



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Energia**

**EFEITOS DA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA
REDE ELÉTRICA**

**Autor: Yan Rodrigues Gonçalves
Orientador: Flávio Henrique Justiniano Ribeiro**

**Brasília, DF
2022**





Yan Rodrigues Gonçalves

EFEITOS DA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA REDE ELÉTRICA.

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Henrique Justiniano Ribeiro

**Brasília, DF
2022**



EFEITOS DA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA REDE ELÉTRICA.

Yan Rodrigues Gonçalves

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação dd/mm/aa) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr: Flávio Henrique Justiniano Ribeiro, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Dr.: Augusto Mendonça Brasil, UnB/FGA
Membro Convidado

Prof. Dr.: Luís Filomeno de Jesus Fernandes, UnB/FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2022

Este trabalho é dedicado à minha mãe,
Cíntia Galdino Rodrigues, ao meu avô,
Alírio Pereira Rodrigues, e às minhas
avós, Divina Galdino e Josina Gonçalves,
in memoriam.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me permitir chegar ao final de um curso tão árduo e realizar um sonho cultivado desde a infância.

Agradeço também à minha mãe e ao meu avô, pessoas que sempre estiveram ao meu lado nos momentos de maior necessidade, pelo apoio incondicional na realização desse sonho que é a graduação.

Ao meu pai e padrasto, meus irmãos e à minha família sempre presente, à minha namorada e amigos especiais, agradeço por se fazerem presentes em momentos de alegria e adversidade.

Aos meus professores, em especial, agradeço ao meu orientador, prof. Fábio Henrique, pelo apoio e dedicação com que fui tratado durante todo o tempo de orientação. Trata-se de um profissional e pessoa exemplar.

RESUMO

O trabalho tem por objetivo apresentar os efeitos da microgeração fotovoltaica na rede de distribuição de baixa tensão. A sociedade passa por uma época de preocupações com os impactos ambientais ocasionados pela interferência humana na natureza, e as fontes de energia alternativa surgem como uma saída para conciliar o avanço tecnológico e preservação ambiental. Nesse contexto, surge a geração distribuída, que se destaca por aproximar a fonte de conversão de energia e o consumidor final. Os efeitos da microgeração fotovoltaica na rede de distribuição foram analisados por meio da observação das distorções harmônicas, o fator de potência e a alteração dos níveis de tensão, ocasionados pela conexão desse tipo de sistema à rede das concessionárias. Os parâmetros de comparação para realização da análise foram os estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica do Brasil, que passam pela legislação pertinente ao tema e fiscalização aplicada às concessionárias de energia. Foram realizadas simulações obtidas através da montagem do sistema pelo *software MATLAB/SIMULINK*. Como conclusão, afirma-se que o sistema fotovoltaico é benéfico, por se tratar de uma fonte limpa e renovável de conversão de energia mas pode impactar na qualidade de energia elétrica produzida, e, portanto, são necessários maiores estudos, testes e fiscalização.

Palavras-chave: microgeração fotovoltaica; energia alternativa; *MATLAB/SIMULINK*.

ABSTRACT

This paper presents the effects of photovoltaic microgeneration in the low voltage distribution network. Society is going through a time of concern about the environmental impacts caused by human interference in nature, and alternative energy sources appear as a way out to reconcile technological advancement and environmental preservation. In this context, distributed generation emerges, which stands out for bringing the energy conversion source closer to the final consumer. The effects of photovoltaic microgeneration on the distribution network were analyzed through the observation of harmonic distortions, the power factor and the change in voltage levels, caused by the connection of this type of system to the utility grid. The comparison parameters for carrying out the analysis were those established by the National Electric Energy Agency of Brazil, which pass through the legislation relevant to the subject and inspection applied to energy concessionaires. Simulations obtained through the assembly of the system using the MATLAB/SIMULINK software were performed. In conclusion, it is stated that the photovoltaic system is beneficial, but it can impact the quality of electrical energy produced, and therefore, further studies, tests and inspection are necessary.

Keywords: Photovoltaic microgeneration; alternative energy; MATLAB/SIMULINK.

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BM	Banco Mundial
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CC-CA	Conversor de Corrente Contínua para Corrente Alternada
COP	Conferência das Partes
DHT	Distorção Harmônica Total
DHTi	Distorção Harmônica Total de Corrente
DHTv	Distorção Harmônica Total de Tensão
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FP	Fator de Potência
GDFV	Geração Distribuída Fotovoltaica
Isc	Corrente de Curto Circuito
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PERS	Programa de Energia Renovável
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
UFV	Unidade Fotovoltaica

LISTA DE SÍMBOLOS

F_{DESL}	Fator de deslocamento
F_{DIST}	Fator de Distribuição
GW	Giga Watts
kVA	Kilovate Ampere
kV	Kilo Volts
kW	Kilo Watts
MW	Mega Watts
Voc	Tensão de Circuito Aberto

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz Energética Mundial.....	10
Figura 2 - Diagrama esquemático de um sistema elétrico	13
Figura 3 - Instalação fotovoltaica conectada à rede, instalada em uma residência... 15	
Figura 4 - Representação de uma célula fotovoltaica	16
Figura 5- Conversor Buck	17
Figura 6 - Principais formas de onda do conversor Buck	17
Figura 7- Diagrama elétrico inversor <i>boost</i>	18
Figura 8- Inversor trifásico tipo fonte de tensão	18
Figura 9 - Forma de onda periódica e suas componentes harmônicas.....	20
Figura 10-Gráfico Resultante das formas de ondas periódicas e suas componentes harmônicas.....	21
Figura 11 - Deformação simétrica e assimétrica de onda de acordo com a ordem harmônica.....	21
Figura 12- Formas de onda de uma carga não-linear	24
Figura 13- Comportamento da tensão em função da distância para momentos de carga baixa e alta	25
Figura 14- Comportamento da tensão em função da distância para momentos de carga baixa e alta com elevada geração	26
Figura 15 - Níveis (V) de tensão adequados do PRODIST.	26
Figura 16- Vista de cima do local da Instalação	27
Figura 17- Vista lateral do local da Instalação.....	28
Figura 18- Arranjo de Placas.....	28
Figura 19- Imagem do Inversor da Instalação Modelo	29
Figura 20- Simulação de um circuito fotovoltaico <i>on-grid</i> 75kw.....	29
Figura 21- Arranjo Fotovoltaico do Sistema Modelo.....	30
Figura 22- Arranjo Fotovoltaico do circuito a ser simulado.....	31
Figura 23 - Diagrama do conversor <i>boost</i> do circuito construído.	31
Figura 24- Inversor CC-CA do sistema.	32
Figura 25 - Transformador conectado <i>on grid</i>	33
Figura 26- Bloco de resultados do circuito elaborado.	34
Figura 27- Comportamento da Tensão do Arranjo em Função do tempo	35
Figura 28- Comportamento da corrente do arranjo em função do tempo.....	35
Figura 29- Comportamento da potência do arranjo em função do tempo	36
Figura 30- Curva P-V para os módulos fotovoltaicos	37
Figura 31- Curva I-V com diferentes valores de irradiância	37
Figura 32- Comportamento da tensão do inversor ao conectar a rede elétrica.....	38
Figura 33- Sinal da tensão na saída do inversor (Barramento B2).....	39
Figura 34- Sinal da corrente na saída do inversor (Barramento B2)	39
Figura 35- Distorção harmônica de corrente em B2.....	40
Figura 36 - Distorção harmônica de tensão em B2	41
Figura 37- Sinal da tensão na conexão com a rede (Barramento B1).....	42
Figura 38- Sinal da corrente na conexão com o grid (Barramento B1)	43
Figura 39- Sinal da corrente na conexão com o grid (Barramento B1)	43
Figura 40- DHTi no barramento B1	44
Figura 41 - Resultado THDi no PAC em cada Harmônico	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)	
.....	22
Tabela 2 - Limite DHT de corrente	23
Tabela 3 - Valores fixos de DHTi e DHTv	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Objetivos gerais e específicos	11
1.2	Metodologia	12
2	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA DE BAIXA TENSÃO	13
2.1	Geração Distribuída	13
2.1.1	Microgeração	14
2.2	Sistema Fotovoltaico	15
2.2.1	Painéis fotovoltaicos	15
2.2.2	Conversor elétrico CC-CA	16
2.3	Normas e Requisitos para GDFV	19
3	IMPACTOS NA QUALIDADE DE ENERGIA	20
3.1	Caracterização das Distorções Harmônicas	20
3.1.1	Indicadores de distorção Harmônica	22
3.1.2	Limites de referência das distorções harmônicas	22
3.3	Fator de Potência	23
3.3.1	Limites de referência do fator de potência	24
3.4	Níveis de Tensão	25
3.4.1	Limites de referência dos níveis de tensão	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1	Sistema Fotovoltaico Modelo	27
4.2	Circuito Simulado	29
4.3	Resultados	33
4.3.1	Parâmetros	33
4.3.2	Arranjo fotovoltaico	34
4.3.3	Barramento de medida antes da conexão	38
4.3.4	Barramento na conexão com a rede	41
4.4	Discussões dos resultados	45
5	Conclusão	47
5.1	Trabalhos Futuros	47
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um recurso primordial para a sociedade contemporânea. Sua relevância está diretamente relacionada ao funcionamento do setor industrial e à produção de bens e serviços diversos. Ademais, a energia elétrica é fonte que propicia o convívio social, a difusão de comportamentos, ideias e manifestações culturais, fomenta a globalização e pode servir como um medidor de progresso de países. (ALDABÓ, 2013)

