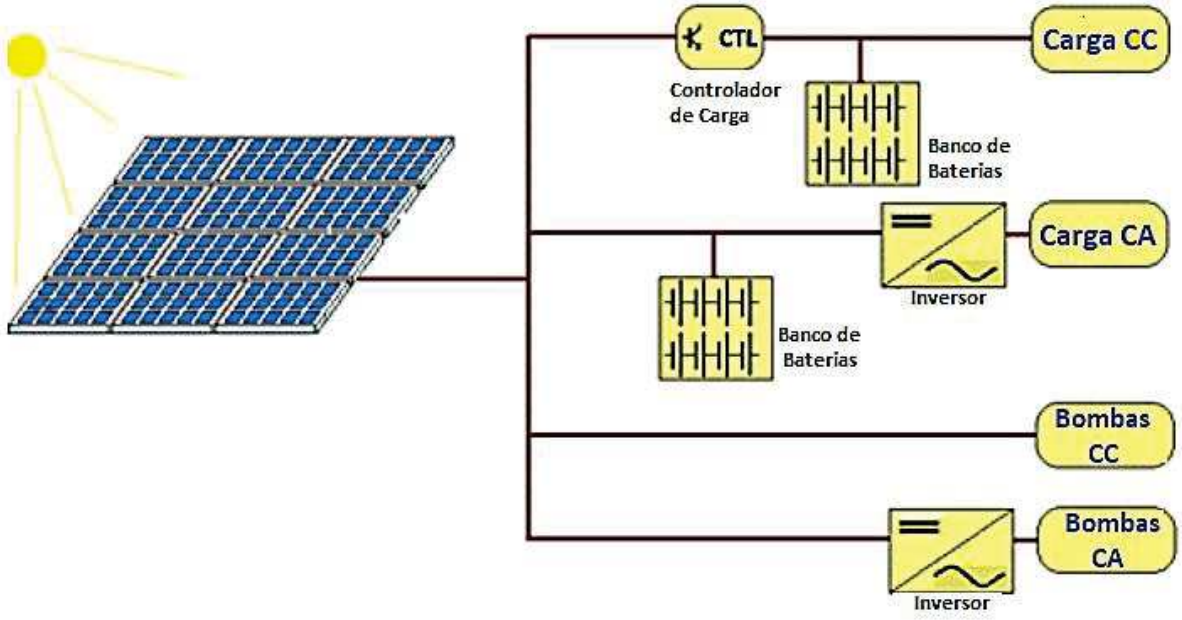
2.2.1 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

Um sistema fotovoltaico pode ser classificado em três tipos: conectados à rede (*on grid*), isolados *(off grid)* ou híbridos.

2.2.1.1 Sistemas *Off Grid*

O sistema *off grid* é caracterizado por não se conectar à rede elétrica. Ele abastece diretamente os aparelhos que utilizarão a energia, e são, geralmente, construídos com um propósito local e específico ou podem ser constituídos de sistemas de armazenamento de energia em baterias munido de dispositivo para controlar carga e descarga da bateria e, para alimentar eletrodomésticos em CA, já é necessário um inversor. Esse sistema é muito utilizado em áreas rurais, fazendas e isoladas onde não tem rede elétrica. (BORTOLOTO et al, 2017; CRESEB, 2008). A Figura 12 mostra um diagrama fotovoltaico que varia e acordo com a carga utilizada no local.

Figura 12-Diagrama fotovoltaico de acordo com a carga utilizada.



Fonte: (CRESEB, 2008)

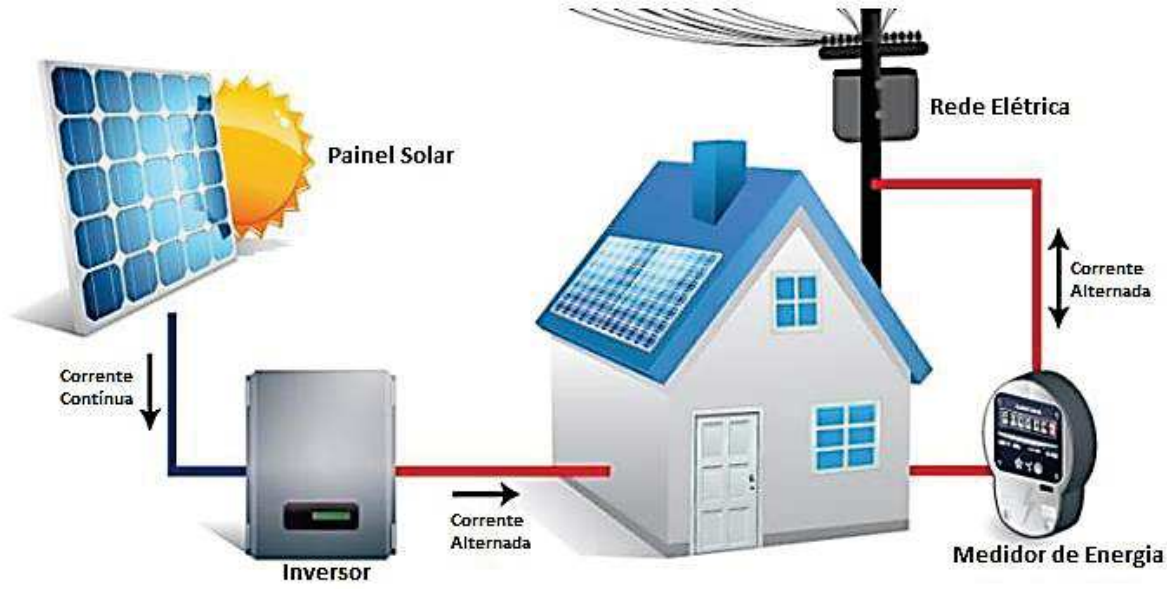
2.2.1.2 Sistemas *On Grid*

O sistema fotovoltaico conectado à rede também é conhecido como *on grid* ou *grid tie*. O sistema *on grid* dispensam o uso de baterias, pois toda potência gerada pelo

sistema fotovoltaico é consumida pelas cargas ou são injetadas diretamente na rede elétrica (BORTOLOTO et al, 2017).

O sistema é composto de um painel com módulos fotovoltaicos que possuem a função de converter a energia solar em energia elétrica em corrente contínua e possui os inversores, que convertem essa corrente contínua em corrente alternada, com frequência e tensão compatíveis com os valores da rede elétrica, como pode ser verificado na Figura 13. Em suma, ele envia energia para a rede quando a geração é maior que o consumo, e retira dela quando o consumo é maior que a geração. Portanto, a rede funciona o usuário paga só para a concessionária quando consome mais que gera, e caso produza mais do que consome, ele recebe créditos de acordo com a resolução normativa da (ANEEL 482/2012; BORTOLOTO et al, 2017).

Figura 13-Sistema *On Grid*



Fonte: (BORTOLOTO et al, 2017).

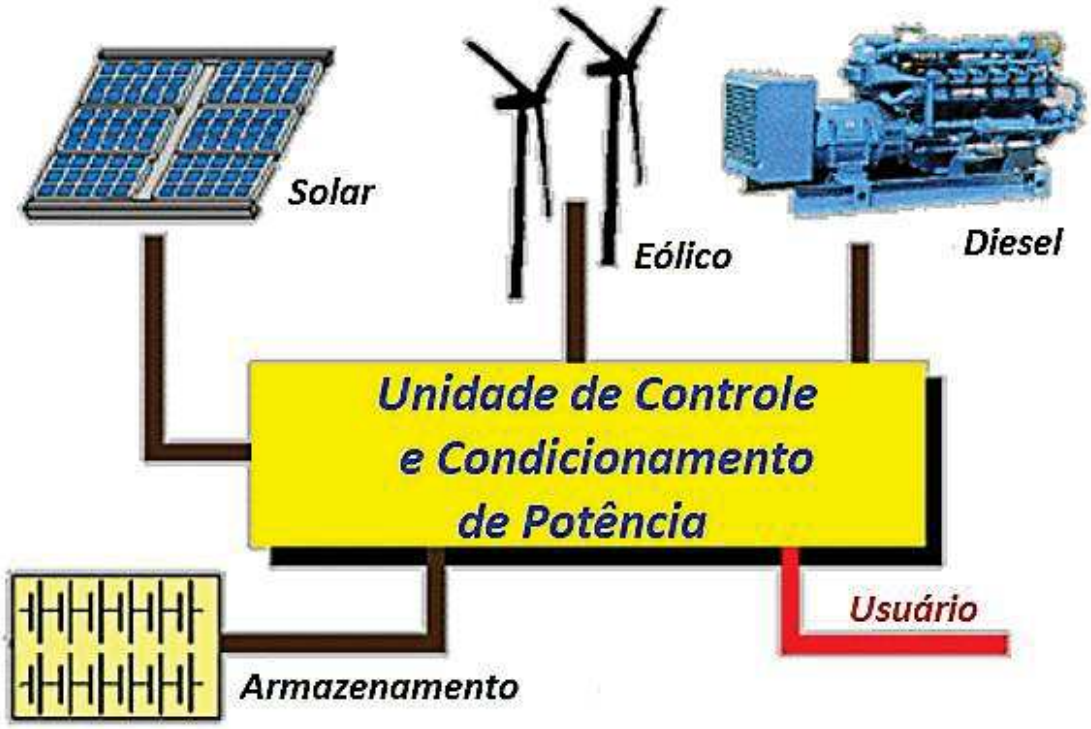
2.2.1.3 Sistemas Híbridos

Sistemas híbridos são caracterizados por apresentarem várias fontes de energia elétrica como por exemplo: turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos entre outras e assim como o *off grid*, são desconectados das redes convencionais (CRESEB, 2008).

