

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA ELÉTRICA
ADRIANO NEGIO DE ARAÚJO

QUALIDADE DA ENERGIA NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA

Varginha

2018

ADRIANO NEGIO DE ARAÚJO

QUALIDADE DA ENERGIA NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS – MG como pré-requisito para obtenção de grau de bacharel sob a orientação do Prof. Esp. Adilson Amaro da Silva, Co orientação do Eng. Igor Nogueira, e Co orientação do Eng. Jaderson Nogueira.

Varginha

2018

ADRIANO NEGIO DE ARAÚJO

QUALIDADE DA ENERGIA NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela banca examinadora composta pelos membros.

Aprovado em / /

Prof. Esp. Adilson Amaro da Silva

Prof. Esp. Hugo Rodrigues Vieira

Eng. Vinicius Lopes

OBS.:

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades, por minha vida, família e amigos, e permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitário, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer. À Instituição pelo ambiente criativo e amigável que proporciona.

Ao grupo UNIS, pela oportunidade de fazer o curso, seu corpo docente, direção, administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, com grande confiança no mérito e ética aqui presentes.

Ao professor Adilson, pela orientação, apoio e confiança, ao empenho dedicado à elaboração deste trabalho.

Agradeço a todos os professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender. A palavra mestre, nunca fará justiça aos professores dedicados aos quais sem nominar terão os meus eternos agradecimentos.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Ao meu pai que apesar de todas as dificuldades me fortaleceu, no caminho até chegar a este momento. Obrigado ao meu irmão, que nos momentos de minha ausência

dedicada ao estudo superior, sempre fizeram entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente!

Meus agradecimentos aos amigos Jaderson Nogueira, Igor Nogueira, Marcio Moreira, Ronam Amaral e Matheus Mira, entre outros companheiros de trabalhos e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida com certeza.

“Livres-pensadores são aqueles que estão dispostos a usar suas mentes sem prejuízo e sem receio de entender as coisas que se chocam com seus próprios costumes, privilégios ou crenças. Este estado de espírito não é comum, mas é essencial para pensar direito.”

Leon Toltói

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo fazer uma avaliação do comportamento da eletricidade numa fonte de geração distribuída fotovoltaica, através de medições com equipamento de qualidade de energia. Justifica-se pelo fato de que esta geração distribuída está localizada numa região rural onde não há monitoramento destes equipamentos, por exemplo via internet, podendo estar havendo perdas a produção de eletricidade através da geração fotovoltaica, causando prejuízos ao proprietário, e também a monitoramento da rede da concessionária, verificando se os parâmetro de qualidade da energia são respeitados no ponto de conexão da propriedade rural. Logo depois de realizada a pesquisa bibliográfica e estudo de caso, aplicou-se os critérios das normas vigentes para avaliação dos resultados. O local de estudo de análise é numa propriedade rural, situado próximo a Caxambu no estado de Minas Gerais. Após realizar a avaliação dos resultados através de gráficos gerados pelos dados coletados, verifica-se que houve variação do sistema pertinente ao funcionamento do inversor fotovoltaico, no fator de potência, e conteúdos harmônicos. Assim, concluiu-se que existe uma importância grande na monitoração dos parâmetros elétricos, para que não haja perdas financeiras ao cliente, podendo afetar equipamentos, injetando ruídos na rede.

Palavras-chave: Qualidade da energia elétrica. Geração distribuída. Sistema de geração fotovoltaico.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the behavior of electricity in a photovoltaic distributed generation source through measurements with energy quality equipment. It is justified by the fact that this distributed generation is located in a rural region where there is no monitoring of these equipments, for example via internet, being able to be losses the electricity production through the photovoltaic generation, causing damages to the owner, as well as the monitoring of the network of the concessionaire, verifying if the parameters of quality of the energy are respected in the point of connection of the rural property. Soon after the bibliographical research and case study, the criteria of the current norms for evaluating the results were applied. The analysis study site is in a rural property, located near Caxambu in the state of Minas Gerais. After performing the evaluation of the results through graphs generated by the collected data, it is verified that it hears variation of the system pertinent to the operation of the investor photovoltaic, power factor, and harmonic contents. Thus, it was concluded that there is a great importance in the monitoring of the electrical parameters, so that there are no financial losses to the client, which can affect equipment, injecting noise into the network.

Keywords: *Quality of electrical energy, Distributed generation, Photovoltaic generation system.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de potência instalada em kW.....	3
Figura 2 - Gráfico das unidades consumidoras com geração distribuída.	4
Figura 3 - Estrutura da célula.	6
Figura 4 - Célula, módulo e arranjo fotovoltaico.....	7
Figura 5 - Camadas do painel fotovoltaico.	8
Figura 6 - Painel monocristalino.....	9
Figura 7 - Painel policristalino.....	9
Figura 8 - Painel filmes finos silício amorfo.....	10
Figura 9 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.	10
Figura 10 - Sistema de proteção.....	12
Figura 11 - Classificação dos inversores por princípio de operação.....	14
Figura 12 - Sistema do inversor trifásico tipo fonte de tensão.....	15
Figura 13 - Inversor do tipo de fonte de corrente.....	15
Figura 14 - Triângulo de potências	17
Figura 15 - Transitório impulsivo.	21
Figura 16 - Indução eletromagnética.....	21
Figura 17 - Transitório Oscilatório.	22
Figura 18 - Afundamento de tensão.	23
Figura 19 - Elevação de tensão	24
Figura 20 - Representação de interrupção momentânea	25
Figura 21 - Recorte.....	27
Figura 22 - Relação fator de potência x seção nominal do condutor.....	29
Figura 23 - Forma de onda distorcida pela superposição da fundamental e terceira harmônica.	30
Figura 24 - Tabela da ordem e frequência de harmônicas	30
Figura 25 - Conjunto de Inversores Fronius.	32
Figura 26 - Tabela de características dos módulos Canadian solar.	32
Figura 27 - Disposição dos painéis fotovoltaicos.	33
Figura 28 - Analisador de qualidade de energia ION 7650.	34
Figura 29 - Ponto de conexão dos sistemas de medição.	34
Figura 31 - Gráfico do comportamento da tensão de 22/05 a 28/05.....	36
Figura 32 - Gráfico do comportamento da tensão de 29/05 a 04/06.....	37
Figura 33 - Gráfico da tensão no dia 22/05 das 06:00 às 21:45 hs.	37
Figura 34 - Gráfico da tensão no dia 03/06 das 06:00 às 20:00 hs.	38
Figura 35 - Tabela Tensão em Regime Permanente - tensões de igual ou superior a 1 kV (254/127).....	38
Figura 36 - Gráfico da corrente fase A dia 22/05.	39
Figura 37 - Gráfico da corrente fase B dia 22/05.....	39
Figura 38 - Gráfico da corrente fase A de 22/05 a 28/05.....	40
Figura 39 - Gráfico da corrente fase B de 22/05 a 28/05.....	40
Figura 40 - Gráfico da corrente fase A de 29/05 a 04/06.....	41
Figura 41 - Gráfico da corrente fase B de 29/05 a 04/06.....	41

Figura 42 - Gráfico da variação do FP dia 28/05 das 05:00 às 20:30 hs.	42
Figura 43 - Gráfico do FP do período de análise, de 22/05 a 04/06.	42
Figura 44 - Gráfico da variação da frequência de 22/05 a 04/06.	43
Figura 45 - Tabela de Indicadores THD de tensão em porcentagem.	43
Figura 46 - Gráfico de variação de THD da tensão.	44
Figura 47 - Gráfico de variação da THD de tensão no dia 26/05.	44
Figura 48 - Gráfico de THD de corrente no dia 26/05.	45
Figura 49 - Gráfico de THD de tensão e corrente, do dia 26/05.	45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	3
3 COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	6
3.1 Módulos fotovoltaicos	6
3.1.1 Tipos de tecnologias.....	8
3.1.2 Curva elétrica característica	10
3.2 Inversores	11
3.3 Sistemas de proteção	11
4 INVERSORES	13
4.1 Inversores eletrônicos de potência	13
4.2 Modo de comutação de inversores	13
5 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	16
6 DISTURBIOS DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	20
6.1 Transitórios ou transientes	20
6.2 Transitório impulsivo	20
6.3 Transitório oscilatório	21
6.4 Variação de tensão de curta duração	22
6.4.1 Afundamento de tensão de curta duração (<i>sag</i>).....	22
6.4.2 Elevação de tensão de curta duração (<i>swell</i>)	23
6.5 Variação de tensão de longa duração	24
6.6 Interrupção	24
6.6.1 Interrupção momentânea.....	25
6.6.2 Interrupção temporária.....	25
6.6.3 Interrupções sustentadas.....	26
6.7 Ruído	26
6.8 Flicker	26
6.9 Notching	27
6.10 Variação de frequência	27
6.11 Desequilíbrio de tensão	28
6.12 Redução do fator de potência	28
6.13 Harmônicos	29
6.14 Inter – harmônicos	31
7 METODOLOGIA	32
7.1 Característica da carga	35
8 RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
8.1 Variação da tensão	36
8.2 Variação de corrente	38
8.3 Fator de potência	41
8.4 Variação da frequência	42

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda por energia elétrica, tanto por parte da indústria como de pequenos consumidores, a busca por fontes alternativas para atender a essa demanda, tanto no Brasil quanto no mundo também tem aumentado.

Atualmente, o sol tem sido uma fonte bastante explorada, pois além de permitir seu uso como fonte de calor, também é utilizado para a geração de eletricidade através da tecnologia fotovoltaica, que emprega o uso de placas de silício.

No Brasil, o emprego de sistemas fotovoltaicos, especialmente os que são conectados à rede da concessionária (*on-grid*) tem crescido consideravelmente, abrangendo tanto nas cidades quanto em propriedades rurais.

Atualmente são 282,2 MW instalados em todo o Brasil, sendo Minas Gerais o estado com maior número de usinas conectados ao sistema elétrico sendo 6.226 empreendimentos, com potência instalada de 99,6 MW (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

Observando a importância da geração distribuída no sistema elétrico brasileiro, visando possíveis impactos na energia elétrica onde o sistema fotovoltaico está conectado, especialmente em áreas distantes dos grandes centros, como é o caso de zonas rurais onde não há monitoramento da usina solar fotovoltaica, propõe-se uma avaliação dos impactos da qualidade de energia, caso existam, num sistema de geração distribuída, instalada em uma propriedade rural.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o comportamento da rede da concessionária perante ao acoplamento de uma geração distribuída, fornecendo eletricidade através de uma usina solar fotovoltaica, onde não há monitoramentos dos equipamentos da usina. Através dos critérios do PRODIST em seu módulo 8, que visa a qualidade da energia, tanto no âmbito do produto e do serviço, o trabalho visa principalmente os parâmetros da qualidade do produto, avaliando o fornecimento da eletricidade local, como principais pontos de avaliação a tensão, fator de potência e harmônicos, onde está o ponto de conexão da geração distribuída. Outro ponto do trabalho é verificar se há impactos negativos ou positivos gerados pelos equipamentos da geração distribuída a rede elétrica.

A qualidade de energia elétrica, visa um melhor atendimento dos clientes, trazendo uma série de parâmetros importantes para serem avaliados, como fator de potência, tensão e corrente, além dos fatores de fornecimento, sendo avaliadas através dos valores fornecido pelo Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST),

através do módulo 8, tanto a qualidade do produto e do serviço. Qualidade do produto visa os parâmetros elétricos, como valores de variações permitidos, que não vão afetar os equipamentos dos consumidores, e a qualidade do serviço visando o fornecimento da eletricidade, para os consumidores.

O escopo deste trabalho está dividido em 9 capítulos. Começando pela introdução. No capítulo 2 retoma sobre a geração distribuída abordando as normas vigentes, e informações sobre o número de conexões. O capítulo 3 apresenta os componentes do sistema fotovoltaico, abordando alguns dos seus parâmetros. O capítulo 4 traz informações sobre o inversor fotovoltaico, onde tratam de seus parâmetros elétricos, e formas de modulação da energia solar. No capítulo 5 vem com informações da qualidade da energia elétrica, onde se destacam os parâmetros do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional (PRODIST). No capítulo 6 visa algumas informações sobre distúrbios que podem afetar a eletricidade, causando prejuízos aos clientes das concessionárias. No capítulo 7 explica a metodologia de captação de dados através do equipamento de qualidade de energia elétrica, o período de coletas de dados, e o local onde foi instalado. No capítulo 8 traz os dados coletados e as discussões perante as análises dos resultados. No capítulo 9 vem com as considerações finais do trabalho informando o laudo da avaliação dos resultados das análises.

2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

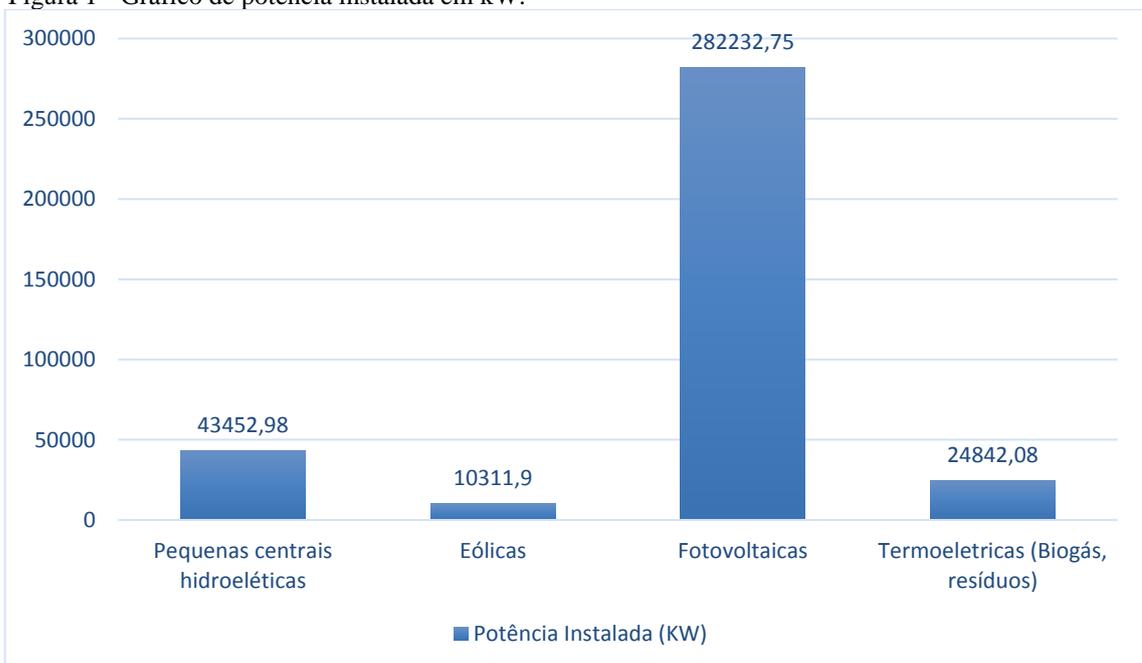
A Geração Distribuída (GD) tem se apresentado como uma alternativa ao atual modelo de planejamento da expansão do sistema energético brasileiro, pois otimiza o uso de recursos energéticos, econômico-financeiro e ambientais.