Contudo, em relatório divulgado em 2019 pelo Banco Mundial (BM), agência que faz parte das Nações Unidas e que tem como objetivo principal a redução da pobreza e das desigualdades, afirmou-se que 10% da população mundial ainda não possuía acesso à energia elétrica (G1, 2019). Isso pode se dar em virtude do custo elevado de produção, principalmente em locais remotos e países pobres, ou pela dificuldade na transmissão e distribuição da energia produzida.

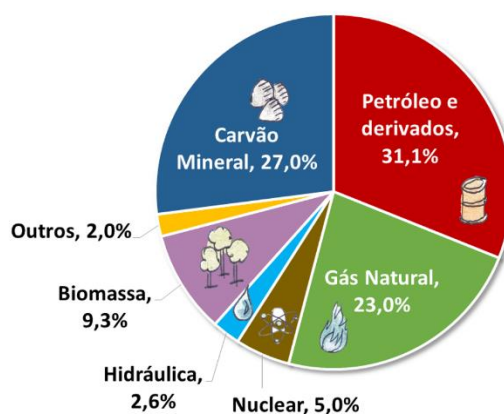
Atualmente, a busca por novas fontes de energia tenta conciliar seus avanços com medidas socioambientais de reparação de danos, tais como a redução da emissão de poluentes na atmosfera terrestre. Essas medidas começaram a ser ratificadas mundialmente por acordos e protocolos entre os países, tais como o Protocolo de Kyoto, assinado em 1997, por meio do qual a maioria dos países do globo se comprometeu a reduzir suas emissões para amenizar os efeitos do aquecimento global. (FERNANDES, 2021)

No ano de 2021, a Organização das Nações Unidas (ONU) realizou a 26ª Conferência das Partes (COP), para avaliar as principais mudanças climáticas no planeta e propor mecanismos para o desenvolvimento sustentável dos países. Um dos objetivos do evento foi garantir que os principais líderes mundiais se comprometessem a reduzir drasticamente a emissão de gases nocivos à Terra até 2030.

Verifica-se na Figura 1, que os países estão buscando a substituição das suas fontes poluentes que representam a maior porcentagem da matriz elétrica mundial por energia mais limpa e renovável, como a energia eólica e solar, ainda que represente apenas 2% da produção mundial de energia, conforme levantamento feito pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021). A esse respeito, cita-se como exemplo a Alemanha, que está desativando suas usinas nucleares sob a justificativa de alto

custo monetário e operacional, além do risco que essa fonte de geração representa. A substituição dos veículos movidos a combustão por veículos elétricos também é um exemplo de ações alternativas com impacto socioambiental.

Figura 1 - Matriz Energética Mundial



Fonte: EPE (2021)

No cenário de buscas por soluções de produção de energia alternativa e renovável, surge a fonte solar de conversão de energia. A luz proveniente do Sol é sintetizada através de placas e convertida em energia limpa, renovável, e considerada de baixo custo se comparada a outras fontes, além de causar um impacto ambiental mínimo ao meio ambiente. (PORTAL SOLAR, 2022).

Essa fonte de geração de energia se apresenta em duas formas: *off-grid*, os sistemas instalados são independentes, ou seja, não conectados à rede elétrica. Essa fonte é usada comumente em locais onde não se tem acesso à rede ou se está muito distante. Outra forma é o *on-grid*, que são sistemas conectados na rede elétrica e que fazem parte da geração distribuída, e o excedente de energia produzido é injetado na rede. Esse excedente, dependendo da regulamentação do país, pode retornar em forma de créditos ao gerador, ou até monetizado financeiramente. (PORTAL SOLAR, 2022)

As vantagens desse tipo de conversão de energia, além do mínimo impacto no meio ambiente, é que se trata de uma conversão limpa, silenciosa, de baixa manutenção e facilidade de instalação, e que pode ser utilizada em áreas remotas ou isoladas da rede elétrica. Contudo, existe um alto custo de aquisição, pois não há geração após o pôr do Sol, e isso pode gerar impacto negativo na rede elétrica e na qualidade da energia. (PORTAL SOLAR, 2022).

Segundo dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), divulgados pela Revista Exame, o Brasil atingiu em março de 2022 a marca de 14 gigawatts (GW) de potência operacional, contando as usinas de grande porte e os sistemas de geração própria de pequenos consumidores de energia. Com esse avanço, o governo federal promulgou a Lei nº. 14.300/2022, de 6 de janeiro de 2022 que institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). (BRASIL, 2022).

A nova legislação é vista como uma garantia, tanto para os geradores quanto para os distribuidores de energia, que viam o aumento da energia solar como uma possível ameaça para seus negócios, já que antes da referida Lei vigorava a Resolução Normativa nº482, de 17 de abril de 2012, que em seu texto garantia a compensação de 1 para 1, ou seja, a cada kwh produzido era abatido um kwh consumido (BRASIL, 2012). Já para os geradores, o novo dispositivo legal garante mais segurança em relação ao investimento feito por um longo prazo e a mudança de uma resolução normativa para um projeto de lei, o que em tese, assegura de forma mais concisa os direitos do consumidor.

Diante do exposto, percebe-se que o crescimento da energia solar pode trazer benefícios, por se tratar de uma energia limpa e renovável, mas também preocupações para as distribuidoras de energia. No Brasil, a concessão da rede é realizada por meio de licitação e posterior contrato firmado com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Cabe à distribuidora, seguir regras de distribuição e se preocupar com a rede e a qualidade da energia fornecida, sendo fiscalizada por órgão competente, com isso é importante avaliar as vantagens e os impactos trazidos pela geração distribuída.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais e específicos

Em relação aos objetivos do trabalho, trata-se de um estudo para mostrar o efeito causado por conexões de sistemas fotovoltaicos *on-grid* na rede de alta tensão. De forma geral, destaca-se a necessidade de novas fontes de energia que equilibrem os avanços da exploração e da evolução tecnológica com medidas socioambientais de reparação de danos, tais como a redução da emissão de poluentes na atmosfera

terrestre, buscando uma análise de fontes de qualidade e que agreguem valor para o consumidor final e também para a fonte geradora, com a evolução de práticas de distribuição alternativa para viabilizar o acesso à energia.

Em específico, objetiva-se analisar a distorção harmônica causada na rede por um sistema fotovoltaico *on-grid* instalado e em operação, e diante disso concluir se tal sistema está em conformidade com as normas estabelecidas pela ANEEL.

1.2 Metodologia

A metodologia consiste em uma revisão bibliográfica em materiais pertinentes ao assunto e de valor acadêmico-científico, levantamento de conceitos importantes, tais como o de geração distribuída, microgeração e distorção harmônica. Serão caracterizados os equipamentos fotovoltaicos do sistema *on-grid*, relevantes na análise do efeito da distorção harmônica observada.

Ressalta-se que a análise se baseia nos parâmetros estabelecidos pela ANEEL para a qualidade de energia em território nacional, além da consulta em documentos oficiais legisladores do tema, dados quantitativos comprovados e estudos acadêmicos pretéritos.

Após a elaboração do levantamento teórico, será montado um circuito fotovoltaico conectado, através do programa *MATLAB/SIMULINK*. O qual foi baseado em um sistema modelo fotovoltaico conectado à rede elétrica, consistindo em um sistema de geração distribuída de 75kW, máxima potência de um sistema de micro geração, segundo ANEEL. Ele está gerando energia, e o autor participou de todas as fases de implantação, devido a isso, o motivou a realizar estudo específico da sua operação e impacto na rede elétrica causado.

Com isso, através de simulações de seu funcionamento disponibilizadas pelo *software* serão obtidos resultados para a elaboração das conclusões finais, e que visam atender aos objetivos específicos contidos no tópico anterior.