Há a necessidade de um controle de carga para que se consiga utilizar o máximo da capacidade de cada fonte. Uma instalação de geração híbrida pode usar a energia

fotovoltaica (quando o sol está brilhando) e de outra fonte (eólica, por citar alguma, quando o tempo não estiver bom), garantindo assim um fornecimento mais estável e eficiente. Uma instalação híbrida pode incluir, ou não, sistemas de armazenamento. Essa combinação de fontes que os pontos fracos de cada fonte de energia sejam mitigados ou complementados (DE OLIVEIRA BARBOSA et al, 2016; IBERDROLA, s.d.). A Figura 14 apresenta um exemplo de sistema híbrido em que se combinam energia solar, eólica, geração diesel e um sistema de armazenamento.

Figura 14-Exemplo de Sistema Híbrido



Fonte: (CRESEB, 2008).

2.3 PRODIST

Procedimentos de Distribuição do Sistema Elétrico de Energia Nacional, conhecido como PRODIST, são procedimentos que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e ao desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Conforme apresentada na RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 956, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021, o PRODIST é composto pelos seguintes módulos:

Módulo 1 - Glossário de Termos Técnicos do PRODIST
Módulo 2 - Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição
Módulo 3 - Conexão ao Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
Módulo 4 - Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição
Módulo 5 - Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura
Módulo 6 - Informações Requeridas e Obrigações
Módulo 7 - Cálculo de Perdas na Distribuição
Módulo 8 - Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica
Módulo 9 - Ressarcimento de Danos Elétricos
Módulo 10 - Sistema de Informação Geográfica Regulatório
Módulo 11 - Fatura de Energia Elétrica e Informações Suplementares

Em suma, é um conjunto de documentos que tem por objetivo normatizar as relações entre os consumidores e distribuidoras de energia elétrica, a operação do sistema de distribuição e dos agentes geradores de energia. Cada um desses módulos é responsável por detalhar as ações técnicas dos agentes de distribuição, ou seja, das partes interessadas que estão conectadas ou que irão se conectar à rede (ENERGÊS,2021).

Sendo destinados aos consumidores, centrais geradoras, distribuidoras, agentes importadores ou exportadores de energia elétrica, transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão – DIT e Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. O PRODIST traz os procedimentos relativos à qualidade do fornecimento de energia elétrica na distribuição, no que se refere à qualidade do produto, à qualidade do serviço e à qualidade comercial.

A qualidade do produto engloba os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, devendo ser supervisionada, avaliada e controlada por meio de indicadores coletivos e individuais, a serem observados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico e pelas distribuidoras. A qualidade do serviço engloba a continuidade dos serviços públicos de energia elétrica, nos seus aspectos de duração e frequência, e os tempos de atendimento às ocorrências emergenciais. Por se tratar de levantamentos estatísticos dos parâmetros de qualidade da energia elétrica, as campanhas de medição fundamentadas pelo PRODIST poderão ser atendidas por

instrumentos Classe S (GESTAL, 2022). A qualidade comercial está relacionada aos direitos e deveres tanto de consumidores quanto distribuidoras, levando em conta quesitos como qualidade de atendimento, demandas de ouvidoria, prazos etc.

Diante disso, o objeto de estudo deste trabalho está na qualidade do produto em que suas características de estudos podem ser encontradas especificamente no item 8.1 do módulo 8, cujos parâmetros de referência utilizados para se analisar a qualidade de energia são descritos a seguir.

2.3.1 Indicadores de Variações de Tensão em Regime Permanente

A Tabela 1, mostra os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente estabelecidos pelo PRODIST no Anexo 8.A. Onde, TL é a tensão de leitura obtida nas medições.

Tabela 1- Ponto de Conexão em Tensão nominal inferior a 2,3 KV (220/127)

Tensão de Atendimento	**Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)**
Adequada	(202≤TL≤231) /(117≤TL≤133)
Precária	(191≤TL<202 ou 231<TL≤233) / (110≤TL<117 ou 133<TL≤135)
Crítica	(TL<191 ou TL>233) / (TL<110 ou TL>135)

Fonte: (ANEEL,2021)

2.3.2 Índice de Fator de Potência

O controle do fator de potência deve ser efetuado por medição permanente e obrigatória, no caso de unidades consumidoras atendidas pelo Sistema de Distribuição de Média Tensão – SDMT e pelo Sistema de Distribuição de Alta Tensão - SDAT e nas conexões entre distribuidoras, observando o disposto em regulamentação.

A distribuidora deve manter, em meio eletrônico, o resultado das medições de fator de potência, pelo período mínimo de 10 anos.

Para unidade consumidora do Grupo A ou ponto de conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo, ou 1,00 e 0,92 capacitivo, de acordo com as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica.

Para a central geradora, o fator de potência deve estar compreendido entre os valores estabelecidos nos Procedimentos de Rede.

2.3.3 Indicadores de Harmônicos

A Tabela 2, mostra quais são os indicadores de harmônicos.

Tabela 2- Indicadores de Harmônicos

Descrição	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$
Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT95\%$
Valor do indicador $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_p95\%$
Valor do indicador $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_i95\%$
Valor do indicador $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	$DTT_395\%$

Fonte: (ANEEL, 2021)

A distorção harmônica individual pode ser obtida pela seguinte equação:

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} x100[\%] \quad (3)$$

Sendo:

V_h= tensão harmônica de ordem h;

h= ordem harmônica individual; e

V_1= tensão fundamental medida.

Já a Distorção harmônica total é obtida pela seguinte equação:

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} x100[\%] \quad (4)$$

Sendo:

h= todas as ordens harmônicas de 2 até h_{max};

h_{max}= ordem harmônica máxima, conforme classe do equipamento de medição utilizado (Classe A ou S);

V_h=tensão harmônica de ordem h; e

V_i= Tensão fundamental medida.

Observação: A equação anterior serve como base para calcular os demais indicadores, seus parâmetros mudarão conforme o caso, pares, ímpares, múltiplos de 3 ou não múltiplos de 3, etc.

A Tabela 3 mostra os limites para os indicadores das distorções harmônicas totais, os limites correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição.

Os limites correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição.

Tabela 3- Limites das distorções harmônicas em totais (em % da tensão fundamental)

Indicador	Tensão nominal (V_n)		
	$V_n < 2{,}3kV$	$2{,}3kV \leq V_n < 69kV$	$69kV \leq V_n < 230kV$
$DTT95\%$	10,0%	8,0%	5,0%
$DTT_p95\%$	2,5%	2,0%	1,0%
$DTT_i95\%$	7,5%	6,0%	4,0%
$DTT_3 95\%$	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: (ANEEL, 2021)

2.3.4 Indicador de Desequilíbrio de Tensão

A equação para o cálculo do indicador FD% é:

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} * 100[\%] \quad (5)$$

sendo:

FD%= fator de desequilíbrio de tensão;

V_- = magnitude da tensão eficaz de sequência negativa na frequência fundamental; e

V_+ = magnitude da tensão eficaz de sequência positiva na frequência fundamental

O indicador de desequilíbrio de tensão a ser comparado com os limites é o FD95%, que representa o valor do Fator de Desequilíbrio de Tensão – FD% que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas. Os limites para o indicador de desequilíbrio de tensão FD95% estão apresentados na tabela a seguir:

Tabela 4- Limite para o indicador de desequilíbrio de tensão

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

Fonte: (ANEEL, 2021)

2.3.5 Indicador de Flutuação de Tensão

Os indicadores de flutuação de tensão de acordo com o PRODIST são (ANEEL, 2021):

- P_{st} representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 10 minutos.
- P_{lt} representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 2 horas.
- $P_{st}95\%$ representa o valor do indicador P_{st} que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas.

A equação para o cálculo do indicador P_{st} é:

$$P_{st} = \sqrt{0{,}0314P_{0,1} + 0{,}0525P_1 + 0{,}0657P_3 + 0{,}28P_{10} + 0{,}08P_{50}} \quad (6)$$

Em que:

$P_i(\, i = 0{,}1; 1; 3; 10; 50)$ corresponde ao nível de flutuação de tensão que foi ultrapassado durante i% do tempo, obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, de acordo com o procedimento estabelecido nas Normas IEC (*International Electrotechnical Commission*): IEC 61000-4-15. *Flickermeter – Functional and Design Specifications*.