A partir de 2012, através da Resolução Normativa (RN) 482 foi autorizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a geração de energia elétrica por consumidores residenciais e permitida a conexão da fonte geradora ao sistema elétrico da concessionária e a inserção do excedente de potência gerada permitindo sua troca por créditos financeiros nas contas de energia seguintes ao mês de geração.

O governo, através do decreto n 5.163/2004, define a GD, no seu artigo 14, sendo a produção de energia elétrica proveniente de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, que estão diretamente conectados ao sistema elétrico de distribuição do comprador (BRASIL, 2004).

O Brasil, atualmente, considerando-se os diversos tipos de energia renováveis, possui uma capacidade instalada de 360,8 MW, sendo que a mais utilizada pelos consumidores é a energia fotovoltaica, com 282,2 MW, como mostra na figura 1 a seguir (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

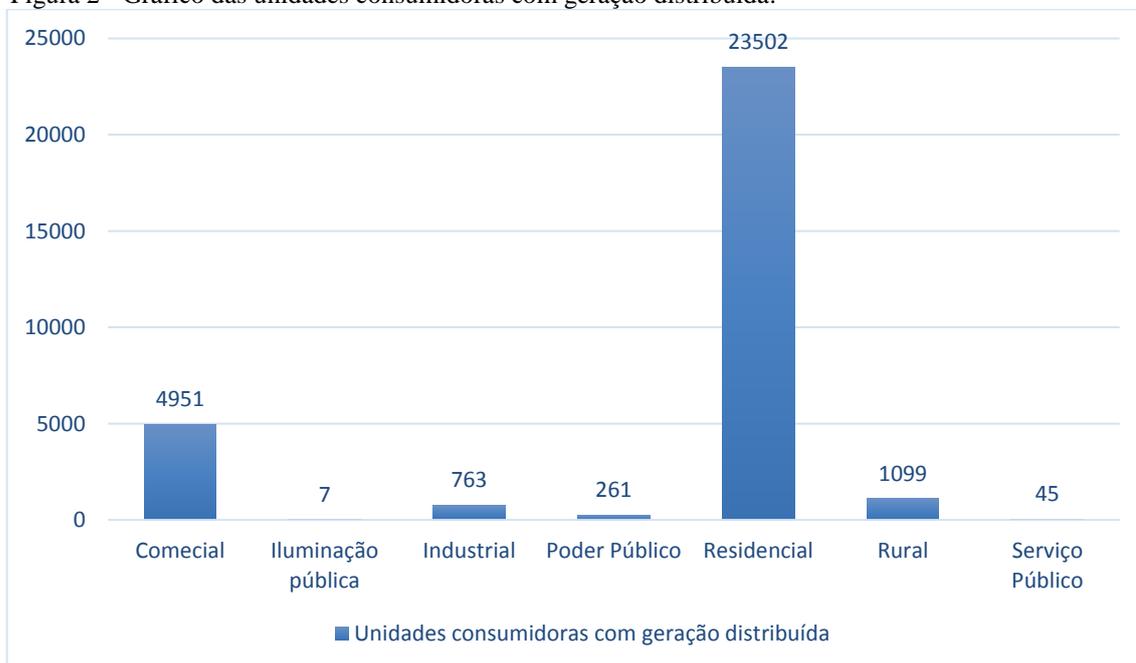
Figura 1 - Gráfico de potência instalada em kW.



Fonte: Adaptado de (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

Unidades consumidoras com geração distribuída instalada, estão concentradas em residências, que são responsáveis pela maior parte das instalações elétricas existentes no Brasil, como mostra a figura 2 a seguir (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018):

Figura 2 - Gráfico das unidades consumidoras com geração distribuída.



Fonte: Adaptado de (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

Em 2012, a ANEEL, criou a RN 482, trazendo normas que estabelecem a geração distribuída de energia renováveis, e em 2015, através de uma reforma desta resolução, lança a RN 687, para facilitar a inserção dos clientes a modalidade de geração distribuída (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012).

Algumas das principais mudanças da RN 482/2012, por meio da RN 687/2015, apresenta, quanto à classificação das potências instaladas pelos consumidores buscando maior crescimento da GD, as quais se destacam (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015):

- a) Micro geração distribuída - carga instalada até 75 kW;
- b) Mini geração distribuída - $> 75 \text{ kW} \leq 5 \text{ MW}$ para fotovoltaica e $\leq 3 \text{ MW}$ para hídrica;
- c) Redução do prazo de conexão para 34 dias, que antes era de 84 dias;
- d) Geração em condomínios com porcentagem definidas;
- e) Geração compartilhada (consórcios ou cooperativas).

Outra mudança importante é o prazo do sistema de compensação, que antes era de 36 meses, passando a ser 60 meses, na RN 687/2015 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015).

Para regulamentação da geração *off grid* (do inglês, isolada da rede), ou seja, sistemas que utilizam banco de baterias para armazenar a energia gerada, a ANEEL traz através da RN 493/2012, duas modalidades de fornecimento, sendo uma delas o Microsistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica – MIGDI, onde tem se mais de uma unidade consumidora, e o Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente – SIGFI, onde o usuário produz somente para o local aonde vai ser consumido (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012).

3 COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

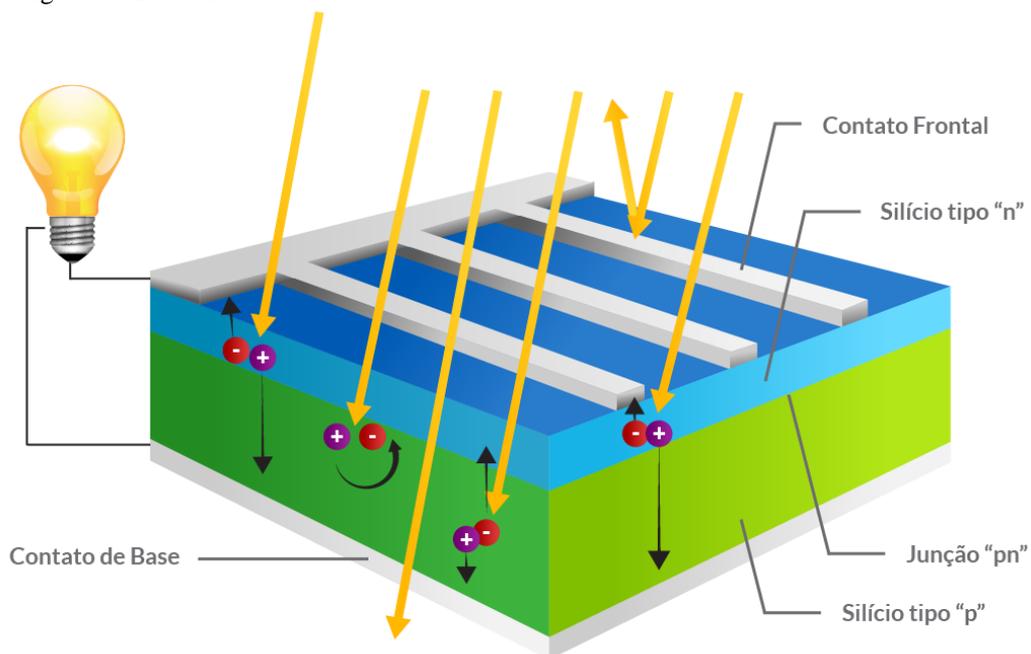
O sistema fotovoltaico é composto por diversos componentes, sendo que os principais são os módulos fotovoltaicos e inversores. Diversas tecnologias estão disponíveis para estes equipamentos, mas o principal componente para conversão da luz solar em eletricidade está no módulo fotovoltaico, composto por várias células fotovoltaicas, fabricadas com material semicondutor.

3.1 Módulos fotovoltaicos

A célula fotovoltaica é um dispositivo que transforma a radiação solar em energia elétrica. Isto se deve ao efeito fotovoltaico que permite à célula constituída de silício, ao ser incidida pela radiação do sol, conduzir corrente elétrica. Para tal, a célula fotovoltaica funciona de maneira similar a um diodo semicondutor com junção positiva/negativa - PN (PINHO; GALDINO, 2014).

A figura 3 demonstra como é constituído uma célula fotovoltaica em sua estrutura:

Figura 3 - Estrutura da célula.



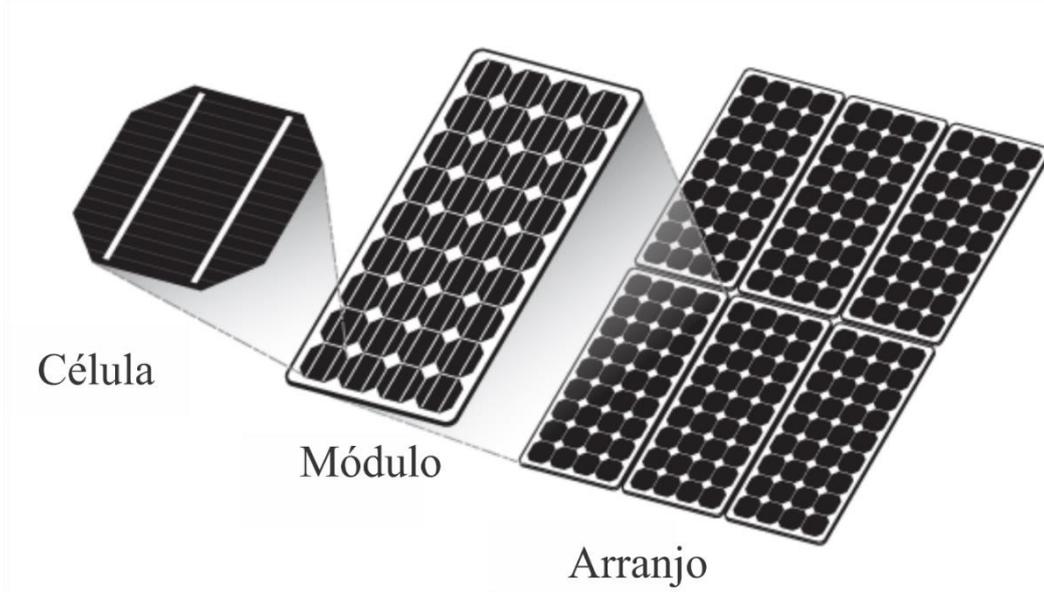
Fonte: (BLUESOL, 2017).

O silício na forma pura é um material tetravalente. Para que exista uma geração de eletricidade é feita a dopagem do material adicionando-se impurezas na região N do silício,

como por exemplo, o fósforo, que possui átomos com cinco elétrons na camada de valência, aumentando-se, assim, sua concentração. A dopagem também é feita na região P do silício, onde é adicionado um elemento de três elétrons na camada de valência (boro por exemplo), essa região fica com uma concentração maior de lacunas do que elétrons. Ao realizar tal operação, o material fica em desequilíbrio, até se rearranje devido ao seu campo elétrico, este é o responsável por separar os pares de elétrons e lacunas que serão produzidas através da absorção da energia dos fótons da luz sob a célula. Após a dopagem do material é necessário fazer o manejo para gerar tensão e corrente de maneira significativa, isso implica fazer associações eletricamente entre si, e encapsulá-las em um único bloco, chamado de módulo fotovoltaico (PINHO; GALDINO, 2014).

A figura 4 demonstra o conjunto fotovoltaica destacando a célula, módulo e arranjo fotovoltaico:

Figura 4 - Célula, módulo e arranjo fotovoltaico.



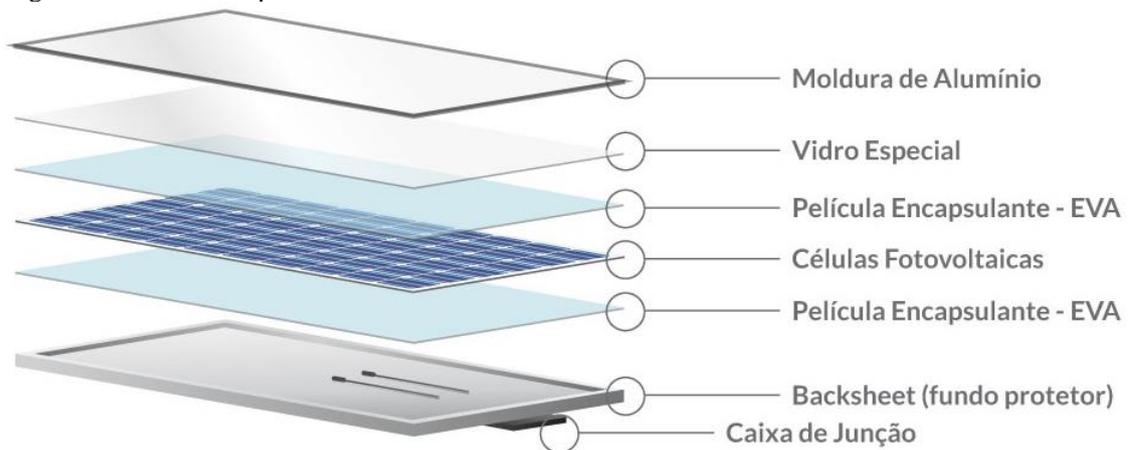
Fonte: (SAMLEX SOLAR, 2017).

Os módulos são classificados no mercado de acordo à sua potência-pico (Wp), e ao tipo de célula. Estes são compostos por células conectadas em arranjos. Estes arranjos são combinados de maneira a gerar certa quantidade de eletricidade, geralmente em torno de 30 a 42 Vcc, para esta tensão são alocadas de 60 a 72 células. A composição dos módulos é dada por: vidro temperado, moldura de alumínio, encapsulante (EVA), célula fotovoltaica, *backsheet* (folha inferior), caixa de junção onde se encontra o diodo de *by-pass* (diodo de desvio). Comercialmente os módulos fotovoltaicos são fabricados em células de semicondutor de silício

policristalino. Estes são utilizados para captar o máximo possível de irradiância solar, sendo assim uma parte crucial do sistema. A instalação do módulo, requer muita atenção, quanto as possíveis interferências, tais como sujeidade ou sombreamento, pois qualquer uma destas interferências, pode afetar seu desempenho (PINHO; GALDINO, 2014).

Na figura 5 é detalhado a composição do painel fotovoltaico, com suas camadas em destaque:

Figura 5 - Camadas do painel fotovoltaico.



Fonte: (BLUESOL, 2018).

3.1.1 Tipos de tecnologias

Existem no mercado três tecnologias mais conhecidas para construção das células fotovoltaicas sendo: silício cristalino dividido em monocristalino e policristalino, e também as de células de filmes finos. As células monocristalinas são feitas de maneira similar aos componentes de silício utilizados na microeletrônica. Estas células são divididas em um único material, um cristal grande. Devido a pureza do material, este sistema garante alta confiabilidade e alta eficiência. Teoricamente, a conversão de luz solar em eletricidade está em torno de 27%. No mercado a eficiência encontrada fica em torno de 12% a 16% (PINHO; GALDINO, 2014).

A seguir a figura 6 apresenta um painel de célula monocristalina:

Figura 6 - Painel monocristalino.



Fonte: (SOLAR BLVD, 2018).