2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA DE BAIXA TENSÃO

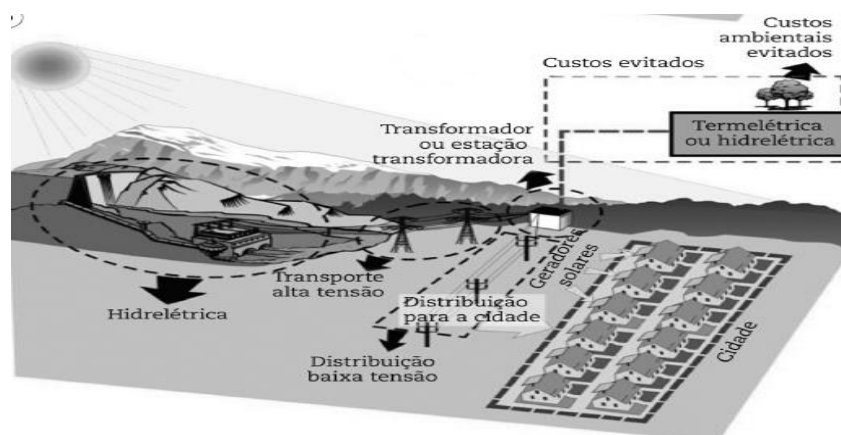
O capítulo traz uma reflexão acerca dos conceitos de geração distribuída e microgeração, dos elementos básicos de um sistema fotovoltaico, e como desempenham o papel de converter a luz solar em energia efetiva elétrica. A geração distribuída é explicada como a produção energética próxima ao mercado consumidor, sendo diferente do modelo centralizado, em que a energia é produzida em apenas um local e distribuída para as fontes consumidoras.

2.1 Geração Distribuída

No Brasil, o Decreto nº5.163/04 conceitua como geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de permissionários, agentes concessionários ou autorizados, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador. A exceção se faz às hidrelétricas com capacidade instalada superior a 30MW e as termelétricas, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a 75%. (BRASIL,2004). As vantagens estão no aumento de oferta energética em relação à grande necessidade do país próxima às áreas demandadas, suprimindo o consumo através de empreendimentos energéticos de pequeno e médio porte, que tem custo de operação menor e instalação rápida.(ZILLES, et al. 2012).

Ressalta-se que a geração distribuída diminui os custos de distribuição, por meio da redução de longas redes e indução da utilização de novas fontes de energia, principalmente as renováveis, dirimindo os impactos ambientais. (LUCCHESI, et al, 2018). A geração distribuída fotovoltaica é alternativa de aumento da oferta energética, com custos ambientais evitados e economia de investimentos em construção de linhas de transmissão e distribuição. (ZILLES, et al. 2012).

Figura 2 - Diagrama esquemático de um sistema elétrico



Fonte: ZILLES, et al. (2012)

Já as desvantagens referem-se ao alto valor agregado dessas novas tecnologias no Brasil, a falta de uma definição concreta de regras de instalação e de distribuição, e questões de segurança de usuários e instaladores. Outro ponto a se destacar é que a injeção dessas fontes na rede pode provocar perda de potências e níveis de tensão indesejáveis, indo contra o que foi estabelecido pela ANEEL. (LUCCHESI, et al, 2018).

Como esse trabalho faz um estudo do efeito fotovoltaico de um sistema conectado a rede, é pertinente apresentar um recorte temático na geração distribuída e explicar sobre a microgeração.

2.1.1 Microgeração

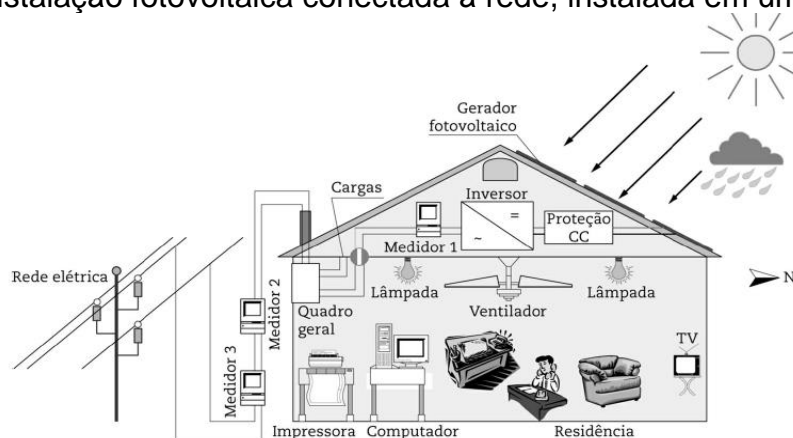
Segundo a Resolução Normativa nº. 482/12 que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, a microgeração de energia é estabelecida para centrais geradoras de energia elétrica com potência menor ou igual a 75 kW, e o excedente de energia produzido ficará disponível ao gerador como forma de crédito.

Essa forma de geração pode ser proveniente dos mais variados tipos de geração de energia, tais como a eólica, solar, hidráulica, biomassa ou cogeração qualificada. O consumidor passa a se tornar também gerador, tanto residencial como comercial, e o excedente desse tipo de geração, fica “armazenado” em forma de créditos pela concessionária, podendo ser utilizado pelo consumidor em ocasião futura, sob regras definidas pela legislação vigente.

2.2 Sistema Fotovoltaico

Após apresentar o conceito de microgeração definido em território nacional, cabe a apresentação dos elementos que compõem o sistema solar, e que influenciarão na análise deste trabalho. Para demonstrar o que será desenvolvido, a Figura 3 demonstra um diagrama esquemático e um sistema solar *on grid*, sistema que será o analisado por este trabalho.

Figura 3 - Instalação fotovoltaica conectada à rede, instalada em uma residência



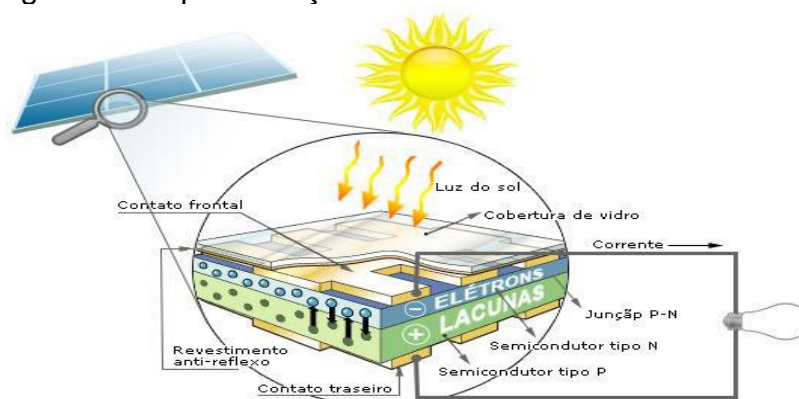
Fonte: ZILLES, et al. (2012)

2.2.1 Painéis fotovoltaicos

Os painéis, módulos ou gerador fotovoltaico são os principais equipamentos responsáveis pela captação da energia proveniente do Sol, e são compostos por um conjunto de células associadas em série ou em paralelo. O conjunto desses painéis forma o gerador fotovoltaico, e a quantidade desses painéis multiplicados pela sua potência define a potência do gerador de energia solar.

O elemento químico mais utilizado para a produção das células é o silício (Si), por ser um semicondutor de 14 elétrons em seu núcleo. Contudo, apenas os últimos elétrons que estão na camada de valência podem ser compartilhados, e apresentam um papel importante no efeito fotovoltaico que se caracteriza pelo fato de que o Si possui dois semicondutores (tipo-N, positiva, e tipo-P, negativa), que, se expostos à irradiação solar, promovem um fluxo no sentido do semicondutor que possui elétrons em excesso para o que possui lacunas a mais, criando assim, um campo elétrico na junção.(SILVA, 2014).

Figura 4 - Representação de uma célula fotovoltaica



Fonte: SILVA (2014)

O rendimento elétrico dos módulos é determinado através da capacidade que o material tem de absorver energia de fótons sobre uma área determinada. É calculado através da fórmula representada abaixo:

$$\eta = \frac{\text{Potência elétrica na saída}}{\text{Potência elétrica na entrada}} \quad (1)$$

A associação das placas solares pode se dar tanto em série, em que o terminal positivo é ligado ao terminal negativo do outro equipamento, e assim sucessivamente, quanto em paralelo, quando o terminal positivo dos módulos é ligado, entre si, e o mesmo ocorre nos terminais negativos.