O P_{lt} corresponde a um valor representativo de 12 amostras consecutivas de P_{st}, como estabelecido pela equação a seguir:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12}\sum_{i=1}^{12}\left(P_{st_i}\right)^3} \quad (7)$$

A Tabela 5 fornece os limites a serem utilizados para a avaliação do desempenho do sistema de distribuição quanto às flutuações de tensão.

Tabela 5- Limites para flutuação de tensão

Indicador	**Tensão nominal (V_n)**		
	$V_n < 2{,}3kV$	$2{,}3kV \leq V_n < 69kV$	$69kV \leq V_n < 230kV$
$P_{st}95\%$	1,0 pu	1,5 pu	2,0 pu

Fonte: (ANEEL,2021)

Os limites correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição.

2.3.6 Faixa de Operação da Variação da Frequência

Além do que foi citado anteriormente, em condições normais, sistema de distribuição e os sistemas de geração devem operar na faixa de 59,9 Hz e 60,1 Hz, na ocorrência de distúrbios no sistema de distribuição, as instalações de geração devem garantir que a frequência retorne, no intervalo de tempo de 30 segundos após a transgressão, para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração.

Ocorrendo corte de geração ou carga, a frequência:

- não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz em condições extremas;
- pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 segundos; e
- pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 5 segundos

2.3.7 Indicadores de Variação de Tensão de Curta Duração-VTCD

As variações de curta duração são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a 3 minutos. As variações de tensão de curta duração são classificadas de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6- Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração – VTCD

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão – IMT	Inferior ou igual a 3 segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão – AMT	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão – EMT	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão – ITT	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão – ATT	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão – ETT	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: (ANEEL,2021)

2.4 Analisador de Qualidade de Energia MAR722

Segundo seu manual, o MAR722, apresentado na Figura 15, da fabricante Megabras, foi desenvolvido com base na norma IEC 61010-1. A norma IEC 61010 trata da segurança de equipamentos de inspeção e medição, possui CAT III 1000 V, CAT IV 600 V, sendo:

- CAT III: Categoria de medição III corresponde a medições realizadas em instalações de edificações. Exemplo: Medição de painéis de distribuição, cabeamento etc.
- CAT IV: Categoria de medição IV corresponde a medições realizadas em pontos onde se faz a conexão de baixa tensão com a rede de energia. Exemplo: medição em dispositivos de proteção contra sobre tensão.

Figura 15-MAR722

Fonte: (MEGABRAS,2017)

O equipamento foi projetado especialmente para o departamento de inspeção e manutenção de energia, oferecendo medições para verificar o sistema de distribuição de energia, detectar a qualidade e as características elétricas da rede. Sendo elas: exibição em tempo real da forma de onda (4 tensões / 4 correntes); meio ciclo de medição RMS (tensão e corrente); medir componente CC; medição, cálculo e exibição de harmônicos e inter-harmônicos até a 50º harmônica; captura de transientes; potência ativa, potência reativa, potência aparente e energia, fator de deslocamento de potência e fator de potência verdadeiro; desbalanceamento trifásico (tensão e corrente); *flicker* (tensão flutuante); corrente de partida (*inrush*); detecção e

registro *de Dips & Swells*, alteração rápida de corrente e interrupção (Manual MAR722).

As medições seguem o padrão das seguintes normas:

Tabela 7- Normalização seguida pelo MAR722

Padrões	Norma técnica
Método de medição	IEC 61000-4-30 Classe S
Monitoramento da qualidade de energia	IEC 61000-4-30 Classe S
Monitoramento da qualidade de potência	EN 50160
Flicker	IEC 61000-4-15
Harmônico	IEC 61000-4-7

Fonte: Manual MAR722

A norma IEC 61000-4-30 define os métodos de medição, faixas de certeza e incerteza e os procedimentos para agregar ou integrar os valores de tempo. Ela tem como objetivo padronizar os resultados de um mesmo parâmetro independentemente do equipamento. Há três classes dos métodos de medições, sendo elas (KOIZUMI, 2012):

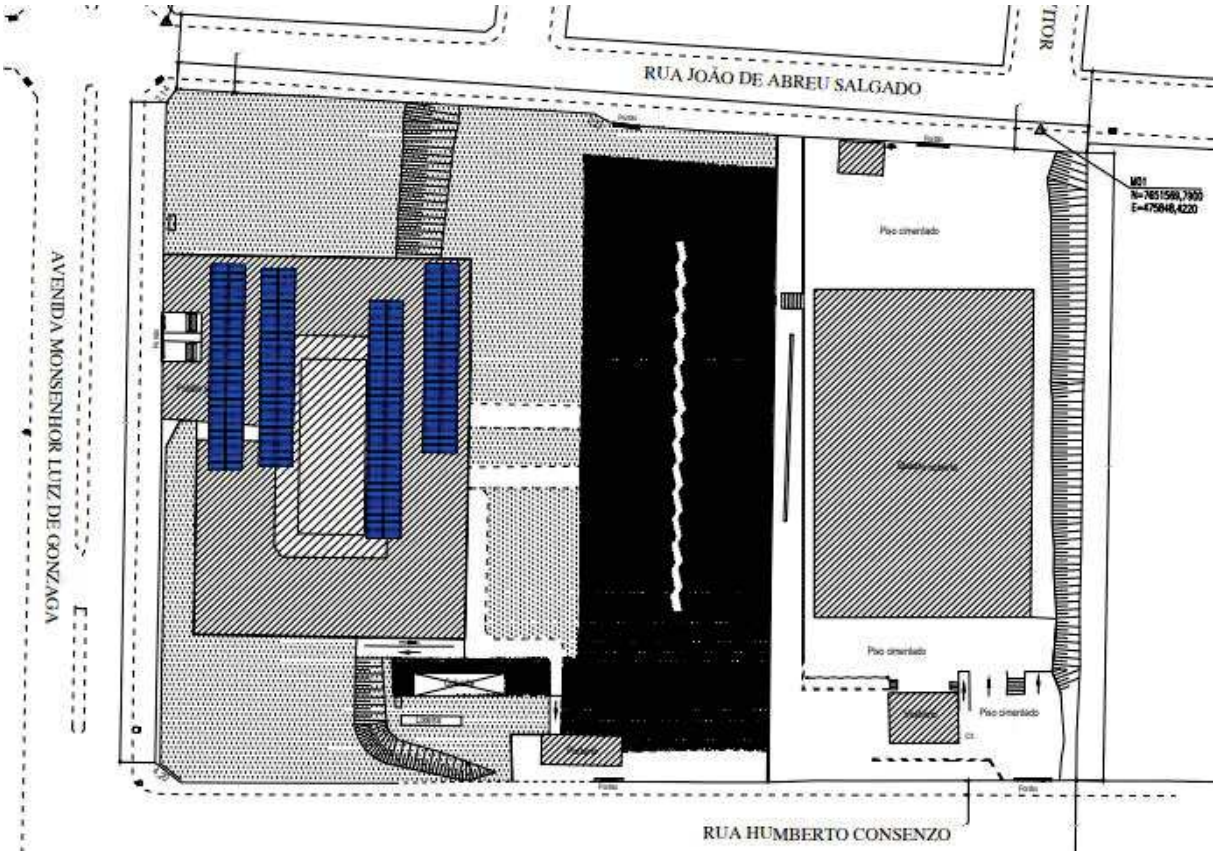
- Classe A: utilizado em aplicações onde os resultados precisam ser mais exatos, isso significa que equipamentos diferentes, mas, da mesma classe devem apresentar o mesmo resultado dentro da tolerância permitida.
- Classe S: possui requisitos de processamentos menores comparados aos de Classe A, por isso, é utilizado em aplicações em que a exatidão não é necessária.
- Classe B: Já a classe B, tem por finalidade evitar a continuidade de projetos obsoletos de muitos instrumentos existentes.