Existem também as chamadas células policristalinas que são fabricadas do mesmo material da célula monocristalina, mas ao invés de um único e grande material, é formada por vários cristais pequenos juntos, formando um único bloco. Estes cristais juntos diminuem um pouco a eficiência das células. Mas, no entanto, o custo de fabricação deste material é relativamente muito menor do que a célula pura monocristalina (PINHO; GALDINO, 2014).

A seguir, pela figura 7, apresenta-se um modelo de painel policristalino:

Figura 7 - Painel policristalino.



Fonte: (UNIVERSOLAR, 2018).

Filmes finos são feitos geralmente de silício amorfo, estes filmes têm potencial para serem produzidos em grande escala devido ao custo relativamente baixo, mas este material ainda não traz a confiabilidade do silício cristalino (PINHO; GALDINO, 2014).

Na figura 8 e um exemplo do painel de filme finos de silício amorfo:

Figura 8 - Painel filmes finos silício amorfo.



Fonte: (SHENZHEN, 2018).

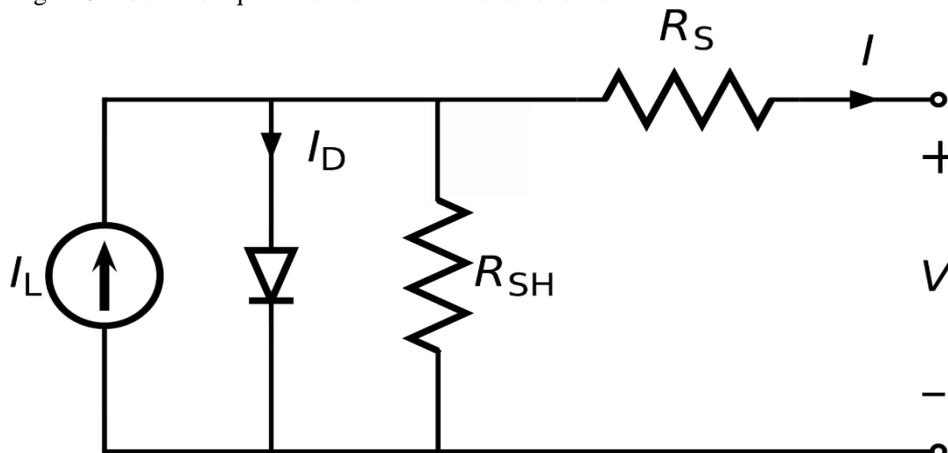
3.1.2 Curva elétrica característica

A célula fotovoltaica pode ser caracterizada pela curva I-V que representa a variação da corrente I com a tensão em seus terminais V .

Quando exposto à radiação solar, o gerador irá gerar em seus terminais corrente e tensão. Se o gerador não estiver conectado a nenhuma carga em seus terminais é possível medir a tensão de circuito aberto (V_{oc}), e se a carga estiver conectada ao gerador haverá uma corrente circulando pelo sistema que pode ser representada pelo circuito (PINHO; GALDINO, 2014).

Há figura 7, traz o circuito equivalente de uma célula fotovoltaica:

Figura 9 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.



Fonte: (ELETRICAL ENGINEERING, 2017).

3.2 Inversores

Os inversores são responsáveis por converter energia CC (corrente contínua), em AC (corrente alternada) (PINHO; GALDINO, 2014).

De acordo com a ABNT, através da NBR 16.149 (BRASIL, 2013), define os requisitos de qualidade da energia elétrica que o inversor deverá identificar. São eles: tensão; frequência; cintilação; distorção harmônica; e fator de potência.

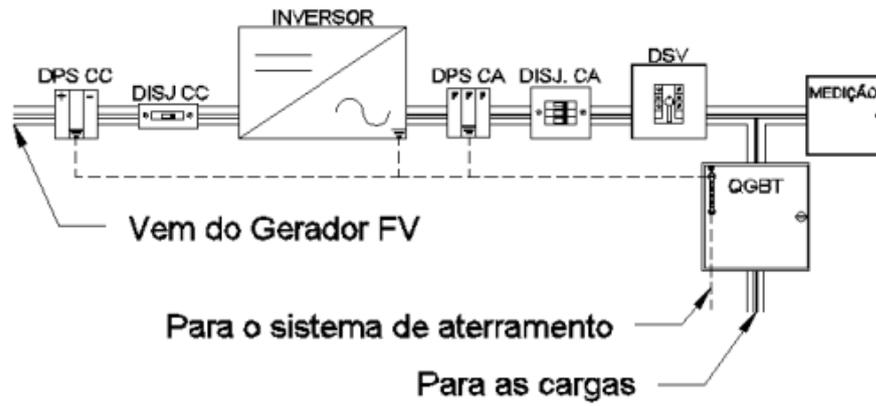
O inversor para sistemas conectados à rede deve ser capaz de identificar desvios dos requisitos e em seguida efetuar a desconexão da usina solar fotovoltaica (USFV). A tensão e frequência dos inversores devem ser compatíveis com os valores da rede elétrica local, contidos no PRODIST em seu módulo 8 que trata da qualidade de energia. Os inversores são programados para trabalhar com os parâmetros da rede da concessionária local, utilizando tensão e frequência. Havendo qualquer situação de alteração dos parâmetros especificados interrompe a conexão do sistema de geração fotovoltaico com a rede da concessionária evitando avarias no sistema local (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

3.3 Sistemas de proteção

A forma de proteger o sistema fotovoltaico de possíveis intemperes, e instalando um bom sistema de proteção, a ANEEL exige, como padrão técnico, a instalação de uma chave seccionadora sob a carga DSV (dispositivo de seccionamento visível), como forma de manobra no caso de precisão de desconexão da geração fotovoltaica durante o procedimento de manutenção da rede. O sistema de proteção contra descargas atmosféricas deve estar protegendo a área onde o gerador fotovoltaico está instalado e a estrutura de abrigo dos dispositivos de condicionamento de potência, deve estar conectado a um sistema de aterramento adequado, assim como todos os equipamentos envolvidos na instalação (PINHO; GALDINO, 2014).

A figura 10 a seguir traz um padrão de instalação com DPS CC (dispositivos de proteção contra surtos) para proteção da parte que vem dos módulos fotovoltaicos, um disjuntor CC, após o inversor, vem outro DPS CA, disjuntor CA, e DSV, antes de alimentar o quadro de cargas de baixa tensão e o medidor.

Figura 10 - Sistema de proteção.



Fonte: Adaptado (PINHO; GALDINO, 2014).

4 INVERSORES

4.1 Inversores eletrônicos de potência

Sendo o inversor, um dispositivo eletrônico, que recebe tensão contínua por meio de várias fontes como, por exemplo, proveniente de baterias ou módulos fotovoltaicos, fornece em sua saída, energia elétrica na forma CA na qual deve ter amplitude de tensão, frequência e níveis de componentes harmônicos adequados às cargas alimentadas. Na modalidade *on-grid* (do inglês, conectado à rede), a tensão de saída do inversor, bem como sua frequência, deve estar sincronizada com a tensão e a frequência da rede que no Brasil é de 60Hz (PINHO; GALDINO, 2014).

Havendo qualquer distorção dos parâmetros especificados, deve-se desconectar do sistema elétrico de potência afim de se evitar danos à rede local (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

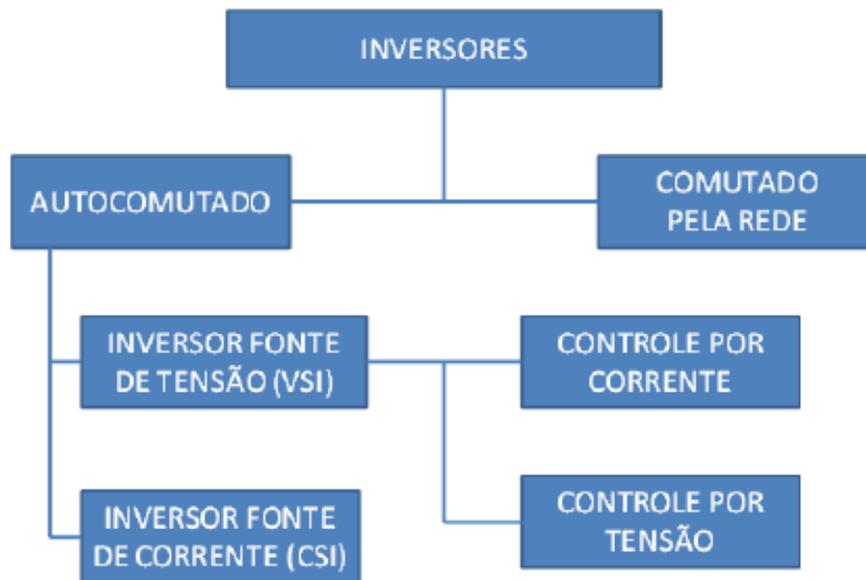
Existem, atualmente, uma grande diversidade de inversores em função das características de suas aplicações. Em sistemas fotovoltaicos, podem ser divididos em inversores autocomutados e comutados pela rede (PINHO; GALDINO, 2014).

4.2 Modo de comutação de inversores

Os inversores utilizados atualmente em sistemas fotovoltaicos, podem ser divididos em duas categorias devido quanto à sua característica de comutação. Os inversores autocomutados podem ser utilizados em sistemas isolados ou conectados à rede, trabalhando como fonte de tensão ou fonte de corrente. Já os comutados pela rede somente funcionam como fonte de corrente (RAMPINELLI, 2013).

Na figura 11 demonstra a classificação dos inversores perante a seu princípio de operação:

Figura 11 - Classificação dos inversores por princípio de operação



Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014).

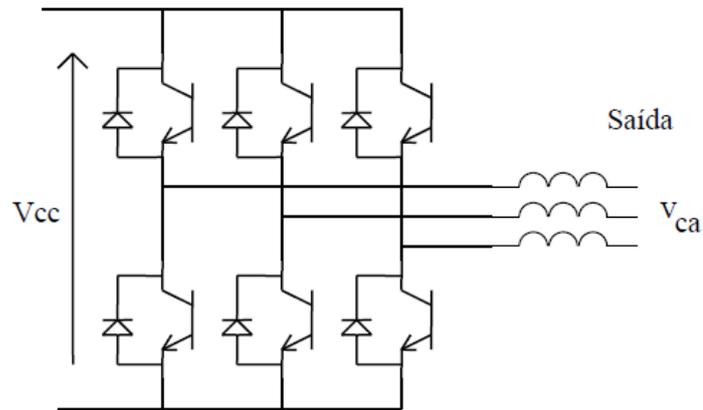
Os inversores comutados pela rede são pontes retificadoras baseadas em tiristores. Suas características de saída trabalham com um baixo fator de potência e alto nível de distorções harmônicas, e só podem funcionar quando a tensão alternada da rede estiver presente. Com o avanço tecnológico, novos dispositivos de chaveamento foram desenvolvidos, e a utilização de inversores a tiristores foi sendo reduzida e hoje, restrita a unidades de alta potência, ou seja, acima de 100 kW (RAMPINELLI, 2013).

As características de funcionamento dos inversores autocomutados, são dadas pelos elementos de chaveamento semicondutores que podem ser postos em condução ou em corte em qualquer instante do ciclo por meio de um terminal de controle. Esses equipamentos trabalham com Modulação por Largura de Pulso - *PWM* (do inglês, *Pulse Width Modulation*) e normalmente comutam em alta frequência sendo que o sinal de saída é senoidal, de baixo conteúdo harmônico e alto fator de potência sendo, portanto, capazes de sincronizar sua tensão de saída com a rede elétrica alternada, fornecida pela concessionária (RAMPINELLI, 2013).

Os inversores de fonte de tensão *VSI* (do inglês, *Voltage Source Inverter*), abordando os inversores trifásicos, como exemplo, sua tensão de saída é gerada por um circuito composto por três pontes, em cada uma formada por um par de transistores. Cada transistor, alimentado por uma tensão CC, opera como uma chave que abre e fecha em intervalos determinados por comandos dados por outros circuitos do inversor. Apenas um transistor de cada ramo conduz por vez. Assim, a tensão CC que o alimenta aparece em um par de condutores na saída do circuito (POMILIO, 2013).

A figura 12 apresenta o circuito característico do tipo fonte de tensão:

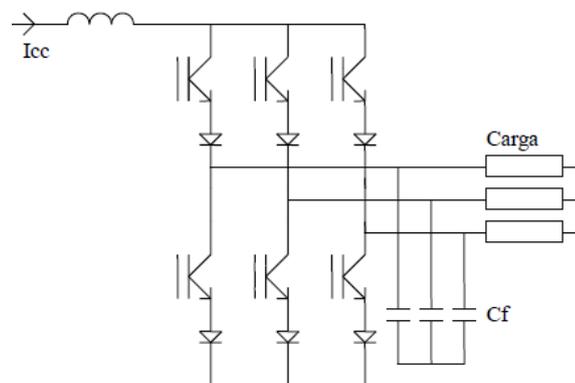
Figura 12 - Sistema do inversor trifásico tipo fonte de tensão.



Fonte: (POMILIO, 2013).

O Inversores do Tipo Fonte de Corrente - *CSI*, (do inglês, *Current Source Inverter*), estes são constituídos por fonte de corrente CC formada a partir de retificadores controlados para manter o valor médio da corrente sempre constante e de filtros indutivos de alto valor. Utilizam a técnica de modulação por largura de pulso – *PWM* (do inglês, *Pulse Width Modulation*). O circuito, apresentado pela figura 12, traz as características de inversor do tipo Fonte de Tensão no que se refere à topologia e modo de funcionamento de seus transistores (POMILIO, 2013). A figura 13 a seguir mostra a composição de um inversor por fonte de corrente:

Figura 13 - Inversor do tipo de fonte de corrente.



Fonte: (POMILIO, 2013).

5 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

O termo qualidade da energia elétrica (QEE) refere-se a uma variedade de fenômenos, ou distúrbios eletromagnéticos que caracterizam a tensão e a corrente em um dado tempo e local de um sistema elétrico. Levando-se em consideração uma determinada barra do sistema elétrico, por exemplo, tais fenômenos podem ser considerados permanentes (de longa duração) ou transitórios (de curta duração) (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

Para identificar distúrbios que afetam a QEE de um sistema elétrico, é importante verificar quais seriam suas condições ideais de operação, levando-se em consideração as normas vigentes que determinam parâmetros elétricos e níveis de distúrbios aceitáveis. Problemas relacionados à QEE podem ser normalmente observados em equipamentos que, quando alimentados pela rede elétrica, apresentam mal funcionamento, ou até mesmo deixam de funcionar. Exemplos como o de uma lâmpada que apresenta variações luminosas, um motor que sofre vibrações mecânicas, equipamentos operando com sobreaquecimento, proteções atuando em momentos impróprios, capacitores com sobretensões ou sobrecorrentes, podem ser indícios de problemas relacionados à qualidade de energia (DECKMANN, POMILIO, 2017).