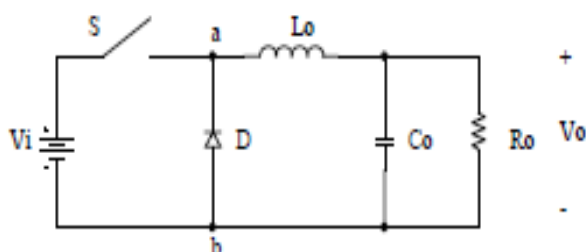
2. 2. 2 Conversor elétrico CC-CA

Por sua vez, o conversor elétrico tem papel fundamental na conversão da energia proveniente das placas para os aparelhos elétricos e têm a capacidade de inverter a tensão ou corrente CC proveniente dos módulos fotovoltaicos, em CA, e posteriormente, o mesmo sinal passará por um filtro harmônico. Com isso, o equipamento tem como principal funcionalidade sincronizar a corrente proveniente dos painéis com a tensão disponibilizada pela rede de conexão. (BIM,2014)

O inversor deve ser capaz de fornecer uma corrente ou uma tensão de qualidade aceitável, ou seja, em conformidade com as normas pertinentes. Quando o inversor estiver conectado a uma rede CA, dado que a tensão é definida pelo sistema, o conversor é responsável pela injeção (ou absorção) de corrente e, conseqüentemente, de potência na rede. (POMÍLIO, 2013).

Os conversores *Buck* se caracterizam por abaixar a tensão, com uma entrada em tensão e saída em corrente. A Figura 5 mostra o diagrama elétrico deste tipo de conversor.

Figura 5- Conversor Buck

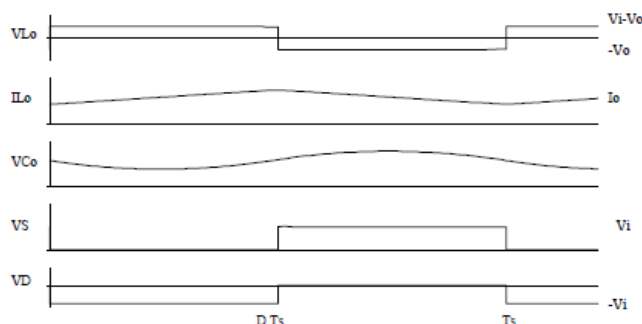


Fonte: PETRY (2001)

Para descrever o seu funcionamento, dividiu-se a corrente em duas etapas, quando a chave *S* está aberta, conduzindo, a corrente circula por *Lo* e pela saída. Nesta etapa, *Vi* (fonte) fornece energia para a saída e para a magnetização do indutor *Lo*. Quando a chave *S* está bloqueada, no instante de sua abertura, o diodo *D* entra em condução. Assim, a energia do indutor é transferida para carga, ou seja, o indutor é desmagnetizado. (PETRY,2001).

Este tipo conversor tem como principal característica diminuir a tensão na saída, ter boa qualidade na corrente de saída e ter corrente descontínua na entrada. Possui três modos de operação, condução contínua, condução descontínua e condução crítica, e formas de onda de *V* e *I* destacam-se.

Figura 6 - Principais formas de onda do conversor Buck

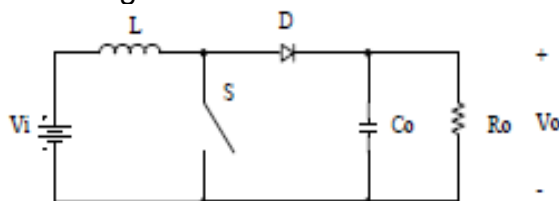


Fonte: PETRY (2001)

Sobre o inversor *boost*, se trata de um conversor que eleva a tensão, tem entrada em corrente, e saída em tensão. O diagrama elétrico mostra que com o conversor *boost*, o funcionamento se dá em duas etapas, quando a chave (*S*) está conduzindo, o indutor (*L*) é magnetizado, e assim, a fonte (*Vi*) fornece energia ao indutor. E quando *S* está bloqueado, o diodo (*D*) entra em condução, e logo depois,

V_i e L fornecem a energia na saída, e assim, a tensão na carga aumenta. (PETRY, 2001).

Figura 7- Diagrama elétrico inversor *boost*

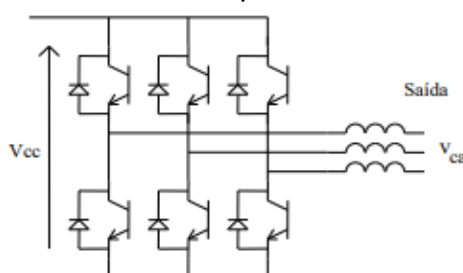


Fonte: PETRY (2001)

Suas características principais são: aumentar a tensão na saída, e a corrente nesse local se apresentar de forma descontínua, além de ter uma boa qualidade na corrente de entrada. A forma de onda formada por esse tipo de conversor se assemelha à onda do conversor *buck*, e é esse tipo de conversor que será utilizado no lado CC das simulações deste trabalho. (PETRY,2001).

Para este trabalho, será utilizado um inversor CC-CA trifásico tipo fonte de tensão.

Figura 8- Inversor trifásico tipo fonte de tensão



Fonte: PETRY (2001)

O funcionamento se passa quando tem uma fonte de tensão no lado CC, no caso estudado o arranjo de células fotovoltaicas, quando o interruptor da semiponte superior e o da semiponte inferior estiverem em condução, a tensão CC aparecerá em um par de condutores de saída alternada. A conexão tem que ser feita, obrigatoriamente, por meio de indutores que permitem limitar a corrente em casos em que a tensão V_{ca} é diferente de V_{cc}

Para que o controle da corrente no lado CA se estabeleça, é necessário que a tensão V_{cc} seja maior que o valor do pico das tensões de linha do lado CA. Já os diodos presentes garantem o sentido bidirecional no sentido da corrente.

2.3 Normas e Requisitos para GDFV

Estabelecido pela Resolução Normativa n.º 956/21, os Procedimentos de Distribuição (PRODIST), são documentos elaborados pela ANEEL que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica, e dispostos em módulos.

Dentre eles destaca-se o Módulo 3, referente aos parâmetros para estabelecer as conexões ao sistema de distribuição de energia elétrica, em específico, a sessão 3.1, na qual são abordados os requisitos necessários para a conexão de micro e mini geração distribuída.

No Módulo 8, se determina a qualidade da energia elétrica da rede, e apresenta os seguintes parâmetros: tensão de regime permanente; fator de potência; harmônicos; desequilíbrios de tensão; flutuação de tensão; variação de tensão de curta duração; variação de frequência. Além disso, estabelece valores para essas determinadas variáveis, para que se possa manter a qualidade de energia elétrica, verificada através de fiscalização da ANEEL.

No próximo capítulo serão abordados os impactos de energia elétrica decorrentes, principalmente, de distorções harmônicas e que provocam impacto na QEE, e que serviram de fundamentação teórica para a elaboração deste trabalho. Além disso, serão apresentados os valores de referência contidos em cada uma dessas normas e módulos para se comparar com os resultados das simulações realizadas para medir a QEE de um sistema de microgeração.

3 IMPACTOS NA QUALIDADE DE ENERGIA

3.1 Caracterização das Distorções Harmônicas

As distorções harmônicas são fenômenos associados às deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal de frequência fundamental. Segundo o matemático francês Jean- Baptiste Joseph Fourier, qualquer forma de onda periódica não senoidal, de frequência f_0 , pode ser decomposta pela soma de uma componente contínua e uma série de infinitos termos senoidais, cujas frequências destes termos são múltiplas de f_0 . Assim, o termo f_0 é denominado de frequência fundamental, e os termos de frequências múltiplas, são denominados por frequências harmônicas. (FORTES, 2018).

Com isso, uma função periódica $f(t)$ pode ser decomposta a seguir:

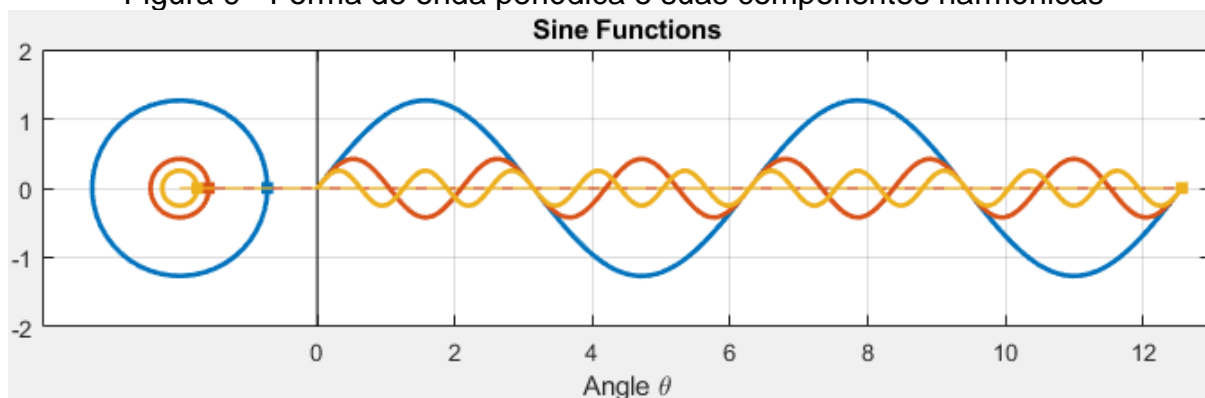
$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [(A_n \cos(n \cdot wt)) + (B_n \text{sen}(n \cdot wt))] \quad (2)$$

Onde: $A_{(0)}$ é a componente contínua, $A_{(n)}$ e $B_{(n)}$ são as componentes de enésima ordem, wt é o deslocamento angular dado por $2\pi f_0 t$ (rad).