3 METODOLOGIA

3.1 Sistema Fotovoltaico

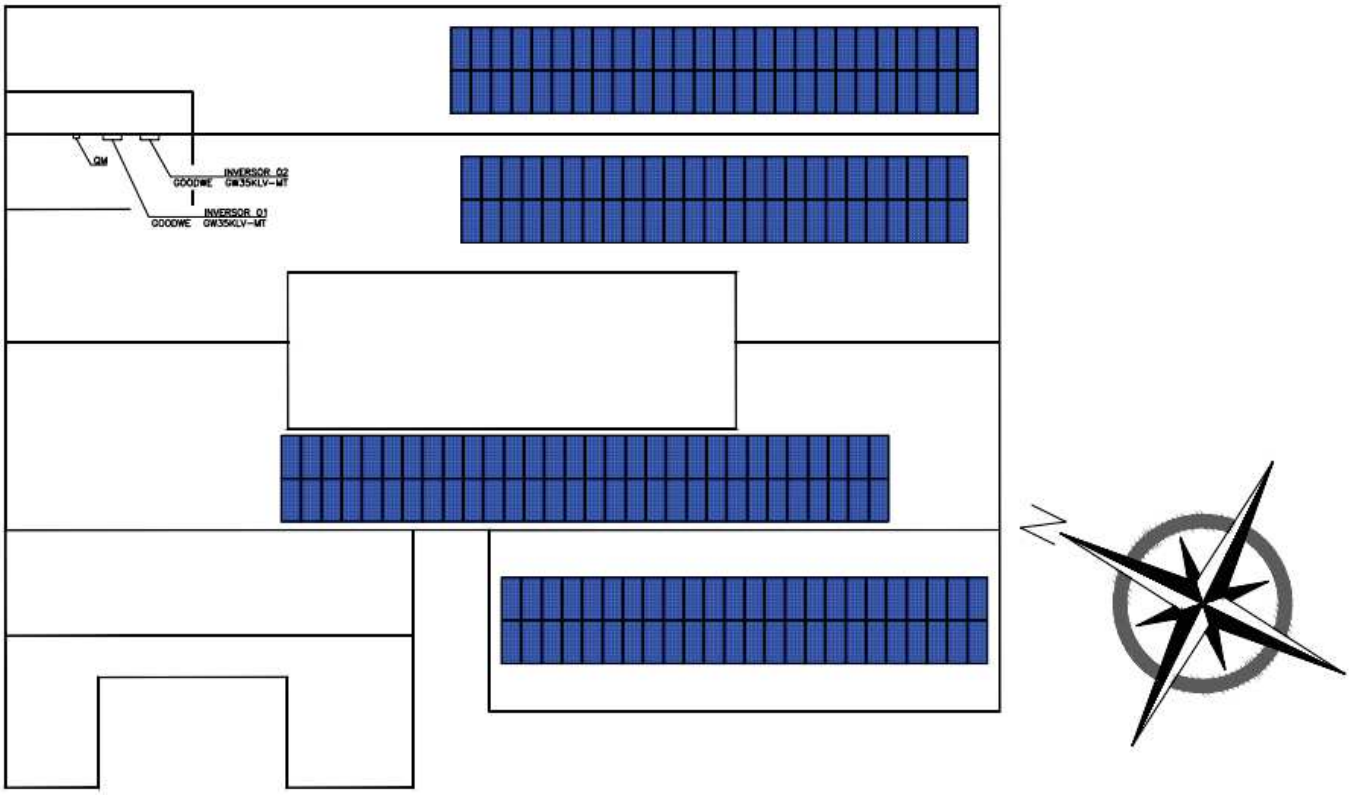
O Sistema fotovoltaico do CEFET-MG Campus Nepomuceno é composto por 210 módulos com capacidade de 440 Wp cada, com uma potência total instalada de 92,40KWp e por dois inversores trifásicos 220V, modelo GW35KLV-MT da fabricante *Goodwe* com potência de saída 36KW cada, totalizando em uma capacidade de 72KW, fator de potência 0,8 ajustável. A Figura 16 mostra a disposição dos módulos em cima do telhado da Unidade e a Figura 17 mostra a localização dos módulos e dos inversores.

Figura 16-Layout Geral da localização e do sistema fotovoltaico



Fonte: (MTEC ENERGIA, 2020)

Figura 17- Localização dos módulos e dos inversores



Fonte: (MTEC ENERGIA, 2020)

As informações da unidade consumidora:

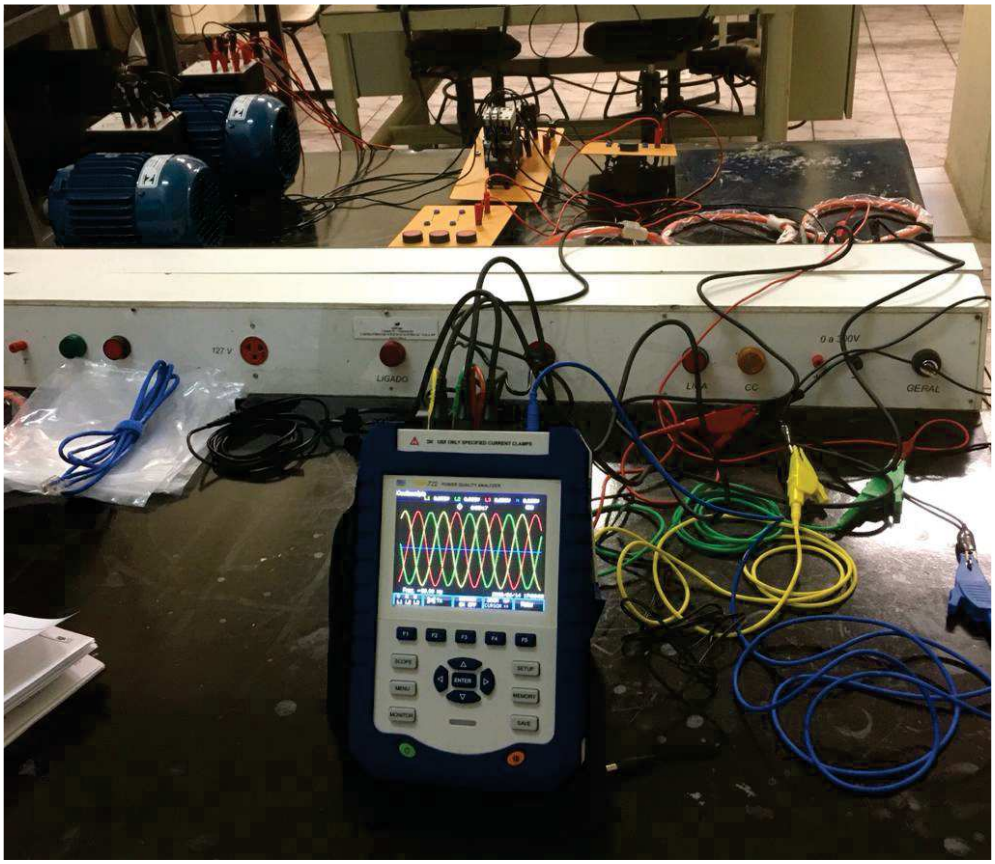
- Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
- Endereço: Avenida Monsenhor Luiz De Gonzaga, 103 EL, Centro
- CEP: 37250-000, Nepomuceno-MG
- CNPJ: 17.220.203/0001-96
- Número Do Cliente: 7000081824
- Número da Instalação: 3007529398
- Média De Consumo: 8289,23 KWh/mês

3.2 Estudo Operacional

Em primeiro momento foi realizado um estudo operacional do Analisador de Qualidade de Energia Elétrica MAR-722 utilizando o ensaio da partida de motores de indução trifásicos (MIT), conforme a Figura 18. A partir desse estudo operacional, monitorava-se a leitura dos parâmetros fornecidos pelo MAR722 e comparava-se com a leitura obtida com a ajuda do multímetro, além de simular variações de tensão

nesses equipamentos para checar se eram registrados pelo analisador. Esses testes são importantes para verificar a confiabilidade do equipamento.

Figura 18-Estudo Operacional do MAR722



Fonte: Do Autor, 2022

Antes de iniciar o procedimento de medição, é necessário a escolha da forma de ligação que o analisador será conectado com a rede ou dispositivo, essas formas de ligação são encontradas no próprio analisador. Conectou-se em delta conforme as definições do projetista do sistema fotovoltaico encontrados no monitoramento.

Examinando o manual, foi possível descobrir que o equipamento fornece diferentes módulos de medição, sendo eles:

- Monitor de qualidade de energia: Contém Tensão RMS, harmônicos, *flicker*, rápida mudança de tensão, *dips, swells*, interrupção, desequilíbrio e frequência;
- Tela diagrama fasorial: Relação de fase entre tensões e correntes é mostrada em um diagrama vetorial;

- Tela de forma de onda: Mostra o valor RMS das formas de onda (tensão ou corrente), a frequência medida;
- Tela de tendência: Esta tela mostra o curso ao longo do tempo de valores de medição da tabela, a Tendência (*Dips & Swells*) é criada gradualmente a partir da direita da tela.
- Tela de tabela: Esta tela fornece uma visão geral instantânea de valores de medição numéricas importantes de tensão, corrente e frequência;
- Função MENU: Na tecla MENU, são apresentados os seguintes modos de medição:
  - i- Tensão, corrente e frequência: exibe valores numéricos de tensão, corrente, frequência e fator de forma de onda;
  - ii- *Dips & Swells*: exibe tendências de atualizações rápidas de tensão, corrente ao longo do tempo e grava os eventos que excedem o limite;
  - iii- Harmônicos: exibe em gráfico de barras e tabela, tensão, corrente harmônico, Inter harmônico, THD (*Total Harmonic Distortion*) componente CC;
  - iv- Potência e energia: exibe valores numéricos de potência ativa, reativa e aparente, fator de potência, fator de potência de deslocamento, tensão, corrente, uso de energia.
  - v- *Flicker*: exibe tendências de *flicker* instantâneo ao longo do tempo, também valores numéricos de *flicker* de tempo curto (1 min) e *flicker* de tempo longo (10 min);
  - vi- Desbalanceamento: valores numéricos de Tensão, porcentagem de desbalanceamento negativo de corrente e porcentagem de desbalanceamento zero, tensão fundamental, componente de corrente e ângulo de fase;
  - vii- Transiente: formas de ondas de corrente e tensão, grava eventos que excedem o limite;
  - viii- Partida de motores: grava eventos que excedem o limite, exemplo, corrente de partida;
  - ix- Registro: Todas as leituras selecionadas.