De acordo com o documento de Procedimentos para Distribuição de Energia no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), módulo 8, devem ser medidos para se determinar a qualidade da energia em um local: a tensão em regime permanente, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação de frequência, fator de potência (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

Abaixo é apresentado os conceitos e parâmetros dos itens a serem avaliados em uma inspeção de qualidade de energia:

a) Tensão em regime permanente: deve estar entre 95% e 105% do valor nominal contratado. Para uma tensão de 127 V, por exemplo, os limites aceitáveis são de 120,65 V a 133,35 V. Para 220 V, de 209 V à 231 V, no ponto de conexão (PAC) entre o sistema de geração distribuída e a rede da concessionária, por exemplo, os valores de tensões são regulamentados pelo anexo 1 do PRODIST, onde traz os limites de tensões em regime permanente;

b) Harmônicos: são fenômenos que afetam as formas de onda das correntes e tensões, em comparação a onda senoidal da frequência fundamental, no caso do Brasil, 60 Hz. Uma distorção harmônica é formada por várias frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental. Seguido deste mesmo princípio, os principais causadores desses harmônicos são sistemas não lineares, como por exemplo, conversores eletrônicos, compensadores estáticos e

pontes retificadoras, devido a descontinuidade ocasionada pelo chaveamento das correntes por eles produzidas (DECKMANN, POMILIO, 2017);

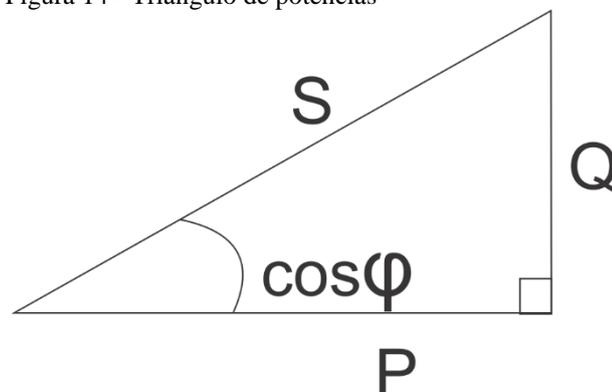
c) Desequilíbrio de tensão: diferença nas amplitudes de tensão entre as três fases de um determinado sistema trifásico, ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018);

d) Flutuação de tensão: variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea, o que causa incômodos perceptivos na cintilação da iluminação de consumidores de baixa tensão, por exemplo (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018);

e) Variação da frequência: a frequência do sistema de distribuição deve permanecer dentro dos limites de operação normais situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Na ocorrência de distúrbios do sistema, a fonte geradora deve garantir o retorno dos parâmetros no intervalo de 30 (trinta) segundos após a transgressão, para faixa de 59,5 Hz e 60,5 Hz, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração, podendo haver necessidade de corte para garantir a recuperação do sistema de distribuição (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018);

f) Fator de potência: ângulo de defasagem entre a potência ativa e a aparente, pelo triângulo de potências. Seu valor é adimensional, e pode variar de 0 a 1, sendo o cosseno do ângulo formado pelo cateto adjacente e a hipotenusa do triângulo das potências (MARTINHO, 2012). A figura 14, mostra o triângulo de potências:

Figura 14 - Triângulo de potências



Fonte: Adaptado (MARTINHO, 2012).

Quando a corrente está adiantada em relação à tensão, o fator de potência é tido como capacitivo, e quando está atrasada em relação à tensão, é indutivo (MARTINHO, 2012). Abaixo será demonstrado as características dos itens apreciados na figura 11:

- Potência aparente (S): Define-se como potência aparente toda potência que será utilizada de uma fonte geradora de energia, sendo assim a soma vetorial da potência ativa (P), com a potência reativa (Q). O módulo e ângulo são calculados pela equação 1:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \text{ onde o ângulo } \phi = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{P}\right). \quad (1)$$

Onde,

S = Potência aparente

P= Potência ativa

Q= Potência reativa

- Potência ativa (P): É a potência utilizada para executar trabalho efetivo. É descrita pela letra P e a sua unidade é *watt*. Em sistemas monofásicos a expressão da potência útil, apresentado pela equação 2, é:

$$P = U \times I \times \cos \phi \quad (2)$$

Onde:

U = tensão

I = corrente

ϕ = ângulo formado pelas potências útil e aparente

Em sistemas trifásicos, a potência ativa é calculada pela equação 3, a seguir:

$$P = 3 \times U_f \times I_f \times \cos \phi \quad (3)$$

Onde:

U_f = tensão de fase

I_f = corrente de fase

ϕ = ângulo formado pelas potências útil e aparente

- Potência reativa (Q): A potência reativa é a componente da potência aparente que não realiza trabalho. A unidade é *volt ampère* reativo (Var). Em sistemas monofásicos, a potência reativa é calcula pela equação (4):

$$Q = U \times I \times \sin \phi \quad (4)$$

E em sistemas trifásicos, é calculada, conforme a equação 5:

$$Q = 3 \times Uf \times If \times \sin \phi \quad (5)$$

O fator de potência pode, então, ser calculado pela equação 6, apresentada a seguir:

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} \quad (6)$$

A regulamentação vigente determina que, para unidades consumidoras inferiores a 230kV, o fator de potência deve estar entre 0,92 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo e 1,00, de acordo com (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

6 DISTURBIOS DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Os distúrbios na qualidade da energia elétrica podem ser verificados dentro de dois aspectos no módulo 8 do PRODIST, sendo estes, produto ou serviço (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

O módulo 8 do PRODIST traz como qualidade do produto, valores limites de referência, caracteriza fenômenos relativos à parâmetros de tensão em regime permanente e às perturbações no intuito da forma de onda da tensão, como fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e variação de tensão (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

A qualidade do serviço, é definida como serviços prestados pela concessionária local, que efetua a distribuição da energia entre os consumidores, centrais geradoras e distribuidoras acessantes, fornecendo parâmetros para avaliação dos serviços prestados pela distribuidora local (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

6.1 Transitórios ou transientes

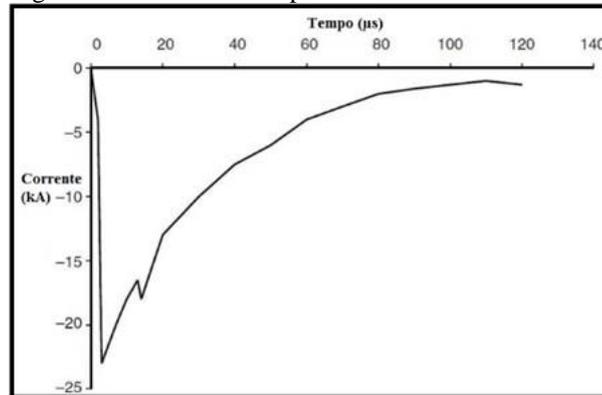
Segundo Martinho (2012), transitórios são manifestações eletromagnéticas oriundas de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica. Esses distúrbios, na maioria das vezes, ocorrem com duração muito curta, mas de grande importância, uma vez que submetem equipamentos a grandes esforços de tensão e/ou corrente. Existem dois tipos de transitórios: impulsivos, causados por descargas atmosféricas, e oscilatórios, causados por chaveamentos de cargas. Os transitórios podem ocorrer por diversos motivos, como por exemplo, descargas atmosféricas, chaveamento de cargas capacitivas ou indutivas, retorno da eletricidade devido a apagões, ou mesmo mau funcionamento de equipamentos.

6.2 Transitório impulsivo

Fenômeno que ocorre na incidência de uma ou mais descargas atmosféricas e que causam alterações indesejadas no sistema. As alterações se dão de forma unidirecional (negativa ou positiva). Descargas atmosféricas possuem frequências diferentes das utilizadas normalmente no sistema elétrico, onde acabam induzindo alterações bruscas no padrão da energia (MARTINHO, 2012).

A figura 15 apresenta um exemplo de transiente impulsivo que atinge seu valor máximo superior a 20 kA em torno de 1,2 μ s e, posteriormente, decai para menos da metade de seu valor máximo em até 50 μ s:

Figura 15 - Transitório impulsivo.

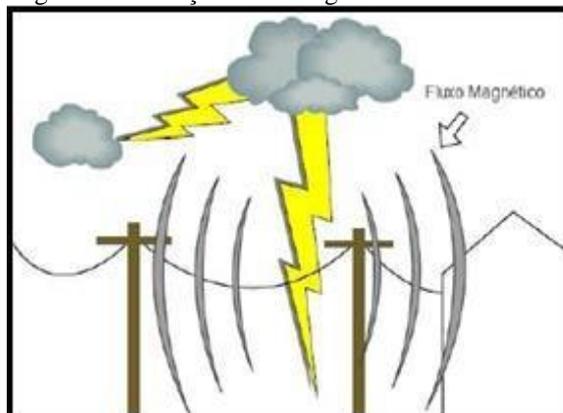


Fonte: Adaptado de Martinho, (2012).

Campos eletromagnéticos criados pela descarga atmosférica induzem transitórios impulsivos em instalações próximas, pois não há necessidade de uma queda direta de um raio na instalação elétrica para que este cause danos a equipamentos (ROCHA, 2016).

A figura 16 mostra esquematicamente um relâmpago e um raio causando indução eletromagnética em um sistema de distribuição:

Figura 16 - Indução eletromagnética.



Fonte: (ROCHA, 2016).

6.3 Transitório oscilatório

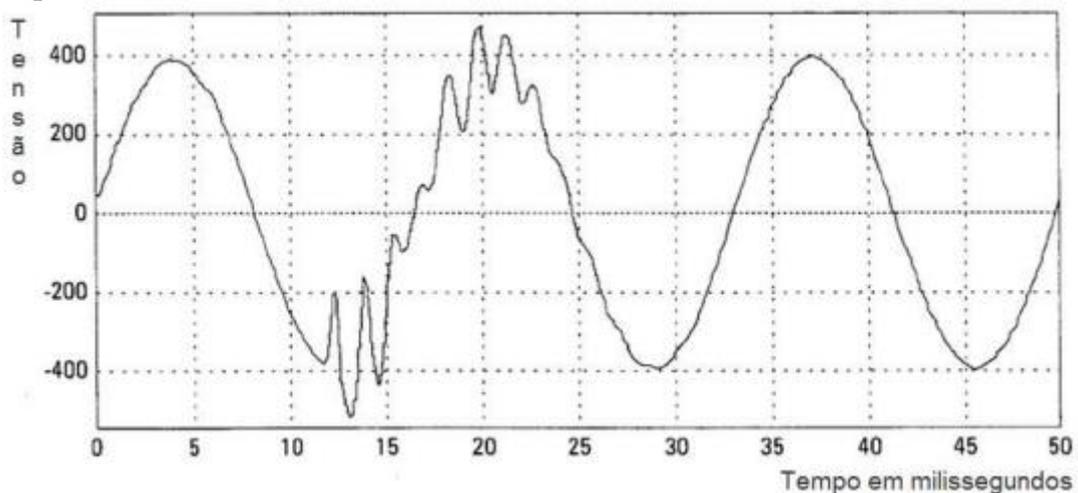
Um transitório é oscilatório quando ocorre uma mudança na condição de regime permanente no sinal de tensão e/ou corrente oscilando na frequência natural do sistema. Estes

podem ocorrer devido à energização de linhas, abertura de corrente indutiva, eliminação de faltas, chaveamento de bancos de capacitores e transformadores (ROCHA, 2016).

No trabalho de energização de banco de capacitores ocorre o tipo mais comum de transitório oscilatório em uma planta industrial, se acontecer com valores inferiores a 5kHz e períodos entre 0,3 e 50ms, chama-se transitório oscilatório de baixa frequência, que é encontrado nos sistemas de distribuição das concessionárias (MARTINHO, 2012).

A figura 17 apresenta um oscilograma de uma perturbação oriunda de energização de banco de capacitores:

Figura 17 - Transitório Oscilatório.



Fonte: (ROCHA, 2016).

6.4 Variação de tensão de curta duração

Tais variações de tensão são, geralmente, causadas pela energização de grandes cargas que requerem grandes valores de correntes de partida, ou bancos de capacitores, por exemplo, até mesmo descargas atmosféricas. Dependendo do local da falha e das condições do sistema, o resultado pode ser um afundamento momentâneo de tensão (em inglês, *sag*), uma elevação momentânea de tensão (em inglês, *swell*), ou mesmo uma interrupção completa do sistema elétrico (MARTINHO, 2012).

6.4.1 Afundamento de tensão de curta duração (*sag*)

Define-se como uma redução no valor eficaz da tensão, entre 0,1 e 0,9 p.u., da frequência fundamental, com duração entre 0,5 ciclo e um minuto (MARTINHO, 2012).

Os afundamentos de tensão podem ser causados por faltas no sistema elétrico da concessionária, partida de grandes motores ou a corrente de transformadores. A razão mais comum é o curto-circuito em redes de distribuição (ROCHA, 2016).

A figura 18, apresenta um exemplo de afundamento de tensão na forma de onda:

Figura 18 - Afundamento de tensão.



Fonte: (ARAÚJO; KANASIRO, 2010).

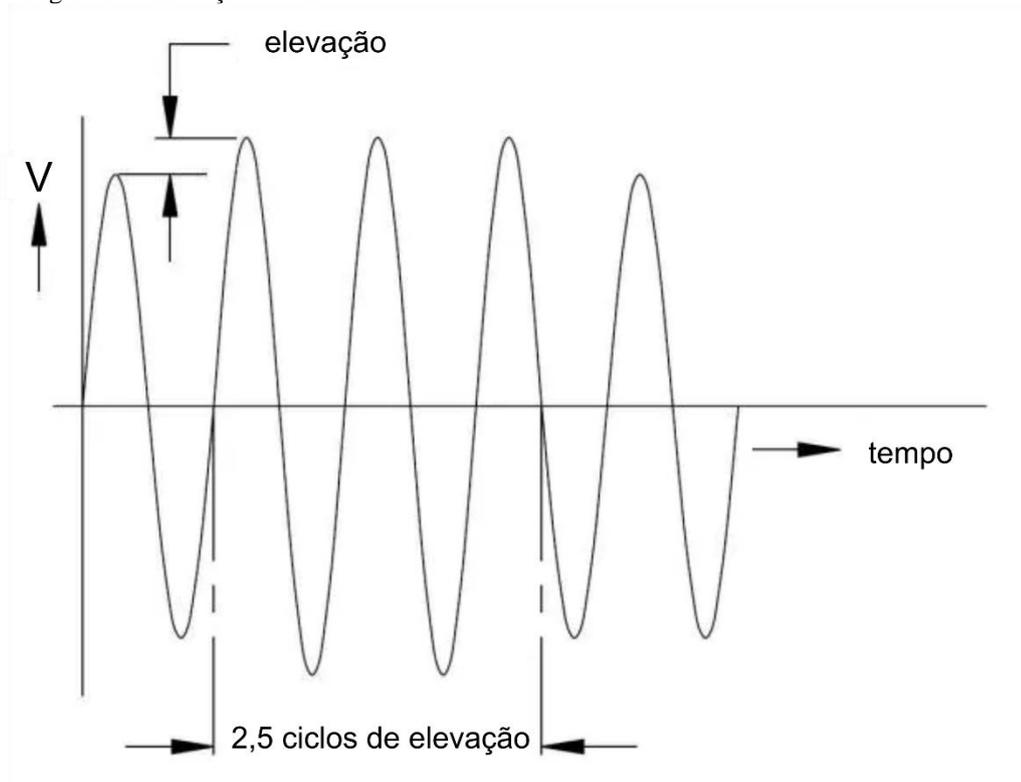
Os afundamentos de tensão causam inúmeros problemas a equipamentos, principalmente os que possuem componentes eletrônicos como microcontroladores, microprocessadores, memórias etc. Esses equipamentos possuem uma sensibilidade muito maior quanto ao afundamento de tensão e podem sofrer danos irreversíveis como a perda de dados, ou processamento errôneo (MARTINHO, 2012).