Essa distorção se apresenta como o fator degradante da qualidade do sinal de tensão da rede, porque deforma a onda, afetando as cargas, medições, e, por consequente, a eficiência do sistema e, dependendo da frequência dos harmônicos, os sinais de dados que são transmitidos perto ou no próprio condutor com harmônicos.

Na Figura 9, é possível ver uma forma de onda periódica não perfeitamente senoidal e algumas de suas componentes harmônicas.

Figura 9 - Forma de onda periódica e suas componentes harmônicas

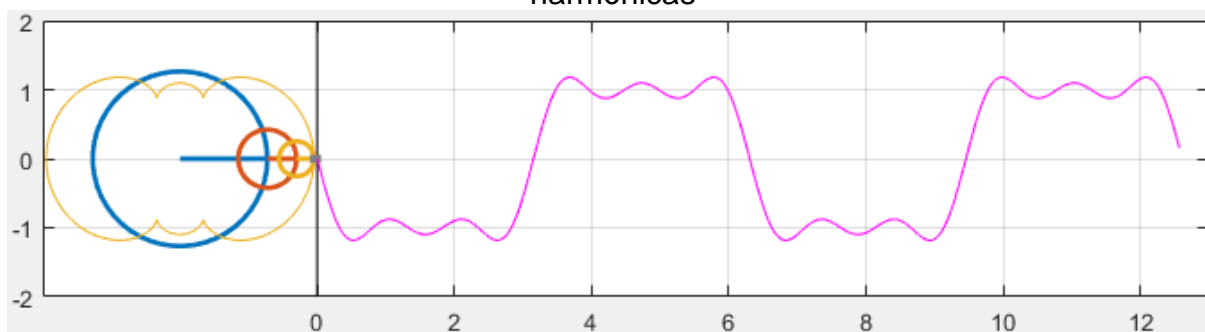


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Conforme indicado na equação e observado na figura, as componentes harmônicas senoidais quando somadas entre si são capazes de representar formas

de ondas resultantes não senoidais. (CASTRO, 2019). Onde o 3º harmônico está representando pela forma de onda na cor vermelha, o 5º harmônico representado pela cor laranja, e o harmônico fundamental o de cor azul. No outro gráfico observa-se a resultante.

Figura 10-Gráfico Resultante das formas de ondas periódicas e suas componentes harmônicas

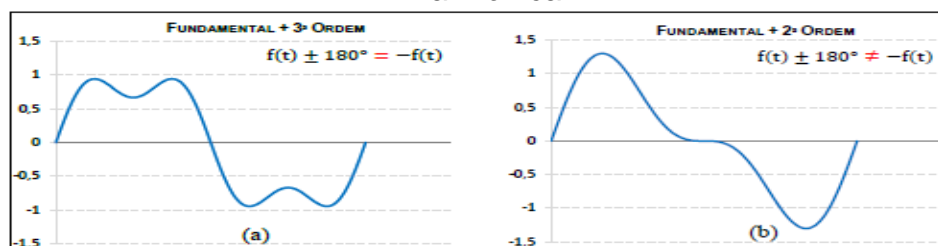


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Conforme esclarece Castro (2019) e Fortes (2018), em instalações elétricas em corrente alternada, é comum encontrar a presença majoritária de harmônicos de ordem ímpar, e isso ocorre, pois o comportamento da maioria das cargas é o mesmo em ambos os semiciclos, seja ele positivo ou negativo de forma de onda. Sendo assim, os períodos de condução são considerados iguais para a grande maioria das cargas, causando deformações simétricas nas harmônicas de ordem ímpar, representadas pela Figura 11-a.

Já as harmônicas pares, representadas pela Figura 11-b, se apresentam no sistema elétrico com menos intensidade e produzem assimetrias de meia onda. Seu aparecimento, por exemplo, é ocorrência de falha de sincronismo no chaveamento dos conversores de potência, transitórios durante energização de transformadores, assim esclarece os mesmos autores.

Figura 11 - Deformação simétrica e assimétrica de onda de acordo com a ordem harmônica



Fonte: FORTES (2018)

3.1.1 Indicadores de distorção Harmônica

A distorção harmônica, como visto, pode ser caracterizada por sua distribuição ao longo do espectro, com a magnitude e/ou fase de cada componente harmônica. O nível da distorção harmônica também pode ser representado através de um número, a Distorção Harmônica Total (DHT), a qual representa percentualmente o desvio da forma de onda distorcida em relação a uma onda puramente senoidal.

A DHT pode ser calculada tanto para a corrente quanto para tensão através da equação 3 onde A_1 é a componente fundamental de tensão ou corrente e A_n as componentes harmônicas. (NETO, 2016).

$$\frac{\sqrt{(A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + \dots + A_n^2)}}{A_1} \quad (3)$$

Semelhante à distorção harmônica total, a Demanda Total de Distorção (DTD) é calculada pela demanda de corrente contínua máxima do sistema ou corrente nominal, e é utilizada para analisar a distorção da corrente. Trata-se de um parâmetro fixo durante toda análise, e se caso possuir valores altos é interpretada como elevada circulação de harmônico na instalação. Pode ser calculado pela fórmula:

$$DTD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} I_h^2}}{I_l} \quad (4)$$

Onde, h é ordem do harmônico, I_h é a corrente do harmônico e I_l é a demanda máxima de corrente ou corrente nominal.

3.1.2 Limites de referência das distorções harmônicas

Segundo o Módulo 8 do PRODIST, os limites esboçados pela tabela abaixo, correspondem ao máximo valor desejável em que pode ser observado a distorção harmônica total de tensão no sistema de distribuição

Tabela 1 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)

Indicador	Tensão Nominal		
	Vn<1,0kV	1,0kV<Vn<69kV	69kV<Vn<230kV
DHT	10,00%	8,00%	5,00%

Fonte: (Adaptado, PRODIST MÓDULO 8)

Para a DHT de corrente, utilizou-se como base normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 16.149/2013 que informa que a DHT total da corrente de saída do sistema fotovoltaico deve ser inferior a 5% da corrente

fundamental em condições nominais de operação. E cada componente harmônica individual deve ser limitada a valores apresentados na Tabela 2:

Tabela 2 - Limite DHT de corrente

Harmônicas Impares	Limite DHT
3°-9°	4,0%
11°-15°	2,0%
17°-21°	1,5%
23°-33°	0,6%
Harmônicas Pares	Limite DHT
2°-8°	1,0%
10°-32°	0,5%

Fonte: (ABNT NBR 16.149/2013)

3.3 Fator de Potência

Para definir o fator de potência, analisam-se os circuitos em C.A, puramente resistivos, nestes circuitos as ondas de tensão e de corrente elétrica encontram-se em fase, ou seja, em sincronia. Quando tem cargas não resistivas presentes, como os capacitores e indutores, existe o armazenamento de energia na forma de campo elétrico ou magnético, o que leva a uma defasagem na tensão ou na corrente, dependendo do tipo da carga. (SOUZA, 2016)

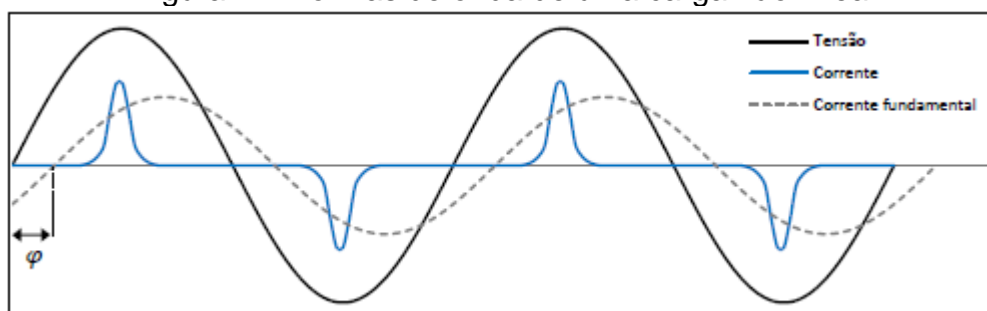
A defasagem exposta está ligada com a potência ativa, que é a energia que foi transformada em trabalho, e a potência reativa, que é a energia que foi armazenada nos campos elétricos e magnéticos.