Para este trabalho, foram utilizadas as funções de medição “Monitor de qualidade de energia” e a função “Potência e energia”, porque a primeira função não mede o fator de potência. Para tanto, o experimento levou um total de 14 dias para se concretizar, sendo 7 dias para o módulo “monitor de qualidade de energia” e 7 dias para a medição extra destinado ao módulo de “potência e energia”.

Para a composição dos indicadores individuais, de acordo com o PRODIST, deve-se considerar o registro de 1.008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de integralização) de 10 minutos cada, equivalente a 168 horas.

A Tabela 8 apresenta os aspectos do “Monitoramento de Qualidade de Energia”:

Tabela 8- Aspectos do Monitoramento de Qualidade de Energia do equipamento

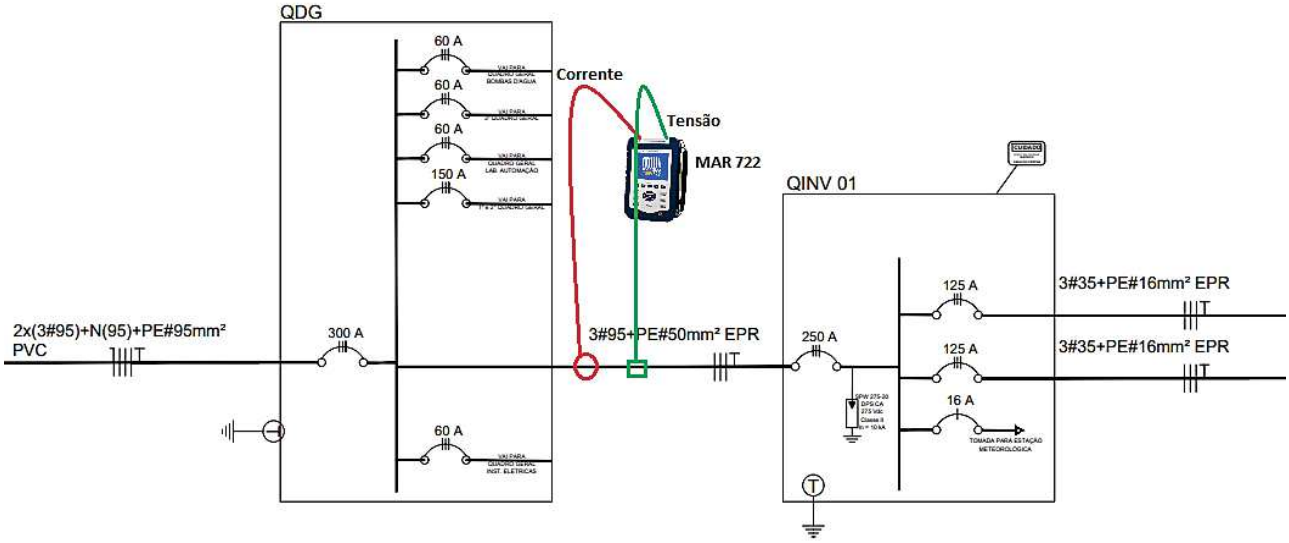
Parâmetro	Gráficos de Barras disponíveis	Limites	Média de Intervalo
RMS	3, um para cada fase	Probabilidade 100%: limites superior e inferior Probabilidade x%: limites superior e inferior	10 minutos
Harmônicos	3, um para cada fase	Probabilidade 100%: limite superior Probabilidade x%: limite superior	10 minutos
Flicker	3, um para cada fase	Probabilidade 100%: limite superior Probabilidade x%: limite superior	2 horas
Dips / Interrupções / Mudanças rápidas de Tensão / Swells	4, Um para cada parâmetro abrangendo todas as 3 fases	Número permitido de eventos	Fundamentado em ½ ciclo RMS
Desbalanceamento	1, abrangendo todas as 3 fases	Probabilidade 100%: limite superior Probabilidade x%: limite superior	10 minutos
Frequência	1, Medido na entrada de tensão de referência A / L1	Probabilidade 100%: limites superior e inferior Probabilidade x%: limites superior e inferior	10 segundos

Fonte: Manual MAR722

3.3 Medição

Para o ponto de medição, foi preciso analisar o projeto fotovoltaico instalado na unidade. A Figura 19 mostra o local escolhido, uma vez que este é a saída dos inversores que injetam energia na rede da concessionária.

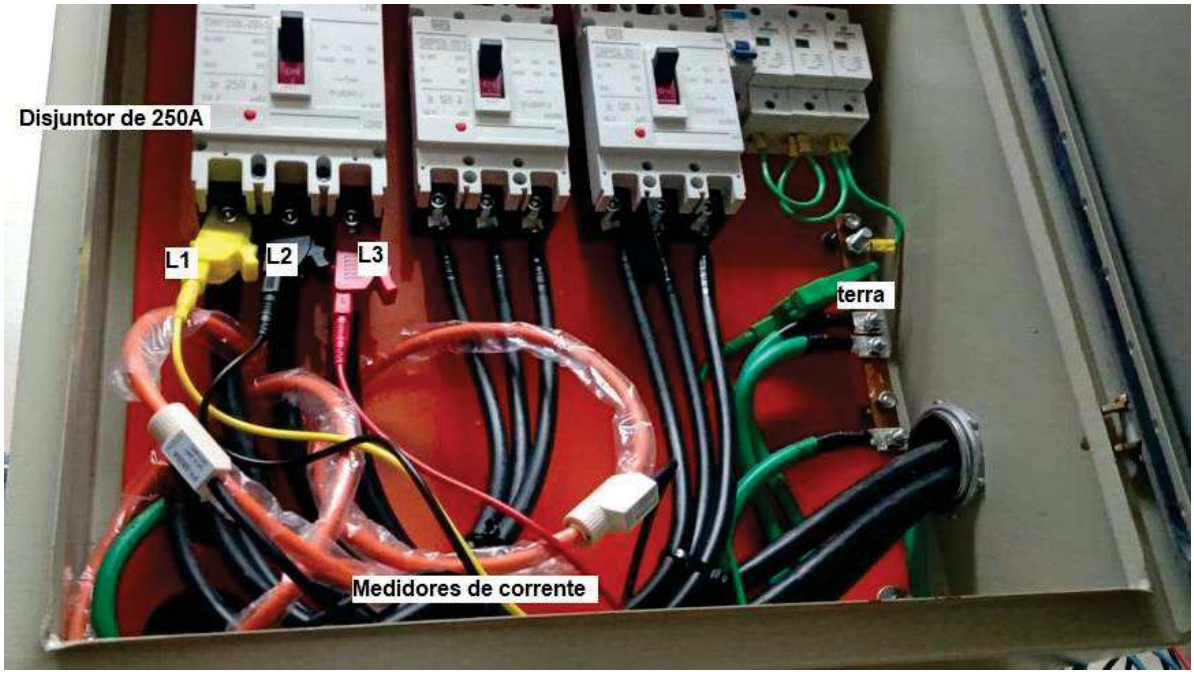
Figura 19-Ponto de Medição



Fonte: MTEC ENERGIA EIRELI EPP, 2022 (Adaptado).

No período de 22/09/2022 ao dia 29/09/2022 iniciaram-se as medições da categoria “monitoramento de qualidade de energia” que abrangeu os parâmetros de Tensão desequilibrada, Variação da Tensão em Regime Permanente, Harmônicos, Frequência e *Flicker.* A disposição das garras crocodilo medidoras de tensão e dos alicates flexíveis de correntes são mostrados na Figura 20.