6.4.2 Elevação de tensão de curta duração (*swell*)

Uma elevação de tensão de curta duração é definida como um aumento entre 1,1 e 1,8 p.u. da tensão eficaz, na frequência da rede, com duração entre 0,5 ciclo a 1 minuto, deve ocorrer na frequência fundamental. A elevação de tensão pode ser prejudicial aos equipamentos que são construídos com componentes eletrônicos, que possuem uma sensibilidade maior a elevação de tensão e que podem ser danificados (MARTINHO, 2012).

A figura 19, apresenta um exemplo de elevação de tensão na forma de onda:

Figura 19 - Elevação de tensão



Fonte: (SILVA; MUNHOZ; CORREIA, 2002).

6.5 Variação de tensão de longa duração

Segundo Martinho (2012), as variações de tensão de longa duração podem ser caracterizadas como desvios que ocorrem no valor eficaz da tensão, na frequência do sistema, com duração maior que 1 minuto. Estas variações de tensão podem se dar como subtensões, sobretensões ou interrupções sustentadas. Todas elas são geralmente causadas por variações de carga e operações de chaveamento no sistema.

6.6 Interrupção

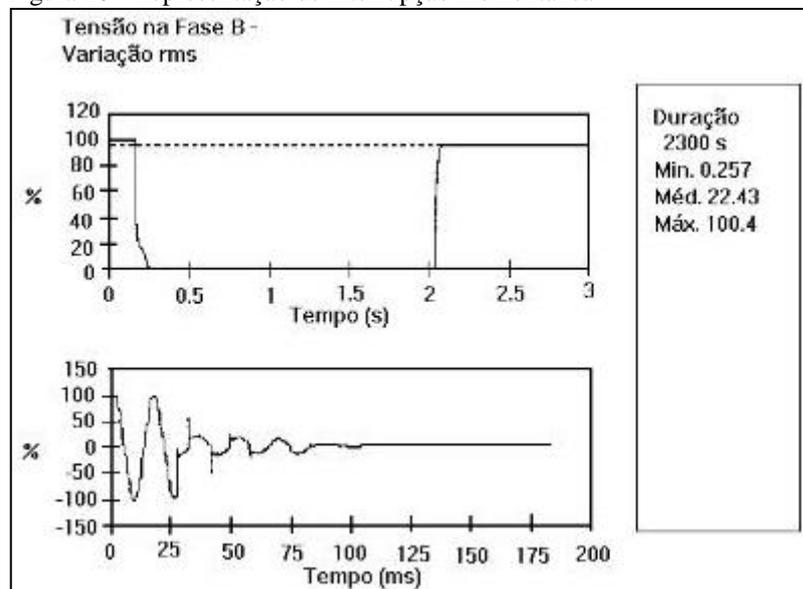
A interrupção é caracterizada em razão de valores menores que 10% da tensão nominal, levando à ausência total de tensão, podendo ser entre alguns ciclos até vários minutos. É dividida em momentânea, temporária e sustentada ou longa duração (MARTINHO, 2012).

6.6.1 Interrupção momentânea

Caracterizada pela ausência de tensão ou também por valores menores que 10% da tensão nominal, em um período de até três segundos, pode ocorrer devido a uma falta fase-terra, fase-fase, por descargas atmosféricas e por situações naturais como a queda de galhos de árvores em redes de distribuição. A interrupção mesmo sendo rápida, pode causar problemas e diversos prejuízos financeiros. Pode afetar equipamentos de armazenamento de dados, principalmente os magnéticos que, ao serem submetidos ao desligamento brusco e religamento, corrompem seus sistemas de leituras (MARTINHO, 2012).

A figura 20 é uma representação gráfica de uma interrupção de 2 segundos causados por um curto circuito fase-terra e na sequência a atuação do religador (sistema automático de religamento):

Figura 20 - Representação de interrupção momentânea



Fonte: (MARTINHO, 2012).

6.6.2 Interrupção temporária

A interrupção temporária é caracterizada pela ausência de tensão, ou valores menores que 10% do valor nominal, que ocorrem em um período variante entre três segundos a três minutos. Esse fenômeno ocorre normalmente pela atuação de dispositivos de proteção como religadores, normalmente são projetados para religar após uma verificação do sistema, para não haver o religamento no caso o problema não tenha sido momentâneo. O ocorrido pode ser

devido a uma falta fase-terra, por descargas atmosféricas e por situações naturais como a queda de galhos de arvores em redes de distribuição (MARTINHO, 2012).

6.6.3 Interrupções sustentadas

A interrupção sustentada ou longa duração ocorre quando o tempo da anomalia e superior há um minuto. Na ocorrência deste distúrbio a tendência é que se permaneça com falha até que haja uma intervenção humana para o restabelecimento da energia. As causas podem ser as mais diversas, mas podem ser tratadas como inesperada ou planejada prejuízos (MARTINHO, 2012).

A forma inesperada ocorre geralmente por descargas atmosféricas e atuação de dispositivos de proteção (fusíveis, relés), já o caso de interrupção planejada é causado por situações de manutenção preditiva, como troca de componentes e limpeza de máquinas prejuízos (MARTINHO, 2012).

A interrupção sustentada leva a parada de funcionamento de equipamentos, causando grandes transtornos e principalmente prejuízos materiais e financeiros. Para amenizar os problemas geralmente são utilizados *nobreaks* ou utilização de grupos geradores, para manter o funcionamento das cargas cuja falta de energia pode trazer elevados prejuízos (MARTINHO, 2012).

6.7 Ruído

Ruído é definido como um sinal elétrico indesejado, caracterizado com uma frequência menor que 200kHz, superpondo-se ao sinal de potência, seja corrente ou tensão, que circula pelos condutores fase ou neutro de uma instalação elétrica, causando problemas na rede. Geralmente são provocados por dispositivos eletrônicos com retificadores e fornos a arco voltaicos, sendo amplificados em circuitos mal aterrados e podem se atenuados com utilização de filtros (MARTINHO, 2012).

6.8 Flicker

Flicker (do inglês, cintilação), é um fenômeno que pode ser notado pela sensação visual de que a luminosidade varia no tempo, também conhecido como flutuação de tensão, onde a variação brusca é intermitente do valor eficaz na faixa de 0,1 e 7%. Este efeito deve ser evitado,

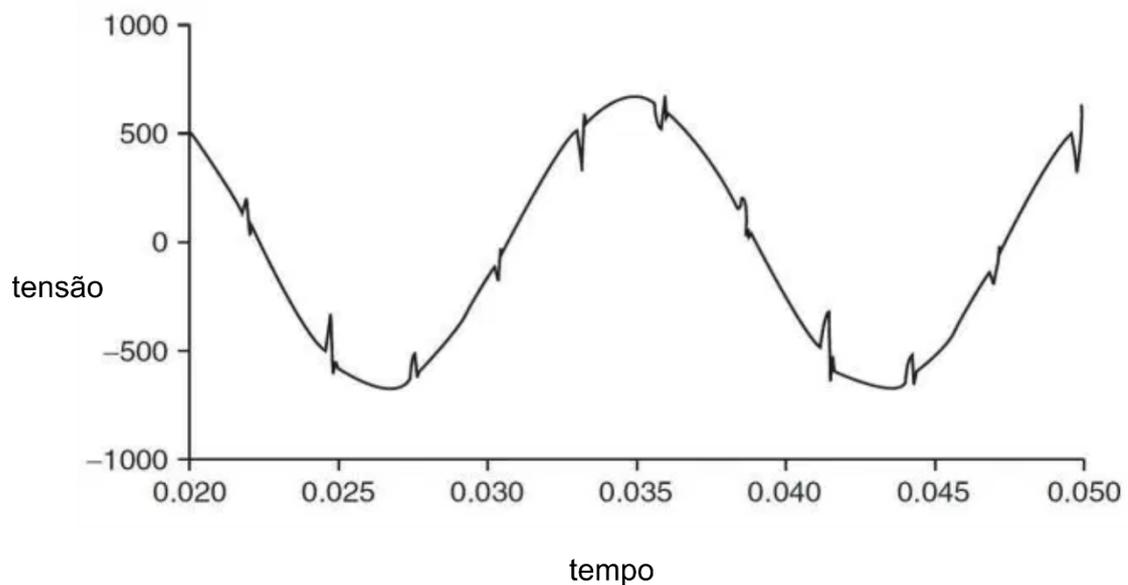
principalmente em atividades perigosas como operação de torno mecânico, em indústrias (MARTINHO, 2012).

6.9 Notching

Notching (do inglês, recorte) é um distúrbio periódico de tensão, causado pela má operação de equipamentos de eletrônica de potência, quando a corrente é comutada de uma fase para outra. No momento da transição de fase ocorre um curto-circuito, que leva a tensão ao menor valor permitido pela impedância do sistema (próximo de zero). É definido também como microvariações que ocorrem durante uma senoide (MARTINHO, 2012).

A Figura 18, apresenta recorte em uma onda senoidal:

Figura 21 - Recorte



Fonte: (SILVA; MUNHOZ; CORREIA, 2002).

6.10 Variação de frequência

A frequência do sistema de potência está diretamente associada à velocidade de rotação dos geradores que suprem o sistema. Pequenas variações de frequência podem ser observadas como resultado do balanço dinâmico entre carga e geração no caso de alguma alteração (variações na faixa de $60 \pm 0,5\text{Hz}$). As variações na frequência de um sistema elétrico são definidas como sendo desvios no valor da frequência fundamental deste sistema (50 Hz ou 60 Hz) e tem origem geralmente na geração da energia elétrica (MARTINHO, 2012).

O tamanho da variação na frequência e sua duração depende das características da carga e da resposta do sistema de controle de geração às mudanças na carga, sendo variações de frequência que ultrapassam os limites para operação normal em regime permanente podem ser causadas por falhas nos sistemas de transmissão, saída de um grande bloco de carga ou pela saída de uma grande fonte de geração (MARTINHO, 2012).

6.11 Desequilíbrio de tensão

O problema de desequilíbrios de tensão pode ser definido como o desvio máximo da média das correntes ou tensões trifásicas, divididos pela média das correntes ou tensões trifásicas, expressados em percentual. As origens destes desequilíbrios estão geralmente nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de sequência negativa. Este distúrbio se agrava quando consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma distribuição de carga ruim e desbalanceadas em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária (MARTINHO, 2012).

6.12 Redução do fator de potência

A redução do fator de potência pode acarretar vários prejuízos e perdas no sistemas, pois quanto menor o fator de potência maior é a bitola do cabo, e a perda por efeito *joule* aumenta consideravelmente, além de passível de penalizações por parte da concessionária, alguns fatores pode contribuir para que o fator de potência fique baixo, como transformadores que operam a vazio, fornos de indução ou máquinas de solda a transformador, entre outros (MARTINHO, 2012).

A figura 22 a seguir apresenta uma tabela com valores de seção relativa de condutores de acordo com o fator de potência:

Figura 22 - Relação fator de potência x seção nominal do condutor

Seção relativa	Fator de Potência
1,00	1,00
1,23	0,90
1,56	0,80
2,04	0,70
2,78	0,60
1,00	0,50
6,25	0,40
11,10	0,30

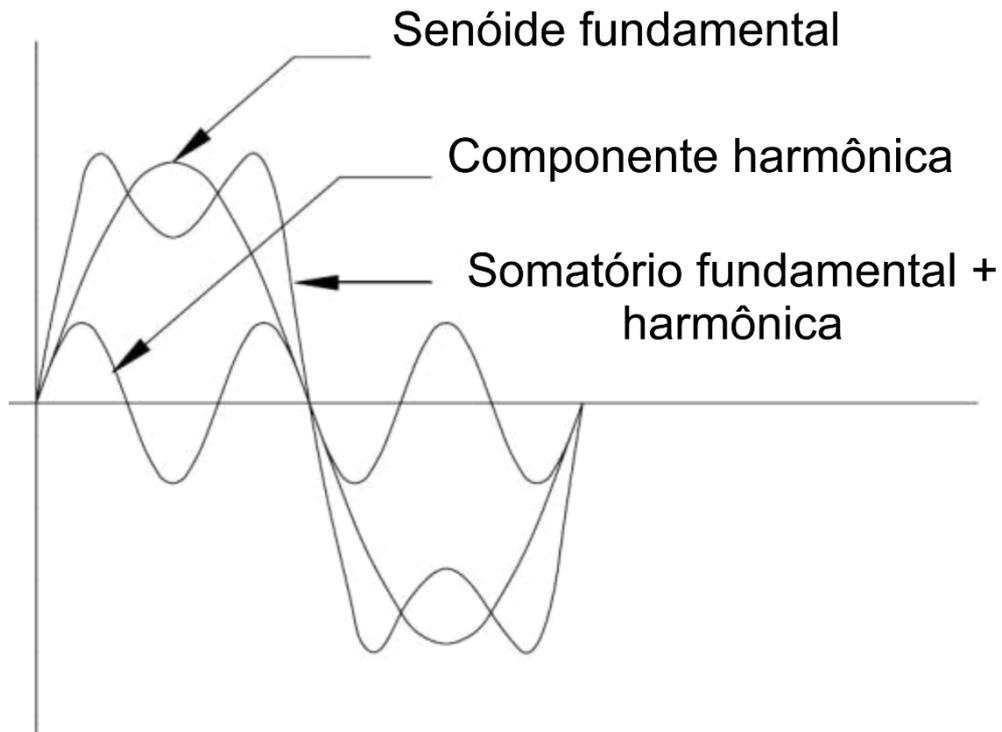
Fonte: (MARTINHO, 2012).

6.13 Harmônicos

Harmônicos são tensões ou correntes senoidais que possuem frequências inteiras da frequência do sistema, sendo no Brasil 60 Hz. As formas de onda distorcidas periodicamente podem ser decompostas em uma soma entre a onda fundamental e as componentes harmônicas. Onde a distorção harmônica é causada pelas cargas não lineares distribuídas ao longo do sistema (MARTINHO, 2012).

A seguir figura 23 do somatório de uma harmônica na senoide fundamental:

Figura 23 - Forma de onda distorcida pela superposição da fundamental e terceira harmônica.



Fonte: (SILVA; MUNHOZ; CORREIA, 2002).

As frequências harmônicas possuem diversas ordens, tendendo ao infinito, porém, o impacto após a 13ª de ordem em um sistema elétrico é considerado desprezível. A ordem é o número que expressa o múltiplo da frequência fundamental (60Hz) (MARTINHO, 2012).

Na figura 24 demonstra as componentes harmônicas:

Figura 24 - Tabela da ordem e frequência de harmônicas

ORDEM	FREQUÊNCIA (HZ)
1°	60
2°	120
3°	180
4°	240
5°	300
6°	360
n°	n*60

Fonte: Adaptado de Capelli, (2013).