Assim, o Fator de Potência (FP) é dado pela parcela de potência aparente complexa(S), que se trata da soma de potência ativa (P) e potência reativa (Q) que foi transformada em trabalho.

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{P}{S} \quad (5)$$

Fato importante a ser observado, é que quando expostas a presença de harmônicos as grandezas elétricas do sistema não mais se comportam como funções senoidais. Isso estabelece desvios entre o fator de potência da expressão acima, e o $\cos \varphi$, que é a defasagem angular entre tensão e corrente relativas à componente fundamental, conforme representando na figura a seguir. (CASTRO 2019, FORTES 2018)

Figura 12- Formas de onda de uma carga não-linear



Fonte: FORTES (2018)

Com isso, podemos calcular o fator de potência não só mais pela fórmula anterior, mas também por:

$$FP = F_{DESL} \cdot F_{DIST} \quad (6)$$

Sendo, $\cos \varphi$ representado pelo fator de deslocamento (F_{DESL}), e o fator de distorção (F_{DIST}) que é igual a $\frac{1}{\sqrt{1+THD_i^2}}$. Assim, o FP, fica:

$$FP = \frac{\cos \varphi}{\frac{1}{\sqrt{1+THD_i^2}}} \quad (7)$$

Tendo THD_i como a taxa de distorção harmônica total de corrente, sendo indicada por um percentual.

3.3.1 Limites de referência do fator de potência

Segundo o Módulo 8 do PRODIST, o controle do fator de potência deve ser efetuado por medição permanente e obrigatória, e a distribuidora deve manter em meio eletrônico os resultados pelo mínimo de 10 anos. O FP 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.

Contudo, apesar desses valores indicados, um FP acima de 0,92 indica o uso eficiente do sistema elétrico, e dependendo do ponde de medição, o fator de potência de uma unidade consumidora pode reduzir para valores abaixo de 0,92, com o FP da carga permanecendo acima de 0,92, o que não indica um mau uso do sistema e pode até significar o contrário. (NETO, 2016).

Inicialmente, os sistemas fotovoltaicos eram projetados para injetar potência na rede com FP unitário. Porém, com a grande quantidade de sistemas fotovoltaicos que foram instalados em países com programas de incentivo, alguns problemas de

sobretensão da rede foram verificados e considerou-se a possibilidade dos inversores de trabalhar com *FP* diferente da unidade, a fim de utilizar a potência reativa para o controle de tensão da rede. (GUSMAN, 2018).

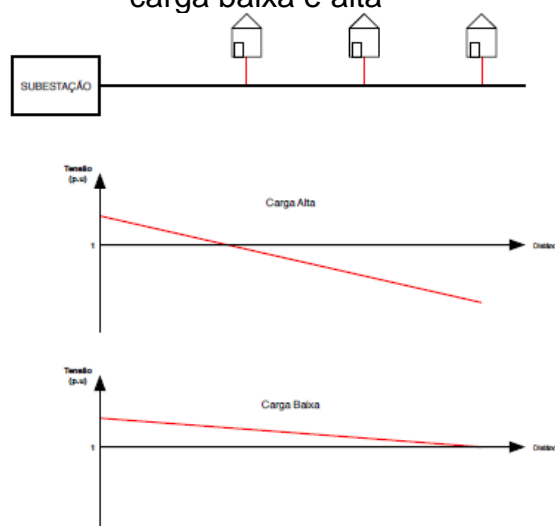
Definido o *FP*, o próximo tópico terá com finalidade abordar os níveis de tensão estabelecidos, e como isso pode afetar na qualidade da energia elétrica da rede.

3.4 Níveis de Tensão

Nos sistemas radiais de geração, aqueles na qual a alimentação é feita apenas por uma extremidade, quando não tem geração distribuída o fluxo de potência se dá no sentido da subestação carga, sendo a queda de tensão dada no mesmo sentido. Com isso, o comportamento da tensão da rede será em função principalmente da carga.

Quando a carga estiver baixa, a tensão da rede no ponto de conexão estará moderadamente, alta e quando a carga estiver alta ocasionará o inverso. A Figura 13 demonstra o comportamento da tensão em função da distância para os momentos citados.

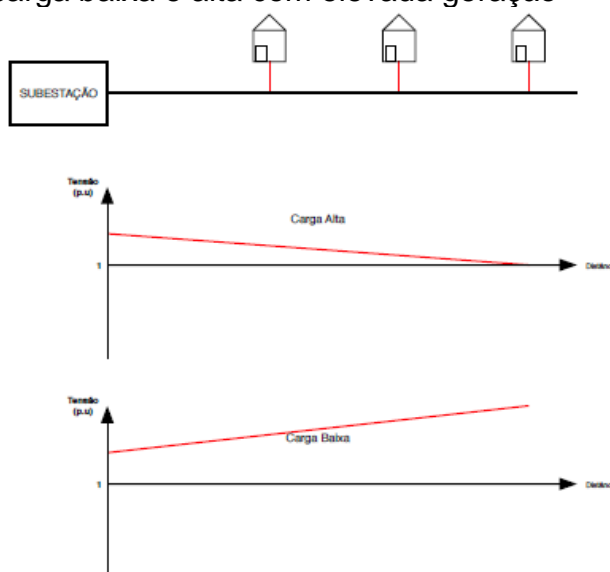
Figura 13- Comportamento da tensão em função da distância para momentos de carga baixa e alta



Fonte: NETO (2016)

Já para os sistemas radiais com geração distribuída, o fluxo pode se dar no sentido subestação carga e no sentido carga subestação, gerando queda de tensão em ambos. Para esse arranjo, o comportamento será em função da carga e da geração, diferente do sistema anterior, quando se encontrar em carga baixa e alta geração, a tensão no ponto de conexão estará relativamente alta, mas em momentos de carga e geração alta, não ocorrerá o contrário.

Figura 14- Comportamento da tensão em função da distância para momentos de carga baixa e alta com elevada geração



Fonte: NETO (2016).

3.4.1 Limites de referência dos níveis de tensão

Por se tratar de um componente importante para a verificação da qualidade de energia na rede, e ser alvo de fiscalização por parte da ANEEL, os níveis de tensão da rede elétrica de distribuição são constantemente monitorados por parte das distribuidoras. Segundo o Módulo 8 do PRODIST de 2014, a tensão da rede no Brasil deve ser mantida dentre uma faixa adequada

Figura 15 - Níveis (V) de tensão adequados do PRODIST.

Nível de Tensão	Tensão Mínima	Tensão Máxima
220/127	201/116	231/133
380/220	348/201	396/231
440/220	402/201	458/229
220/110	201/101	229/115
254/127	232/116	264/132
208/120	196/113	229/132
230/115	216/108	241/127
240/120	216/108	254/127

Fonte: ANEEL (2014)

Uma vez realizada a análise do que será discutido após as simulações, o próximo tópico trará o circuito a ser simulado e as discussões iniciais feitas antes da realização das simulações e obtenção dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, será apresentado o circuito utilizado para a realização das simulações e as discussões iniciais acerca do objeto de estudo do trabalho.

4.1 Sistema Fotovoltaico Modelo

O sistema fotovoltaico que serviu de modelo para a elaboração deste trabalho, consiste em uma instalação feita na cidade de Catalão - GO, onde o proponente participou de todas as etapas, desde a finalização da venda até a montagem, e as configurações finais após vistoria da concessionária de energia, por exercer um cargo de Supervisor de Operações na empresa que fora contratada para realizar o projeto.

A instalação, está localizada às margens da BR-050, e é conhecida como “Fazenda Samambaia”. O local, de propriedade de um produtor de soja da região, abriga silos para a estocagem de sementes, como pode ser observado na imagem a seguir, e foi escolhido para a instalação da UFV por ter espaço suficiente disponível. Os créditos produzidos pela geração podem ser abatidos em outras unidades consumidoras, segundo as normas da Resolução 482/2012 da ANEEL.

Figura 16- Vista de cima do local da Instalação



Fonte: Google Maps

Figura 17- Vista lateral do local da Instalação



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

A usina montada sobre o solo, conta com 240 painéis de 400W de potência da marca Jinko solar, como especificado na parte 1 do diagrama unifilar anexado ao apêndice anexado, distribuídos igualmente em estruturas de fixação conhecidas popularmente como “bandejas” e fixadas por estacas concretadas ao solo. A imagem do local mostra a distribuição dos painéis da instalação em questão.