Figura 20- Quadro de medição do sistema fotovoltaico



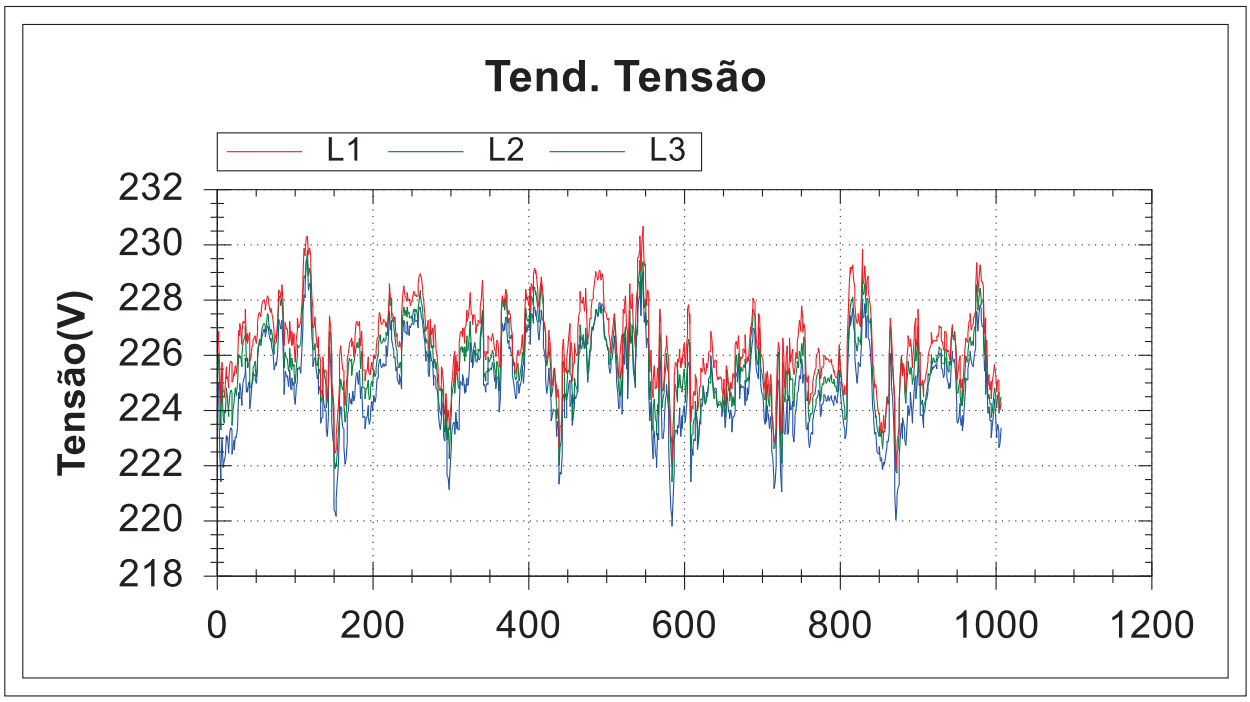
Fonte: Do Autor, 2022.

Em seguida, no período dos dias 29/09/2022 ao dia 06/10/2022 foram realizadas as medições de “Potência e Energia”. Esta função analisa os seguintes parâmetros com valores máximos, médios e mínimos: tensão e corrente RMS; frequência; Potência Ativa, Aparente, Reativa e fator de potência; desequilíbrio, tensão Harmônica até 50º harmônica; corrente harmônica até a 50° harmônica; tensão inter harmônica; corrente inter harmônica; e, energia

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados apurados a seguir, são resultado de 1008 medições na categoria variações de tensão de longa duração. Conforme a Figura 21, as faixas de tensões respeitam o critério da Tabela 1, cuja faixa de variação da tensão de leitura é 202≤TL≤231, observa-se que os valores de tensão não superaram o valor de 231 V e não ficaram abaixo do valor de 220V, ou seja, a tensão de atendimento foi classificada como adequada.

Figura 21- Tensão em Regime Permanente



Fonte: Do Autor, 2022.

Os eventos registrados pelo analisador apresentam os valores de tensões máxima e mínima encontradas em cada fase, como pode ser observado na Tabela 9.

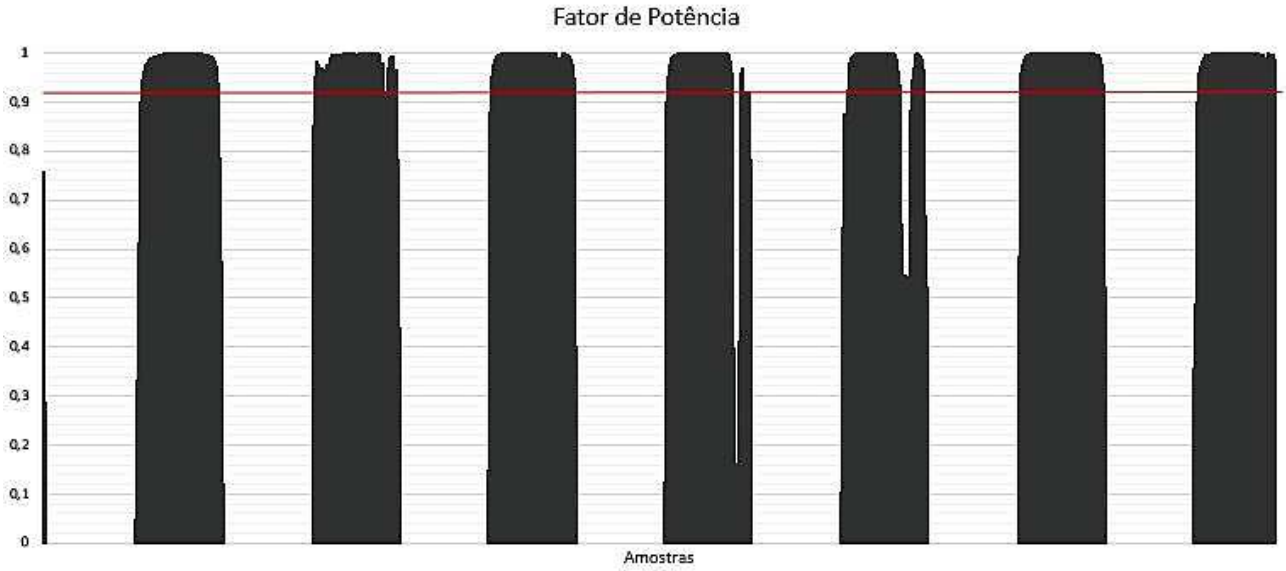
Tabela 9- Eventos de Tensão

Parâmetros	L1 (V)	L2 (V)	L3 (V)
Tensão Máxima	230,65	229,78	229,43
Tensão Mínima	221,82	221,82	219,79

O fator de potência da saída do inversor foi configurado como unitário pelos projetistas, ou seja, somente potência ativa é injetada na rede. Essa configuração

garante máxima eficiência das chaves de comutação, isso significa que com um fator de potência mais estável é necessário um menor esforço computacional e dos sensores, o que o torna uma boa opção para se inserir no sistema. Fatores de potência não unitários não são desejáveis para que não haja alteração na regulação de tensão da rede, apesar de já serem permitidas operações com outros FP, ainda são configurados como unitários para não acarretarem possíveis danos a rede e prejuízos aos consumidores-produtores (MOTTA,2018). Os valores encontrados na Figura 22, segundo medições na saída dos inversores, foram fatores de potência variáveis de acordo com a produção do sistema. Encontraram-se valores próximo a 1, atendendo as exigências do PRODIST em que os valores devem estar compreendidos entre 0,92 e 1 indutivo ou capacitivo.

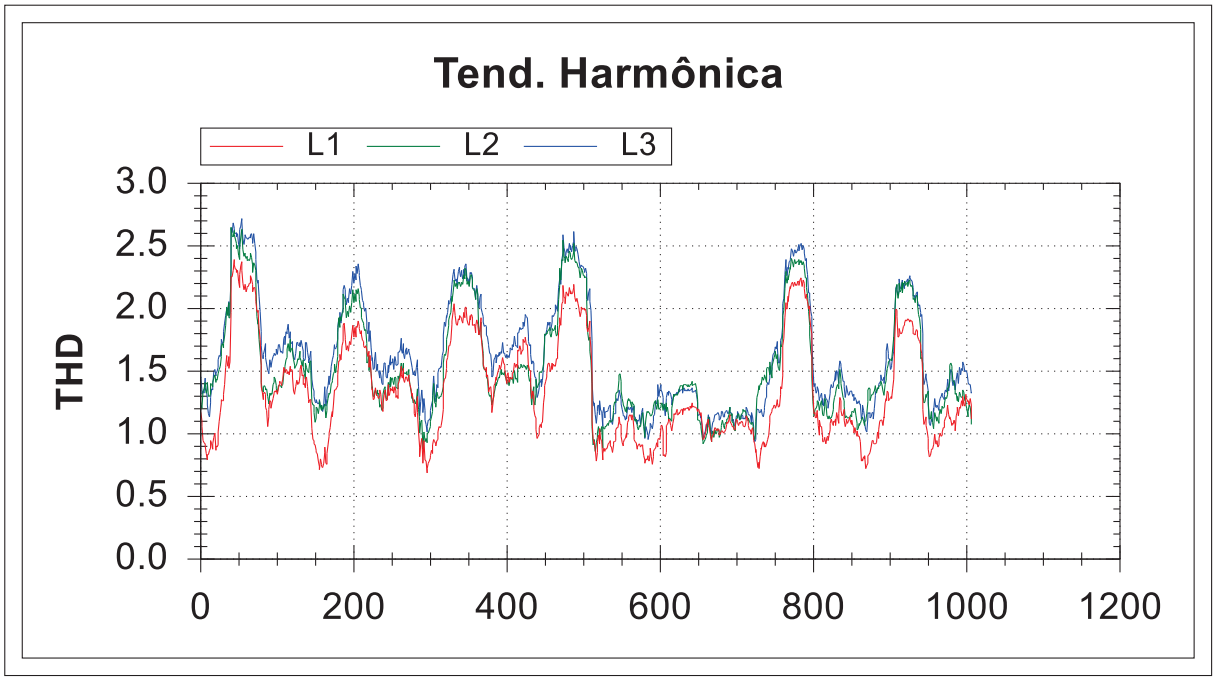
Figura 22-Fator de Potência na saída do inversor



Fonte: Do Autor, 2022

Considerando os valores da Tabela 3, que trata dos valores de desequilíbrio de tensão, o valor referencial é para tensões menores que 2,3kV, com valor de distorção harmônica total em 10%, conforme identificou-se na Figura 23, o maior valor encontrado nas medições foi de 2,7%.