6.14 Inter – harmônicos

O distúrbio inter-harmônico é caracterizado pela presença de formas de ondas de tensão ou corrente com valores que não são múltiplos da frequência nominal, no caso do Brasil, 60 Hz. As frequências podem aparecer de forma discreta ou com uma larga faixa espectral, em diferentes níveis de tensão. As suas principais fontes são conversores estáticos de potência, motores de indução, e equipamentos a arco (MARTINHO,2012).

7 METODOLOGIA

A análise foi realizada na propriedade particular, situada no município de Caxambu – MG, com uma usina fotovoltaica instalada com potência de 12,15 kWp, composto de 2 inversores da marca *Fronius International*, modelo Primo 5.0-1, um com potência de 5,1 kW e outro com potência de 4 kW, modelo Primo 4.0-1 (FRONIUS BRASIL, 2018), disposto em abrigo conforme figura 25; 45 módulos fotovoltaicos da marca *Canadian Solar*, policristalino, com dados técnicos conforme figura 26 a seguir e disposição conforme figura 27, sendo para uma produção de 20.092,6 kWh por ano, distribuídos em uma área de 73,8 m². Modalidade de conexão à rede de baixa tensão bifásico (2F + N) com tensão de fornecimento 220 V.

Figura 25 - Conjunto de Inversores Fronius.



Fonte: (O autor, 2018).

A figura 26 a seguir traz as especificações dos módulos fotovoltaicos instaladas na propriedade rural:

Figura 26 - Tabela de características dos módulos Canadian solar.

Especificações	Valores
Potência máxima	270 W
Tensão nominal	30,8 V
Tensão em aberto	37,9 V

Corrente nominal	8,8 A
Corrente de curto-circuito	9,3 A
Dimensões	992 x 1650 mm
Peso	18,2 kg

A figura 27 apresenta a disposição dos painéis fotovoltaicos instalados, com sua inclinação característica de 22°, sentido ao norte:

Figura 27 - Disposição dos painéis fotovoltaicos.



Fonte: (O autor, 2017).

Para realização do estudo de caso proposto, foi instalado um equipamento para análise da qualidade de energia elétrica, da marca *Shneider*, modelo ION 7650, como mostra a figura 28 a seguir:

Figura 28 - Analisador de qualidade de energia ION 7650.



Fonte: Schneider, (2008).

Para capturar de dados, com intuito de avaliar segundo os parâmetros do PRODIST, como por exemplo: tensão, corrente, fator de potência (FP) e harmônicos. O equipamento foi instalado no ponto de conexão (PAC) do sistema fotovoltaico com a rede elétrica da concessionária como mostra na figura 29 com transformador de corrente de 200/5 A, da marca *Schneider*.

Figura 29 - Ponto de conexão dos sistemas de medição.



Fonte: (O autor, 2017).

O analisador de qualidade de energia foi instalado no dia 21 de maio de 2018 e retirado no dia 04 de junho 2018. Os dados coletados foram carregados no excel e tratados para a geração de gráficos, como se apresenta no capítulo a seguir.

7.1 Característica da carga

O local em análise contém cargas com característica majoritariamente indutivas, a tensão de fornecimento em tensão média de 7967 V, ligado a um transformador monofásico com retorno por terra, com potência de 15 kVA, em seu secundário com tensão FN de 127 V e FF com 254 V, a ligação do sistema de geração distribuída está conectado com a Cemig através de ramal triplex XLPE 16mm², a distância entre o ponto de conexão e a concessionária e de 27m.

As cargas do local está descritas na quadro 1 a seguir, onde em sua maioria com característica indutiva, e com potencia baixa onde não impacta na qualidade de energia da rede da concessionária.

Quadro 1 - Quadro de cargas.

Carga	Potência	Quantidade
Picadeira	5 HP	1
Ordeneira	2 HP	1
Freezer	500 W	4
Lampada Led	20 W	12
Chuveiro	5000 W	1
Eletrodomésticos Diversos	2500 W	X

Fonte: (O autor, 2017).

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As medições foram realizadas durante o período de 14 dias corridos, de 22 de março a 4 de junho, os resultados das amostras retiradas serão analisados nos tópicos a seguir.

8.1 Variação da tensão

Durante todo o período de captação de amostras no âmbito da tensão, observa-se que o comportamento dia após dia era repetitivo havendo pequenas variações, observa-se que a tensão chega ao valor de 254 Vac, sendo normal como se trata de uma propriedade rural onde o transformador de tensão monofilar com retorno por terra (MRT), regulamentado pela ND 5.1 da Cemig, onde a tensão de entrada de alimentação rural pode variar de 220 – 254 Vac, também regulamentados pela tabela 6 do anexo 1 do PRODIST, permitindo uma variação entre 232 a 264 V, o sistema fotovoltaico foi parametrizado para trabalhar em torno do valor correspondente, observa-se que a variação máxima acima do valor nominal é 4%, comparando com uma média de 245 Vac, como mostra a seguir na figura 30.

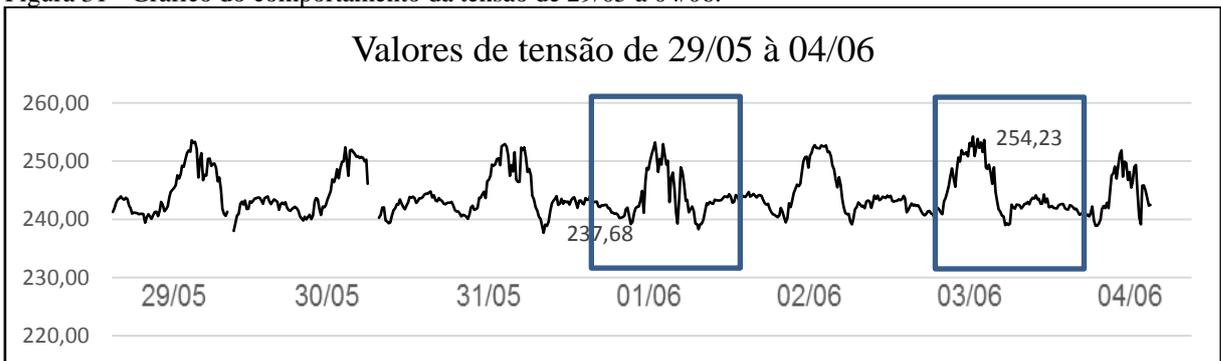
Figura 30 - Gráfico do comportamento da tensão de 22/05 a 28/05.



Fonte: (O autor, 2018).

A figura 31 traz outros 7 dias de análises, mostrando que a variação está em valores normais.

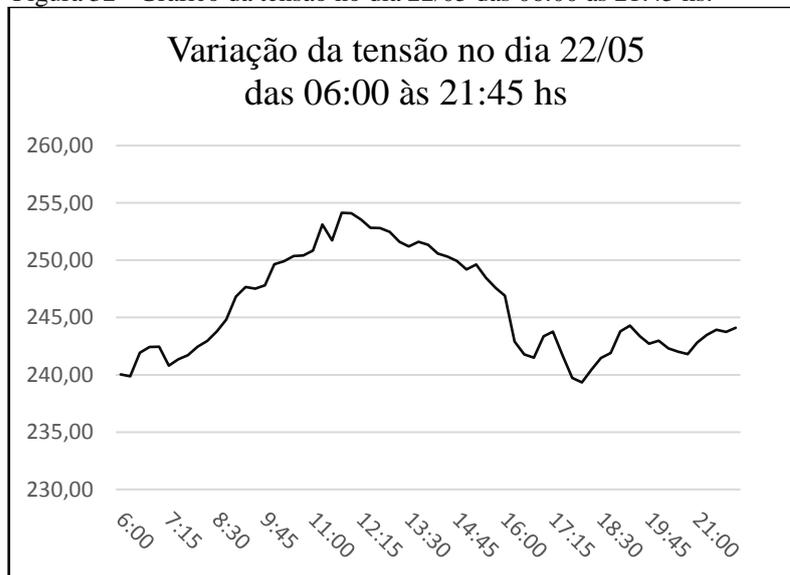
Figura 31 - Gráfico do comportamento da tensão de 29/05 a 04/06.



Fonte: (O autor, 2018).

O comportamento durante o dia apresenta um leve aumento dos valores de tensão com o início da geração fotovoltaica, ocorrendo por volta da 7:30 hs, e normalizando os valores da rede por volta das 17:30 hs, onde as placas fotovoltaicas não captam luz, para geração de eletricidade, como e demonstrado nas figuras 32 e 33 a seguir.

Figura 32 - Gráfico da tensão no dia 22/05 das 06:00 às 21:45 hs.



Fonte: (O autor, 2018).

Figura 33 - Gráfico da tensão no dia 03/06 das 06:00 às 20:00 hs.



Fonte: (O autor, 2018).

Sendo que o PRODIST, traz os limites de tensões em seu módulo 8, no anexo 1, Tensão em Regime Permanente, a tabela 6 – Ponto de conexão em tensão nominal igual ou superior a 1 kV (254/127), demonstra os valores normais para está tensão, como mostra a figura 34 a seguir:
Fonte: (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

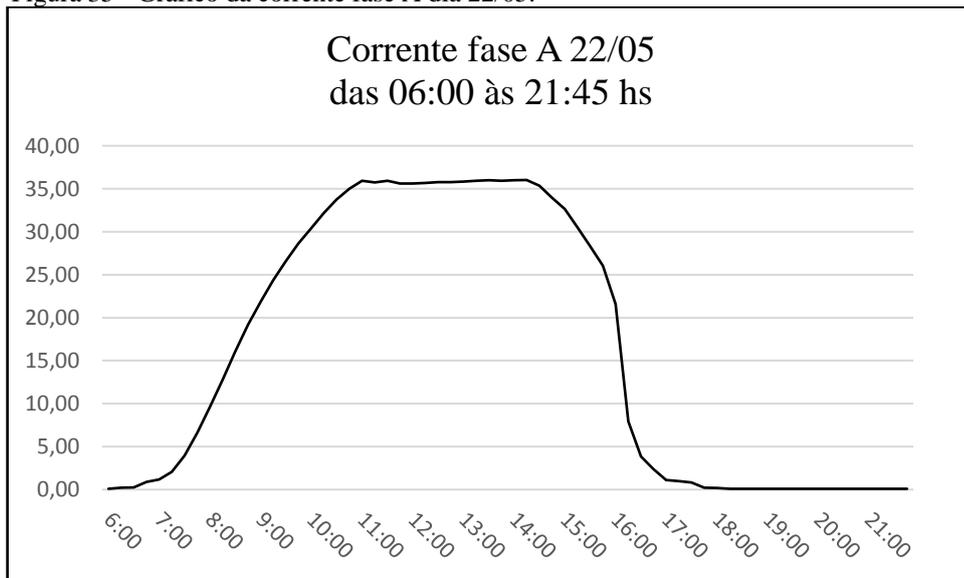
Figura 34 - Tabela Tensão em Regime Permanente - tensões de igual ou superior a 1 kV (254/127).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(232 \leq TL \leq 264) / (116 \leq TL \leq 132)$
Precária	$(220 \leq TL < 232 \text{ ou } 264 < TL \leq 269) / (109 \leq TL < 116 \text{ ou } 132 < TL \leq 140)$
Crítica	$(TL < 220 \text{ ou } TL > 269) / (TL < 109 \text{ ou } TL > 140)$

8.2 Variação de corrente

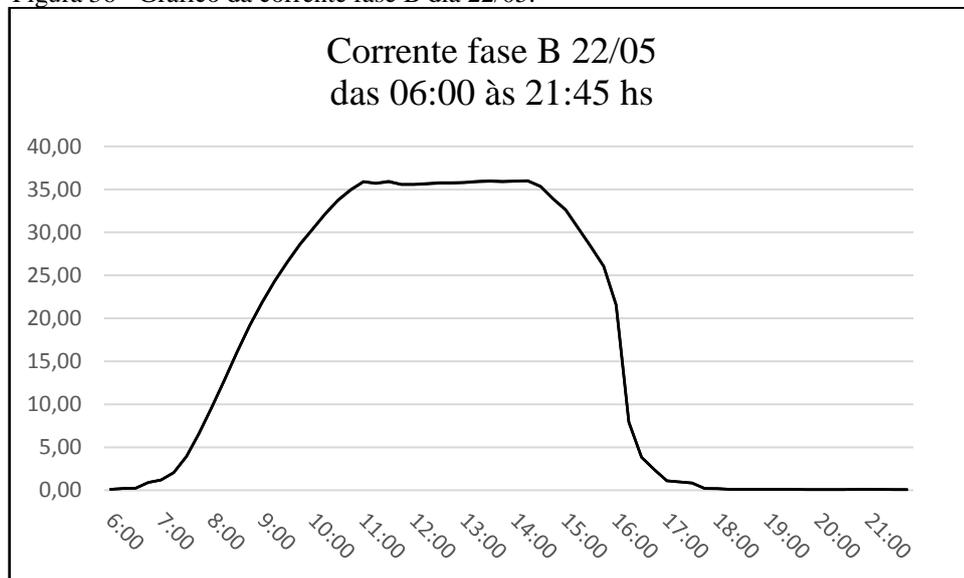
Analisando o comportamento da corrente, nas duas fases A e B, os valores na saída do inversor, se iniciam juntamente com o horário da variação da tensão por volta de 07:30 hs, nas duas fases, e vão ao valor de zero por volta de 17:30 hs, ao pôr do sol, como mostra figura 34 da fase A e 35 da fase B. Este comportamento tem seu pico de fornecimento de corrente, na volta do dia, que se encontra das 10:30 hs e 16:15 hs, antes e depois destes horários, a geração é mínima.

Figura 35 - Gráfico da corrente fase A dia 22/05.



Fonte: (O autor, 2018).

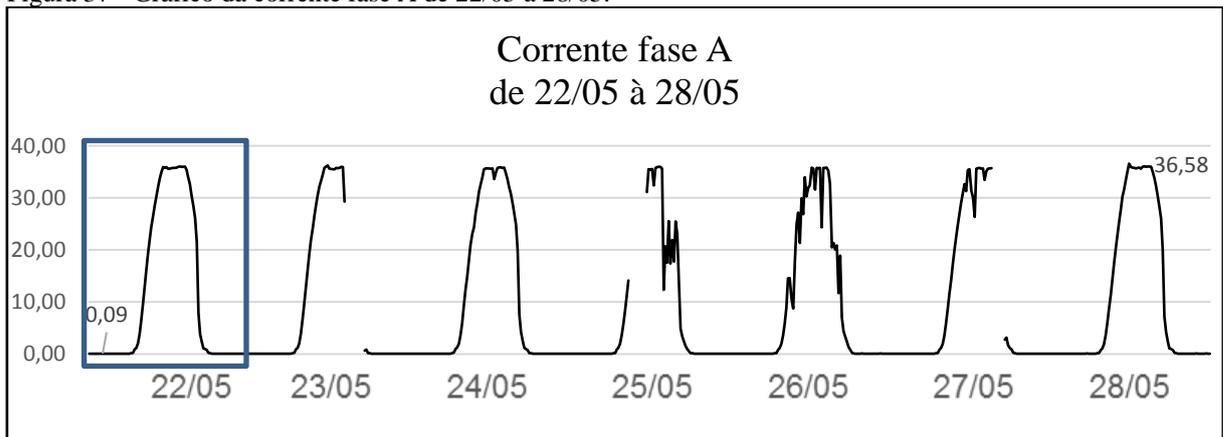
Figura 36 - Gráfico da corrente fase B dia 22/05.