Figura 18- Arranjo de Placas



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

O inversor da instalação é um Growatt, o modelo é MAX 75KTL3-LV de 75kW de potência, conforme exposto na parte 1 do apêndice, o que caracteriza o sistema no limite de micro geração, motivo que sancionou a escolha desse sistema como modelo para elaboração do trabalho.

Figura 19- Imagem do Inversor da Instalação Modelo



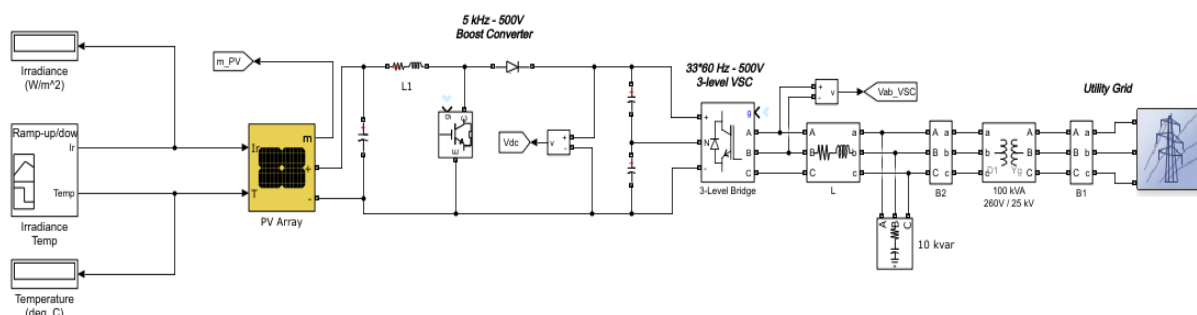
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Baseado nas características principais da instalação modelo, foi utilizado o MATLAB/SIMULINK para elaboração da simulação e análises dos parâmetros desejados, o que será descrito no próximo tópico.

4.2 Circuito Simulado

O circuito utilizado para as simulações foi elaborado pelo *software* MATLAB/SIMULINK e adaptado conforme o modelo da instalação descrita, tornando-se objeto de estudo deste trabalho. Na Figura 20, mostram-se todos os componentes, parâmetros e conexões do sistema fotovoltaico *on-grid* em que será elaborada a simulação.

Figura 20- Simulação de um circuito fotovoltaico *on-grid* 75kw.

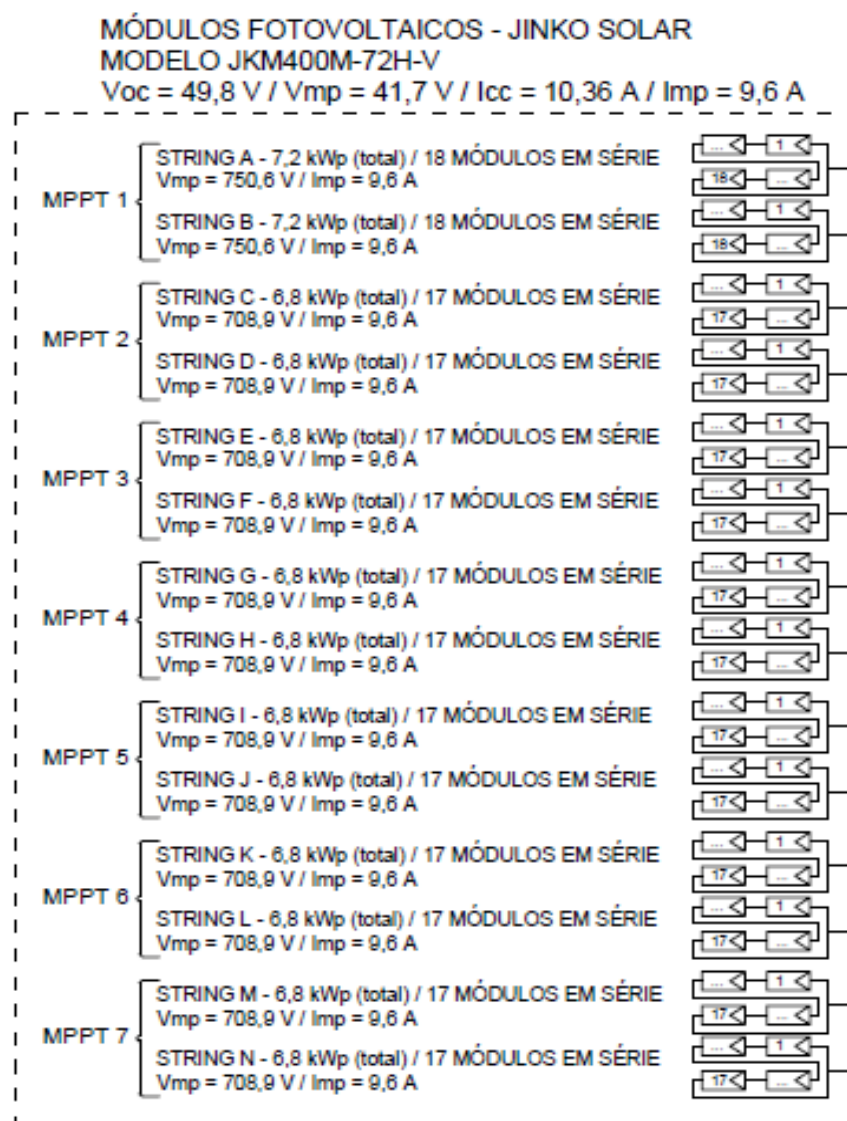


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Para entender melhor o circuito, o arranjo fotovoltaico está representado pela figura abaixo. Serão utilizadas placas de 400 W de potência ativa, distribuídas em um conjunto de 7 *strings*, esse arranjo é inspirado no diagrama unifilar da instalação modelo, contido no apêndice, e mostrado na Figura 21. A instalação, apesar de contar

com um inversor de 75 kW, apresenta potência total de módulos de 100 kW, e como o objeto de estudo do trabalho tem microgeração com o limite de 75 kW, o sistema em questão irá ser adaptado para determinada potência.

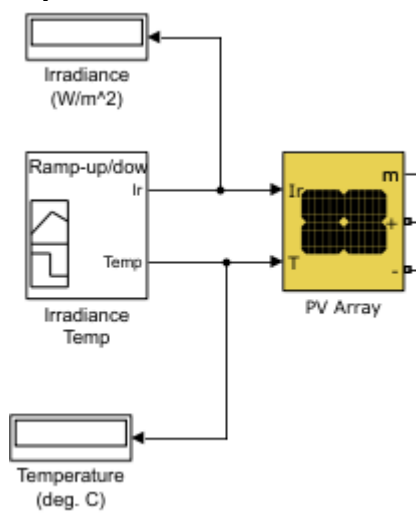
Figura 21- Arranjo Fotovoltaico do Sistema Modelo



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Na simulação, o arranjo fotovoltaico, está representado pela Figura 22, onde o arranjo de placas, “*PV Array*” está sendo alimentado por uma irradiância solar, definida em 1000 W/m^2 , e uma temperatura ambiente, com limite estabelecido de 50°C .

Figura 22- Arranjo Fotovoltaico do circuito a ser simulado



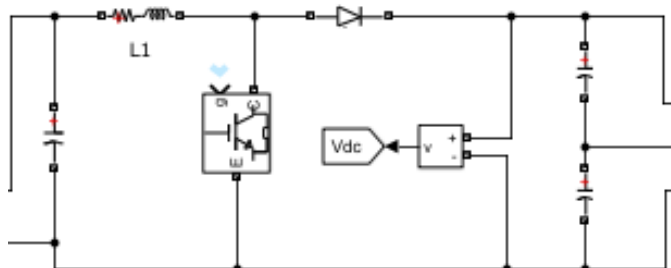
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

A quantidade de módulos que compõem o sistema será definida através da aplicação da fórmula a seguir, onde já se conhece a potência do sistema (75kW), a potência das placas (400W), e a quantidade de placas por *string* (ANEEL, 2021), sendo assim, obtém-se 26 módulos por *string*, resultando em um total de 245 módulos:

$$\text{Potenciado sistema} = \text{Potência das placas} * \text{Qtidade de módulos por string} * \text{Qtade de strings. (8)}$$

O conversor utilizado no lado CC, conectando ao arranjo dos módulos na entrada, e ao inversor na saída, será do tipo *boost* com 500 V de tensão e frequência de 5 kHz, como mostrado na Figura 23. Ele possui indutores, capacitores, um diodo, que se trata de um dispositivo semicondutor controlado por sua própria tensão e corrente, e um bloco do *software* que mede a tensão instantânea.