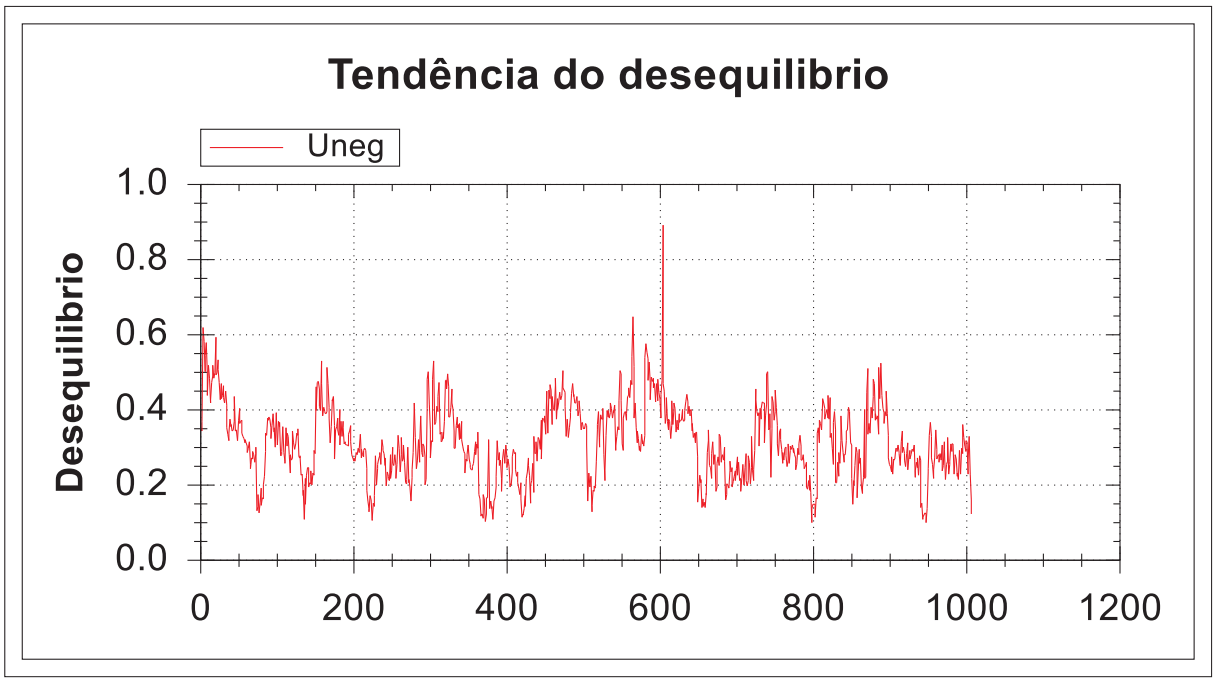
Figura 23-Tendência Harmônica



Fonte: Do Autor, 2022

Em relação a Tabela 4, cujo limite indicado para valores menores que 2,3 KV é de 3,0%, o valor de desequilíbrio apresentado não chegou a 1%, logo está dentro do limite tolerável. O gráfico de leitura traz somente a componente negativa pois o fenômeno de desequilíbrio é caracterizado por ele conforme apresentado na Figura 24.

Figura 24-Tendência do Desequilíbrio

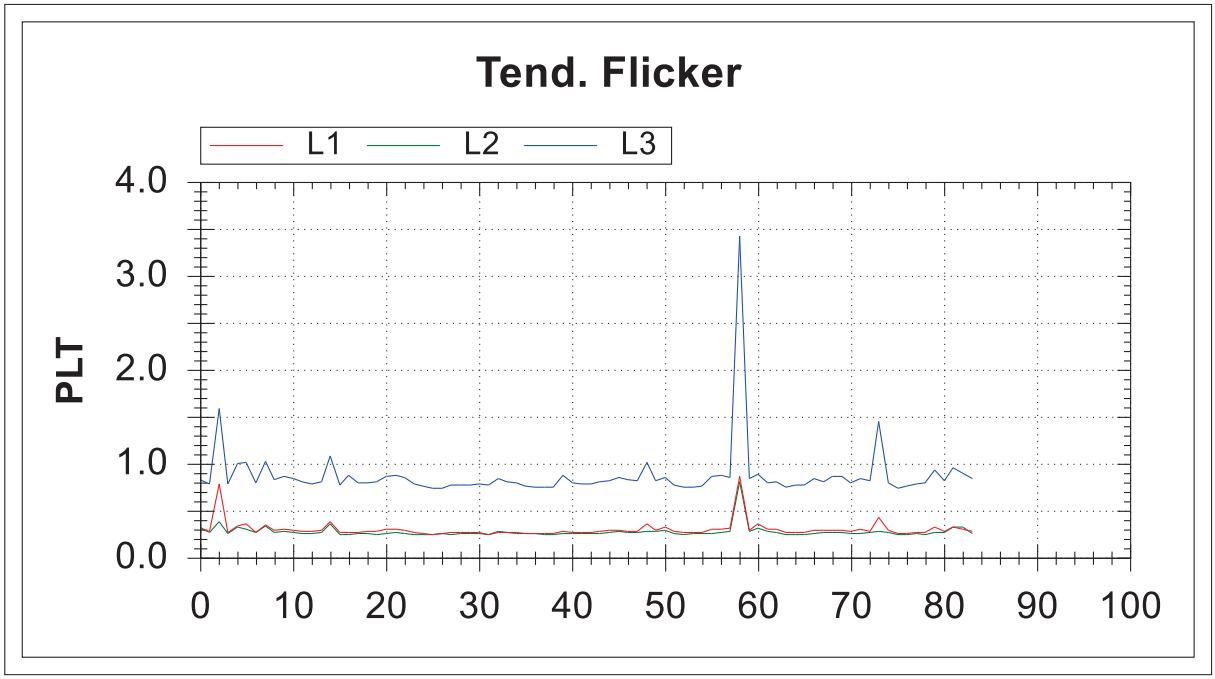


Fonte: Do Autor, 2022

Cada tensão ou corrente de fase pode ser dividida em três componentes: sequência positiva, sequência negativa e sequência zero. O componente da sequência positiva é o componente normal, tal como presente em sistemas trifásicos equilibrados. O componente da sequência negativa resulta de correntes e tensões não-balanceadas fase a fase. Este componente, por exemplo, causa um efeito de “travamento” em motores trifásicos, o que resultará em superaquecimento e redução da vida útil. Componentes de sequência zero podem aparecer em uma carga desequilibrada em sistemas de alimentação de 4 fios e representam a corrente no fio neutro. Desequilíbrio superior a 2% é considerado muito elevado (MEGABRAS,2022).

A flutuação de tensão apresentada está em relação ao fenômeno de cintilação de longa duração em que se foi analisado num período de 2 horas. Dito isso, não foi possível a verificar conforme a tabela da ANEEL por conter valores referenciais para fenômenos de curta duração. No entanto, uma severidade foi indicada pelo analisador no dia 27/09/2022 às 14:49h conforme a Tabela 10. A Figura 25 mostra a tendência do *flicker,* observa-se que a fase L3 é a que sofreu o aumento mais significativo, mas não foi possível atribuir a causa do fenômeno.

Figura 25-Tendência *Flicker*



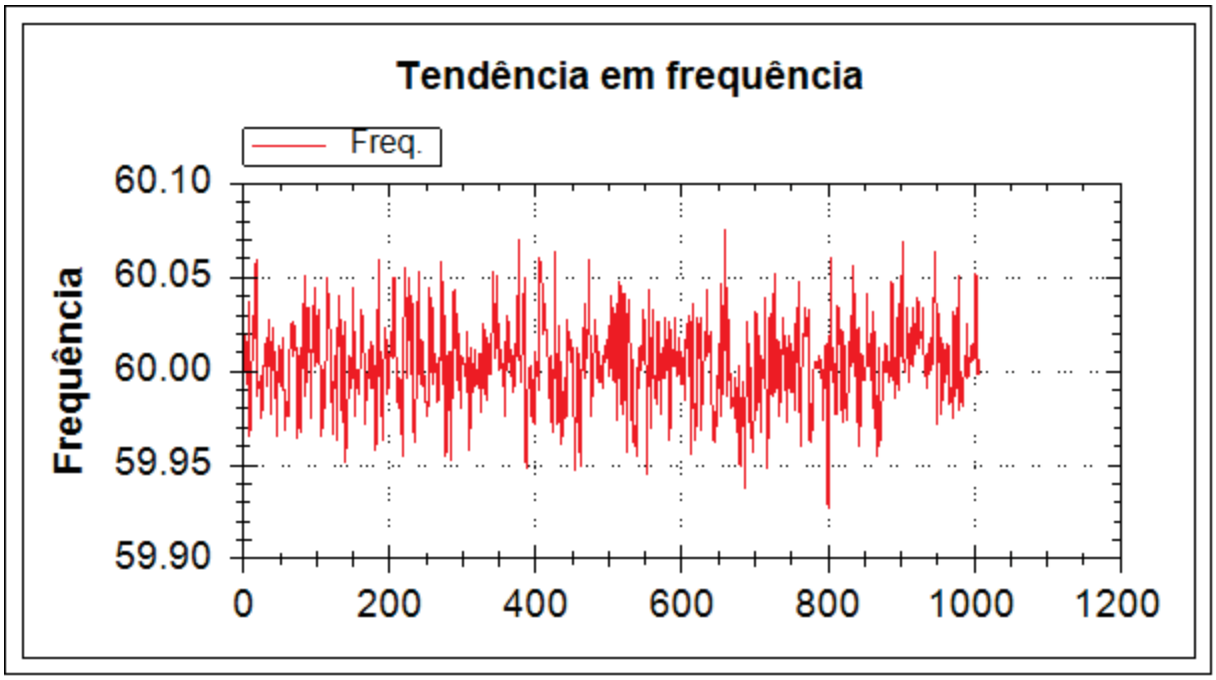
Fonte: Do Autor, 2022.