Fonte: (O autor, 2018).

A figura 36 mostra a variação da fase A no período dia 22/05 a 28/05, onde traz variações nos valores devido a variação de nuvem que bloqueiam a luz solar, alterando a corrente de saída:

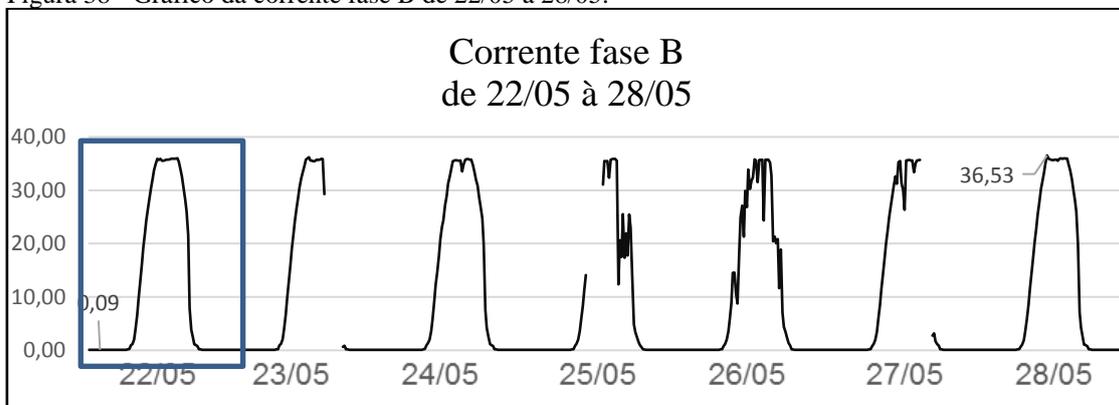
Figura 37 - Gráfico da corrente fase A de 22/05 a 28/05.



Fonte: (O autor, 2018).

A figura 37 mostra a variação da fase B no período dia 22/05 a 28/05, mostra que as alterações também acontecem nesta fase:

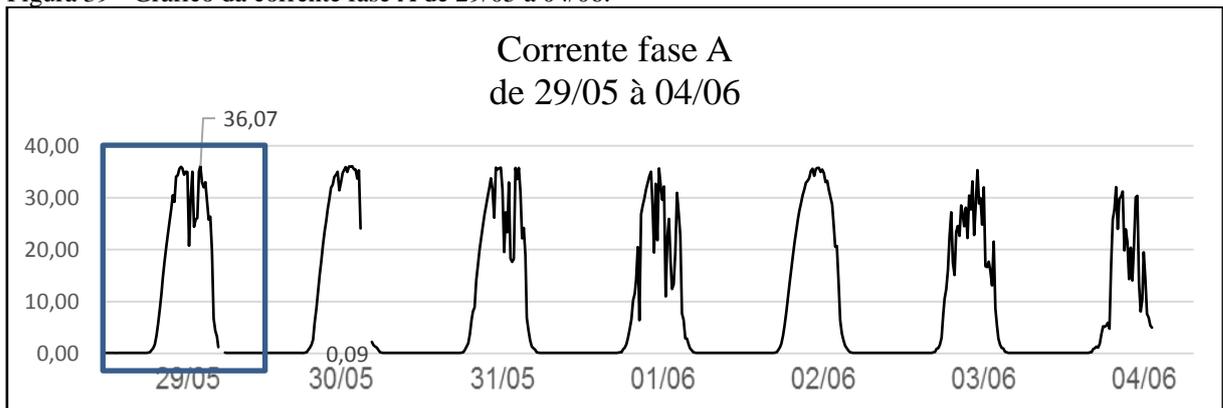
Figura 38 - Gráfico da corrente fase B de 22/05 a 28/05.



Fonte: (O autor, 2018).

A figura 38 apresenta variação da fase A no período dia 29/05 a 04/06, que as alterações também acontecem neste período:

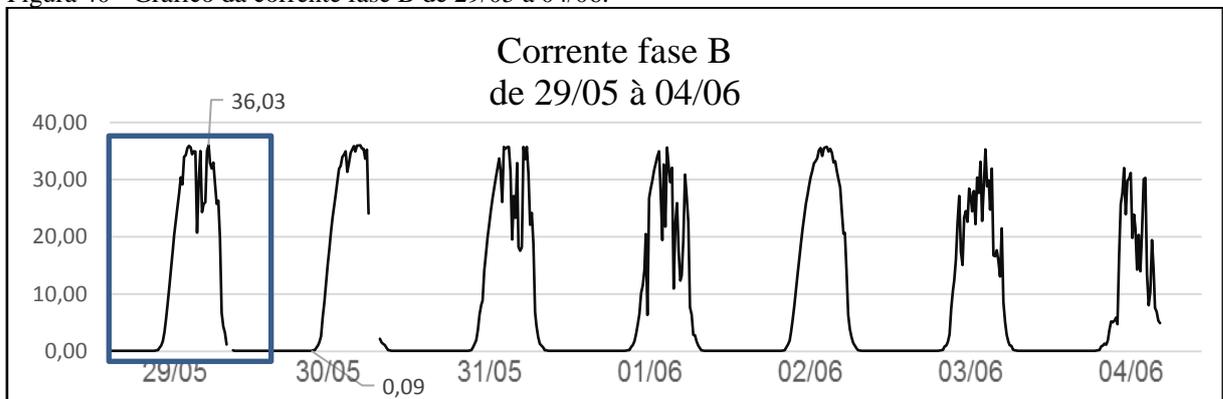
Figura 39 - Gráfico da corrente fase A de 29/05 a 04/06.



Fonte: (O autor, 2018).

A figura 39 apresenta variação da fase B no período dia 29/05 a 04/06, que as alterações também acontecem neste período:

Figura 40 - Gráfico da corrente fase B de 29/05 a 04/06.

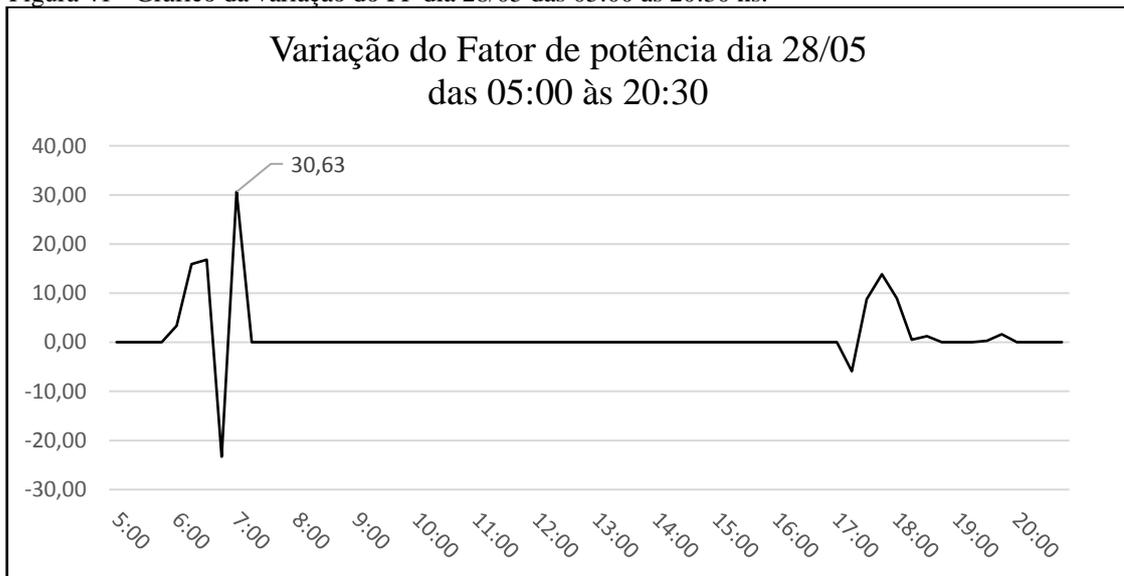


Fonte: (O autor, 2018).

8.3 Fator de potência

O comportamento do Fator de Potência (FP), traz informações sobre o acionamento do inversor, ao entrar em funcionamento no início da manhã o mesmo, faz chaveamento para realizar o acoplamento da geração fotovoltaica, e ao procurar seu mppt (máxima potência por ponto de restreamento) de funcionamento, isto faz variar o valor do FP, devido aos componentes eletrônicos, após estar conectada e gerando corrente para rede elétrica, o fator de potência se torna unitário, durante todo o período do dia, como mostra figura 40:

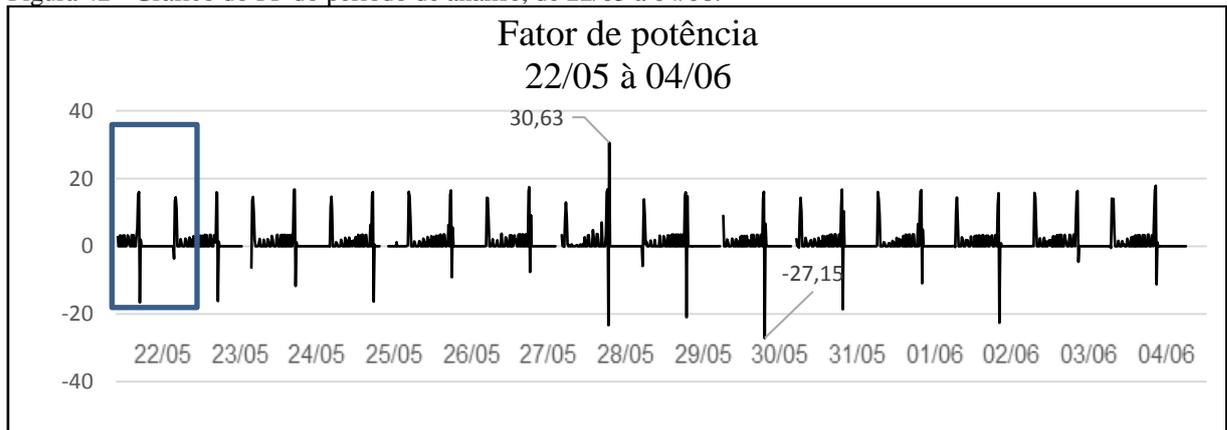
Figura 41 - Gráfico da variação do FP dia 28/05 das 05:00 às 20:30 hs.



Fonte: (O autor, 2018).

A figura 41 mostra o comportamento durante o período de análise, havendo também pequena variação durante o período noturno, que não ultrapassa os valores do PRODIST módulo 8, sendo desprezados (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

Figura 42 - Gráfico do FP do período de análise, de 22/05 a 04/06.

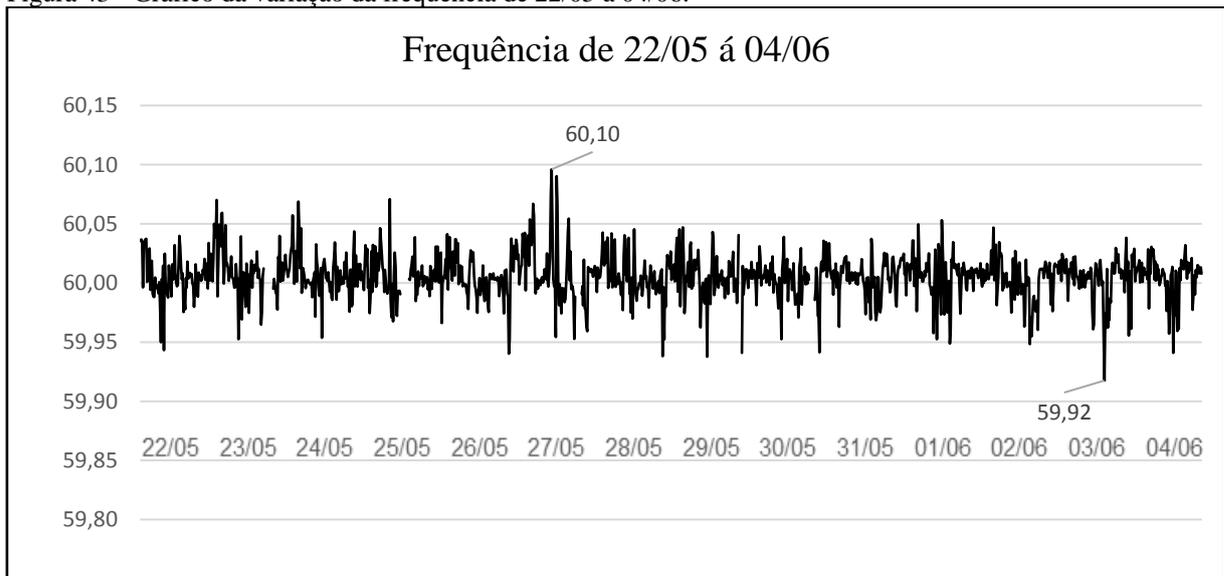


Fonte: (O autor, 2018).

8.4 Variação da frequência

Segundo o PRODIST em seu módulo 8, traz sobre variação da frequência os limites de operação normais situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz, como mostra figura 42, analisando todo período, os valores estão dentro do aceitável, não causando danos a rede da concessionária (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

Figura 43 - Gráfico da variação da frequência de 22/05 a 04/06.



Fonte: (O autor, 2018).

8.5 Variações Harmônicas

Segundo o PRODIST, as Distorções Harmônicas Totais (THD) de tensão, podem variar em até 10%, quando o valor da tensão é abaixo de 1kV, como mostra a figura 43 a seguir que traz informações sobre os valores máximos permitidos e suas tensões (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018):

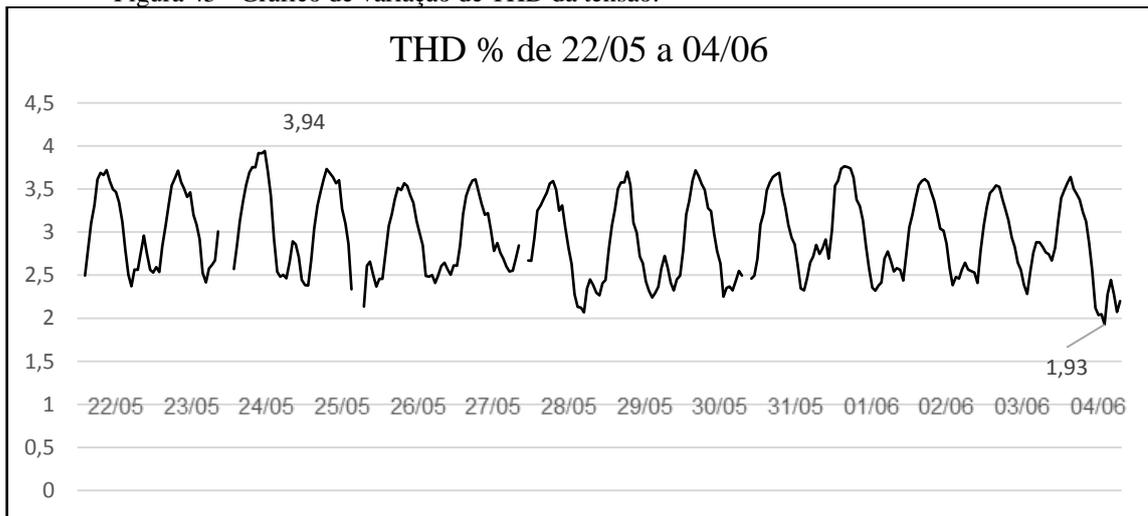
Figura 44 - Tabela de Indicadores THD de tensão em porcentagem.