Tabela 10- Evento *Flicker*

Categoria	L1	L2	L3
Flicker	0,86 pu	0,81 pu	3,42 pu

Em relação aos resultados apresentados da frequência da Figura 26, notou-se que a frequência se comportou na faixa de operação normal entre 59,9 Hz e 60,1 Hz.

Figura 26-Tendência de Variação da Frequência



Fonte: Do autor, 2022.

Não foram encontrados fenômenos como *Dips, Swells* e Interrupção durante o período de análise.

5 CONCLUSÃO

Analisar os indicadores que expressam a qualidade de energia elétrica de uma rede ou geração local nos permite estabelecer relações para possíveis causas e efeitos que contribuem para correção ou prevenção de determinadas falhas. Diante disso, podemos verificar a confiabilidade do sistema e evitar possíveis desgastes ou perdas de equipamentos que são alimentados por essa rede.

Durante o período analisado, o sistema fotovoltaico injetou bons parâmetros de QEE, logo, o trabalho foi concluído com êxito, pois, com base nos indicadores do PRODIST e os resultados obtidos, não se fez necessário estabelecer relações para possíveis causas e efeitos que poderiam contribuir para correções ou prevenções de possíveis falhas. Portanto, foi verificado a confiabilidade do sistema fotovoltaico.

Para trabalhos futuros recomenda-se analisar a entrada da rede em simultaneidade com o sistema fotovoltaico para investigar a qualidade de energia que chega para o Campus Nepomuceno.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (Brasil). Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: infográfico absolar. Infográfico ABSOLAR. 2022. Disponível em: https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/. Acesso em: 25 de novembro de 2022.

ALDABÓ, R. Qualidade na energia elétrica. São Paulo: Artliber, 2001. 252 p. ISBN 85-88098-02-4.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica: Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA (Revisão 12) 2021.

BRASIL. ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica. Geração Distribuída: saiba mais sobre micro e minigeração distribuída. Saiba mais sobre micro e minigeração distribuída. 2022.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética - Epe. Ministério de Minas e Energia (org.). Matriz Energética e Elétrica.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética - Epe. Ministério de Minas e Energia (org.). Balanço Energético Nacional (BEN): relatório síntese 2021/ ano base 2020. Relatório Síntese 2021/ ano base 2020.

BELISKI, Letícia Mara. Análise da qualidade de energia elétrica de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída em unidades prossumidoras residenciais. 2017. 46f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, SC, 2017

BORTOLOTO, Valter A. et al. Geração de Energia Solar On Grid e Off Grid. In: VI JORNACITEC -Jornada Científica e Tecnológica. 2017.

CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Energia Solar: Princípios e Aplicações. Disponível em: Acesso em: out. 2022.

DECKMANN, Sigmar Maurer; POMILIO, José Antenor. Avaliação da qualidade da energia elétrica.2017.

DE OLIVEIRA BARBOSA, Claudomiro Fábio et al. CONCEITOS SOBRE SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGIA PARA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE.2016.

DIONISIO, Guilherme; SPALDING, Luiz Eduardo Schardong. Visualização da forma de onda e conteúdo harmônico da corrente elétrica alternada em eletrodomésticos. Revista Brasileira de Ensino de Física, [S.L.], v. 39, n. 1, 22 set. 2016. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2016-0121.

DUGAN, Roger C. et al. Electric power systems quality. 2004.

GUIMARÃES, Professor Pablo. Como resolver problemas com Desequilíbrio de Tensão. 2020. Disponível em: https://www.pabloguimaraes-professor.com.br/post/como-resolver-problemas-com-desequilibrio-de-tensao. Acesso em: 07 jul. 2022.

GESTAL (São Paulo). Qualidade de Energia PRODIST. Disponível em: https://www.gestal.com/produtos/qualidade-de-energia-prodist#:~:text=A%20qualidade%20do%20produto%20engloba,a%20serem%20observados%20pelo%20Operador. Acesso em: 04 jul. 2022.

HANZELKA, Z.; BIEN, A. Guia de aplicação de qualidade de energia. Disturbios de tensão: cintilamento. 2006.

IBERDROLA. Energia elétrica por hibridização: quando a união das energias renováveis faz a força. Online. [*S. l.*], 22 nov. 2022. Disponível em: https://www.iberdrola.com/inovacao/energia-hibrida. Acesso em: 1 nov. 2022.

KOIZUMI, Marcos Tsuyoshi. DESENVOLVIMENTO DE SENSORES E INSTRUMENTAÇÃO APLICADOS NO PROJETO DE EQUIPAMENTOS ANALISADORES DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA. 2012. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

MATOS, D. M. B.; CATALÃO, J. P. S. Geração distribuída e os seus impactes no funcionamento da rede elétrica: Parte 2. Potência, v. 1, n. 2, p. 3, 2013.

MEGABRAS. MAR722, analisador de energia trifásico: manual do usuário. São Paulo: Megabras, 2017. 58 p.

MERKLE, Anne. ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA. 2018. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro Universitário Unifacvest, Lages, 2018.

MOTTA, Lúcio José da *et al*. Análise do fator de potência em edifício com sistema fotovoltaico. Fotovolt, São Paulo, p. 1-1, jan. 2018.

MOTA, Vítor Augusto de Souza. A energia solar fotovoltaica distribuída como alternativa para a crise energética nacional: modelo de expansão acelerada através de subsídios economicamente justificados. 2015. xviii, 175 f., il. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) -Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

MTEC ENERGIA. Projeto Executivo: microgeração distribuída energia solar. Nepomuceno: MTEC Energia, 08 out. 2020. [proprietário CEFET-MG]

OLIVEIRA, J. C. Qualidade da energia elétrica: definição e análise dos itens de Qualidade. Cap. II, Universidade Federal de Uberlândia, Centro de Ciências Exatas

e Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Grupo de Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica, 2000.

PAULILO, Gilson. Atitude Editorial. Desequilíbrio de Tensão. O Setor Elétrico, S.I., v. 86, n. 3, p. 48-42, mar. 2013. Mensal.

PAULILO, Gilson. Atitude Editorial. Flutuações de Tensão. O Setor Elétrico, S.I., v. 90, n. 7, p. 48-42, set. 2013. Mensal

POMILIO, José Antenor. Pré-reguladores de Fator de Potência. Publicação FEE, v. 3, p. 95, 2007.

PRIEB, César Wilhelm Massen. Desenvolvimento de um sistema de ensaio de módulos fotovoltaicos. 2002

PUFAL R. A. Modelagem de cargas não lineares e rede de energia elétrica para simulação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SOLAR POWER (Brussels). Global Market Outlook: 2022-2026. 2022-2026. 2022. Disponível em: https://api.solarpowereurope.org/uploads/Solar_Power_Europe_Global_Market_Outlook_for_Solar_Power_2022_2026_V01_b720ac6c3c.pdf. Acesso em: 24 maio 2022.

SANTANA, M. W. Agrupamento incremental de fluxo de dados para análise e monitoramento da qualidade de energia. 2017. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Controle e Automação) -Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

TUDO O QUE VOCÊ PRECISA SABER SOBRE O PRODIST. 2021. Energês. Disponível em: https://energes.com.br/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-prodist/. Acesso em: 25 maio 2022.

Xavier, P.A. (2005). “Avaliação das Características Elétricas de Reatores Eletrônicos Utilizados em Lâmpadas Fluorescentes Tubulares” Dissertação- Universidade de Brasília, Brasília.

RELATÓRIO FINAL DE CURSO Nº 13/2025 - CEENP (11.51.21)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 09/04/2025 18:07)
MARCIO WLADIMIR SANTANA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
CTETTNP (11.50.36)
Matrícula: ###520#9

Visualize o documento original em https://sig.cefetmg.br/documentos/ informando seu número: ***13****, ano:* ***2025****, tipo:* ***RELATÓRIO FINAL DE CURSO****, data de emissão:* ***09/04/2025*** *e o código de verificação:* ***9902b858ef***