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT _{95%}	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _{P95%}	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _{195%}	7,5%	6,0%	4,0%
DTT _{395%}	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

As variações ocorridas no período em análise estão dentro dos valores aceitos pelo PRODIST em seu módulo 8, sendo que o valor apreciado é de 3,94%, este para tensões de até 1 kV, como mostras a figura 44 a seguir, informando sua variação máxima:

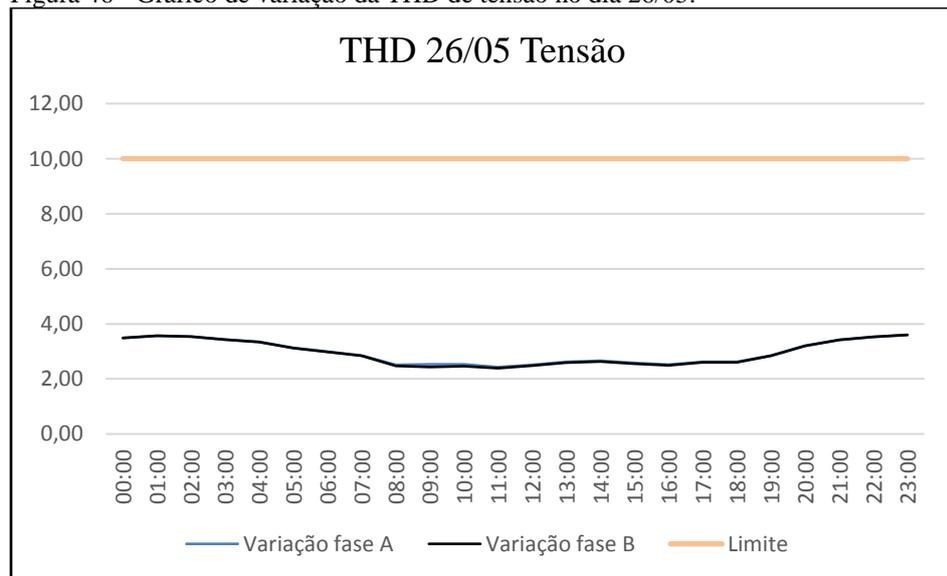
Figura 45 - Gráfico de variação de THD da tensão.



Fonte: (O autor, 2018).

A variação das THD de tensão, estão dentro do limite, com uma leve variação no período noturno como podemos observar na figura 45 a seguir, isso nos leva a perceber que quando o inversor está em funcionamento a uma leve diminuição nos valores de harmônicas de tensão.

Figura 46 - Gráfico de variação da THD de tensão no dia 26/05.

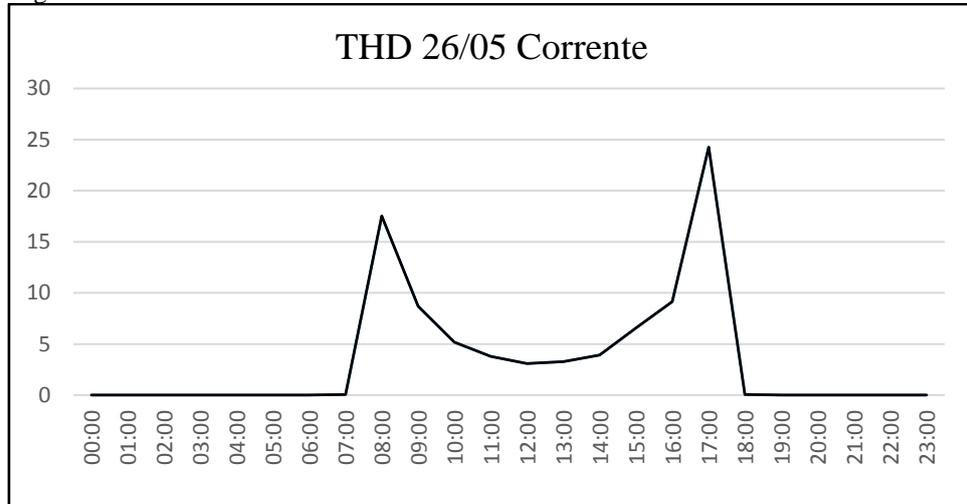


Fonte: (O autor, 2018).

A corrente se comporta de forma alternada pois devido ao chaveamento do inversor, nos momentos onde não há corrente elétrica, passando pelos condutores, período noturno, as THD de corrente vão a zero, mas nos momentos onde há geração de corrente elétrica, devido ao chaveamento dos inversores, gera THD de corrente, durante todo o período de geração,

principalmente nos momentos de acoplamento e desacoplamento, mas sem afetar o cliente, como mostra a figura 46, que informa dados do dia 26/05:

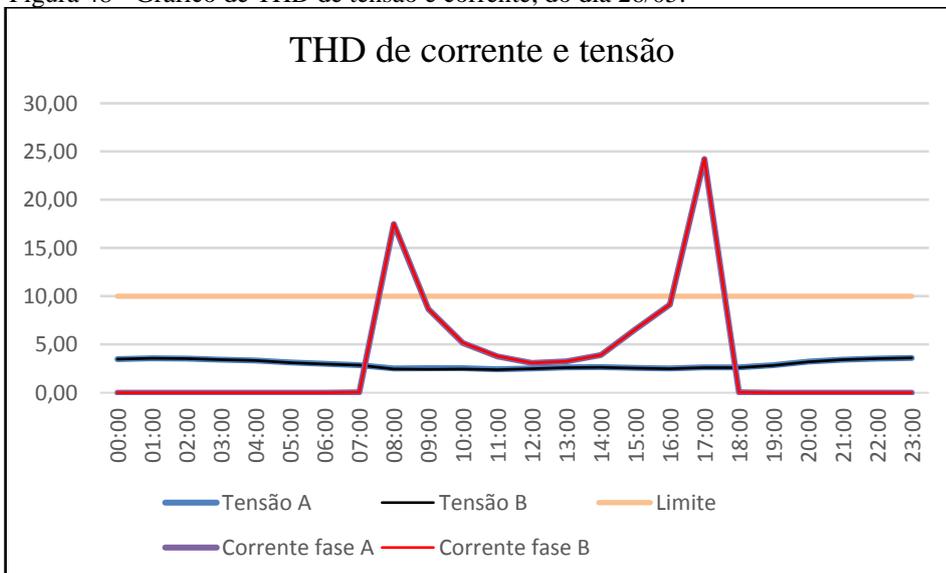
Figura 47 - Gráfico de THD de corrente no dia 26/05.



Fonte: (O autor, 2018).

Na figura 47 a seguir, mostra as curvas de corrente e tensão no mesmo gráfico, onde percebe-se que quando a geração de corrente o valor de harmônico de tensão diminui levemente, também que a THD de corrente diminui quando a geração fotovoltaica está no período do meio do dia, gerando o maior valor de corrente possível:

Figura 48 - Gráfico de THD de tensão e corrente, do dia 26/05.



Fonte: (O autor, 2018).

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tema escolhido, fez menção a área de qualidade de energia elétrica, aumentando os conhecimentos de fenômenos que afetam o sistema elétrico, através da experiência dos autores, e de orientação dos professores, foi de suma importância para o conhecimento adquirido durante toda faculdade.

Este trabalho tem como referencial teórico, a caracterização dos fenômenos relacionados a qualidade da energia elétrica em geração distribuída. Para isso, foi realizada uma pesquisa bibliográfica e virtual, abordando todos os itens relacionados a geração distribuída, qualidade de energia elétrica, componentes do sistema fotovoltaicos e distúrbios da energia elétrica, destacando suas características, e possíveis problemas que possam acontecer no sistema de energia elétrica. A partir da fundamentação teórica, partiu-se para a etapa de medições e análise de resultados.

O local onde foi realizada a análise, é uma propriedade rural de pequeno com carga tipicamente induvida. O proprietário visando economia de gastos com a eletricidade, realizou a instalação do sistema fotovoltaico. Como o local é longe dos grandes centros, e não possui internet, verificou a necessidade de monitorar a instalação do gerador fotovoltaicos para observar a qualidade de energia gerada e da concessionária.

Como foco, foi abordado os índices de qualidade de energia elétrica, realizou-se as medições durante o período de 14 dias, no intuito de observar o comportamento da energia, verificou-se que no momento de acoplamento do inversor fotovoltaico, o mesmo gera uma quantidade THD de tensão aceitável, dentro dos níveis do PRODIST.

O fator de potência se altera no momento do acoplamento e normaliza depois que o inversor está conectado à rede, se tornando unitário ao longo do dia, sem trazer danos a rede elétrica. Neste caso, características construtivas do inversor podem ser a causa do problema, ou pode ser que ele simplesmente necessite de uma configuração específica para o ajuste do fator de potência, outra opção é a variação devido ao mppt dos inversores que podem gerar este comportamento devido aos componentes eletrônicos, mas não se pode afirmar ao certo.

Há alguns cortes nas medições tanto na corrente quanto na tensão, no mesmo momento, a causa pode ser a princípio por 2 motivos, o primeiro a falha na concessionária, e outro devido a um problema de conexão no ponto de inserção do sistema fotovoltaico, por mal contato o mesmo aquece o conector, que perde momentaneamente o contato com a rede da concessionária, assim o inversor interpreta falta da rede, e fica sem parâmetros e desliga, principalmente no momento de geração do sistema, ocasionando um prejuízo ao proprietário,

a solução e trocar o conector, colocando outro que possa suprir melhor a necessidade no local, sem ocorrer mal contato.

O que traz este trabalho é que o estudo de novas tecnologias é sempre importante para o desenvolvimento técnico de qualquer profissional, principalmente com a velocidade do avanço científico dos componentes, gerando melhor rendimento dos sistemas, especificamente na área de engenharia, e que simulações e testes acerca delas são de total relevância, mesmo que os resultados a serem alcançados sejam previsíveis.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração Distribuída ultrapassa 20 mil conexões**. 2018. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/geracao-distribuida-ultrapassa-20-mil-conexoes/>. Acesso em: 21 fev. de 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**, revisão 6 de 01/03/2016. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo3_Revisao_6%20-%20LIMPO.pdf>. Acesso em: 13 jan. de 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. 2008. Revisão em 01/01/2018. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo8_Revisao_8/9c78cfab-a7d7-4066-b6ba-cfbd3058d19>. Acesso em: 15 mar. de 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa nº 482/2012 de 17 de abril de 2012**. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 10 jan. de 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa nº 493/2012 de 05 de junho de 2012**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012493.pdf>>. Acesso em: 10 fev. de 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa nº 687/2015 de 24 de novembro de 2015**. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 15 fev. de 2018.
- BRASIL, Decreto nº 5.163, de 30 junho de 2004. **Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências**. Disponível em: < <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2004/decreto-5163-30-julho-2004-533148-norma-pe.html> >. Acesso em: 20 abr. de 2018.
- BLUESOL. **Célula fotovoltaica – O guia técnico**, 2017. Disponível em: <<http://blog.bluesol.com.br/célula-fotovoltaica-guia-completo/>>. Acesso em: 15 mar. 2018.
- BLUESOL. **Como funciona as placas fotovoltaicas**, 2018. Disponível em: <<http://blog.bluesol.com.br/placas-fotovoltaicas/>>. Acesso em: 15 mar. 2018.
- CAPELLI, Alexandre. **Energia elétrica: Qualidade e eficiência para aplicações industriais**. São Paulo: Érica, 2013.
- CEMIG. **ND 5.1**. 1989. Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária - Rede de Distribuição Aérea Edificações Individuais.

DECKMANN, S.M; POMILIO, J. A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**, 2017. Disponível em: <<http://www.fee.unicamp.br/dse/antenor/it012>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

DUGAN R.C.; MACGRANAGHAN M.F.; SANTOSO S.; BEATY H.W., *Electric Power Systems Quality*, McGraw Hill 2004.

ELETRICAL ENGINEERING. **Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica**, 2017. Disponível em: <<https://electronics.stackexchange.com/questions/180711/how-does-connecting-different-solar-panels-in-parallel-affect-total-current>>. Acesso em: 18 mar. 2018.

FRONIUS BRASIL, **Inversor Fronius primo 5.0-1**. 2018. Disponível em: <http://www3.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-D20BA94E-D69605D6/fronius_brasil/hs.xsl/7552_10834.htm#.WyKcOVVKjIU>. Acessado em: 26 mai. 2018.

KANASIRO, Paulo Sérgio. ARAÚJO, Marcos Roberto Carneiro. **Tecnologia em Eletrotécnica Industrial**, 2010. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Belém-Pará.

MARTINHO, Edson. Interrupção Momentânea. In: MARTINHO, Edson. **Distúrbios da Energia Elétrica**. São Paulo: Érica, 2012. p. 55-77.

PAULILO, Gilson. **Conceitos gerais sobre qualidade da energia**, 2013. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed84_fasc_qualidade_energia_cap1.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2018.

PINHO, J. T., GALDINO, M.A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**: Rio de Janeiro: Cepel, 2014.

POMÍLIO, J, A. **Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Apostila da disciplina Eletrônica de Potência – Escola de Extensão Unicamp Campinas – SP, 2013. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/>>. Acessado em: 02 abr. 2018.

RAMPINELLI, G. A. **Estudo das características elétricas e térmicas de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede**, 2010. 285 f. Dissertação (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ROCHA, E. J. **Qualidade da energia elétrica**, 2016. Universidade Tecnológica Federal do Paraná UTFPR, Curitiba-Paraná.

SAMLEX SOLAR. *Solar (PV) module, array*. 2018. Disponível em: <<http://www.samlexsolar.com/learning-center/solar-cell-module-array.aspx>>. Acesso em: 16 mar. 2018.

SHENZHEN, Puguang solar energy. **Painel silício amorfo**, 2018. Disponível em: <<https://portuguese.alibaba.com/p-detail/100w-flexible-amorphous-solar-panel-thin-film-flexible-solar-panel-mini-flexible-solar-panel-for-caravan-60191991972.html>>. Acesso em: 18 mar. 2018.

SILVA, Adriano. MUNHOZ, Fernando. CORREIA, Paulo. **Qualidade na utilização de energia elétrica no setor rural: Problema, legislação e alternativas**, 2002. Faculdade de Engenharia Mecânica FEM, UNICAMP, Campinas-São Paulo.

SOLAR BLVD. **Painel monocristalino**, 2018. Disponível em:
<<https://www.solarblvd.com/products/mission-solar-320-watt-24-volt-panel-pallet-of-10/>>.
Acesso em: 17 mar. 2018.

UNIVERSOLAR. **Painel policristalino**, 2018. Disponível em:
<http://universosolar.com/loja/imagens.php?product_id=28 >. Acesso em: 17 mar. 2018.