Figura 23 - Diagrama do conversor boost do circuito construído.



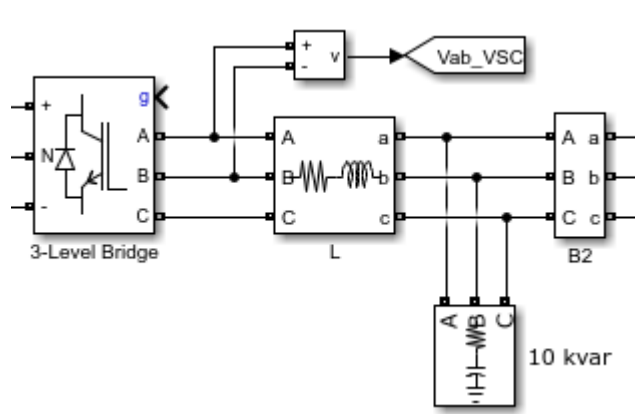
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

O inversor que será utilizado é um inversor trifásico de 60 Hz e 500 V de tensão por entrada, disponibilizado pelo *Simulink* com características universais, com uma resistência interna de 0.003 Ω. Este equipamento, se usado no seu limite, pode gerar

uma sobrecarga e acarretar problemas, como diminuição da sua expectativa de vida, sobrecarga nos condutores, entre outros.

A escolha de um modelo trifásico justifica-se comercialmente, uma vez que a maioria dos inversores monofásicos apresentam potência máxima de até 10kW. Importante citar que o inversor tem papel relevante na conversão da energia e do sinal proveniente das placas, e da conexão com a rede.

Figura 24- Inversor CC-CA do sistema.

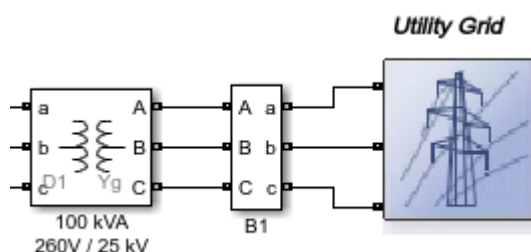


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

A Figura 24 mostra o inversor (“3 level bridge”). O bloco de ramificação “L” consiste em uma série trifásica que implementa uma combinação de série do indutor. O bloco conectado abaixo, representa a impedância de potencias ativa e reativa que são absorvidas pela carga, e B2 é o barramento de onde serão realizadas as medições do sistema, antes de ser conectado ao *grid*.

Outro elemento a ser destacado é o transformador. O modelo é um transformador de 100kVA 260V/25kV, comumente utilizado em linhas de transmissão, escolhido por ter potência maior que o do sistema, para atender a potência do transformador do projeto modelo. Na Figura 25, observa-se o papel do transformador, que tem como a principal função elevar ou abaixar a tensão para conexão com o *grid*.

Também, é possível observar o barramento B1, onde serão realizadas as medidas do sistema, a fim de obter resultados do que pretende ser analisado da conexão do sistema com a rede. A rede elétrica, é de alta tensão, pois apresenta as características de 120 kV/2500 MVA, fato esse de extrema importante, pois como visto no tópico 3.1.2, a tensão da rede é componente fundamental para se obter o limite de THD permitido.

Figura 25 - Transformador conectado *on grid*

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Com o levantamento teórico realizado, e uma vez demonstrado o circuito a ser simulado, no próximo tópico apresentam-se os resultados que foram obtidos através das simulação.

4.3 Resultados

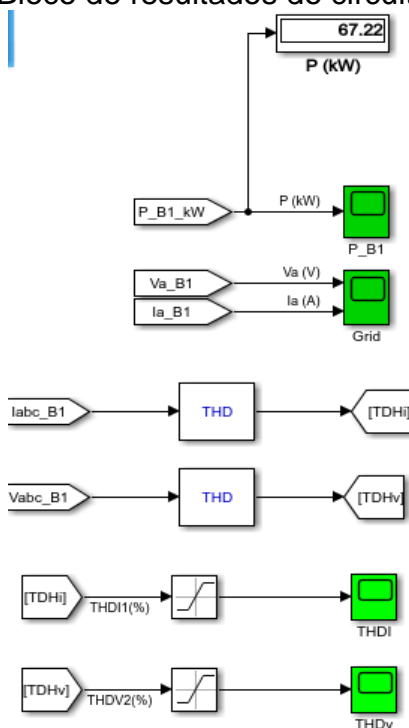
Os resultados a serem apresentados, foram obtidos através de simulações do circuito anteriormente mostrado e têm como objetivo mostrar a implementação prática da usina microgeradora nessa monografia.

4.3.1 Parâmetros

Os parâmetros estabelecidos para efetivar a simulação iniciaram na definição do tempo de exposição do circuito à mesma. Foi definido que o tempo seria de 2,5 s, porque foram testados diversos instantes de tempo, e não se percebeu alterações consideráveis nos resultados. Assim, determinou-se valor de Tempo da simulação (T_s) de 2,5s.

Outro parâmetro definido foi a medição. Foram colocados blocos de medidas das grandezas ao longo do circuito, como os do exemplo a seguir, para que se pudesse medir com exatidão as grandezas elétricas do circuito, e através dos gráficos, discutir os resultados obtidos, a fim de se chegar uma conclusão do estudo realizado.

Figura 26- Bloco de resultados do circuito elaborado.



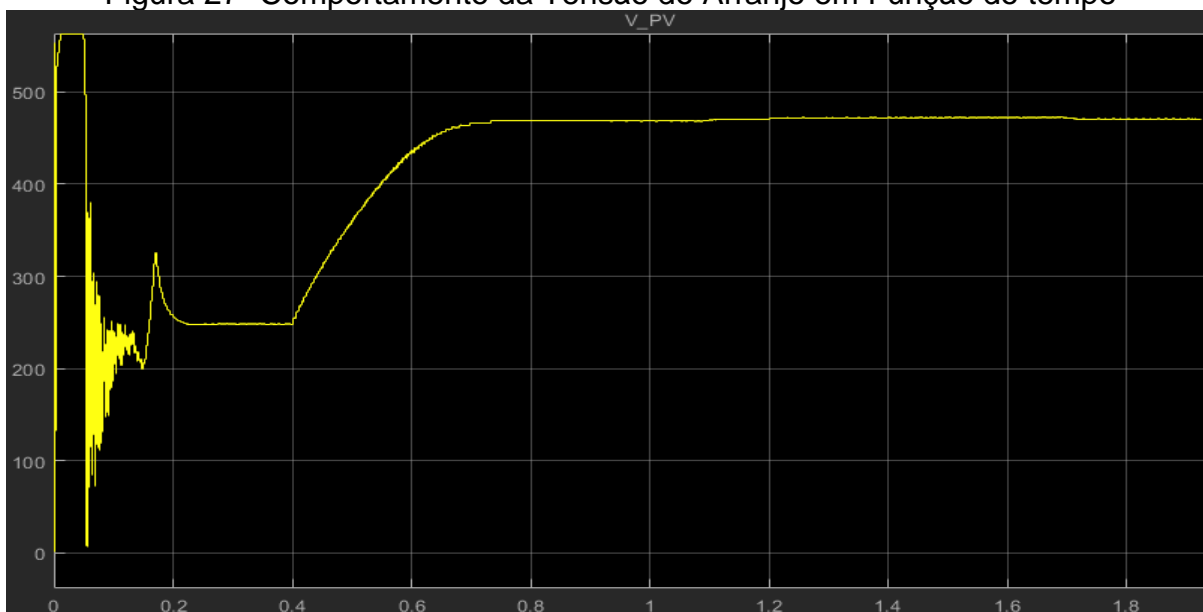
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Como pode ser observado também pela figura, existem blocos específicos para cada componente, que determinam o parâmetro de interesse, o local que está sendo realizado a medição e por último, destacado em verde, os locais que dão acesso aos gráficos obtidos, e que serão apresentados nos tópicos a seguir.

4.3.2 Arranjo fotovoltaico

A apresentação dos resultados inicia-se com as figuras que demonstram as principais variáveis a serem analisadas. Primeiramente, é observado a tensão do conjunto dos módulos, Figura 27, que mostra resultado de 475.43 V, onde há picos nos instantes iniciais da simulação, onde o sistema é iniciado, havendo uma perturbação no instante $T_s < 0,2s$. Após o instante $T_s > 0,8s$, a tensão tende a chegar no nível de estabilidade e atingir o valor constante destacado.

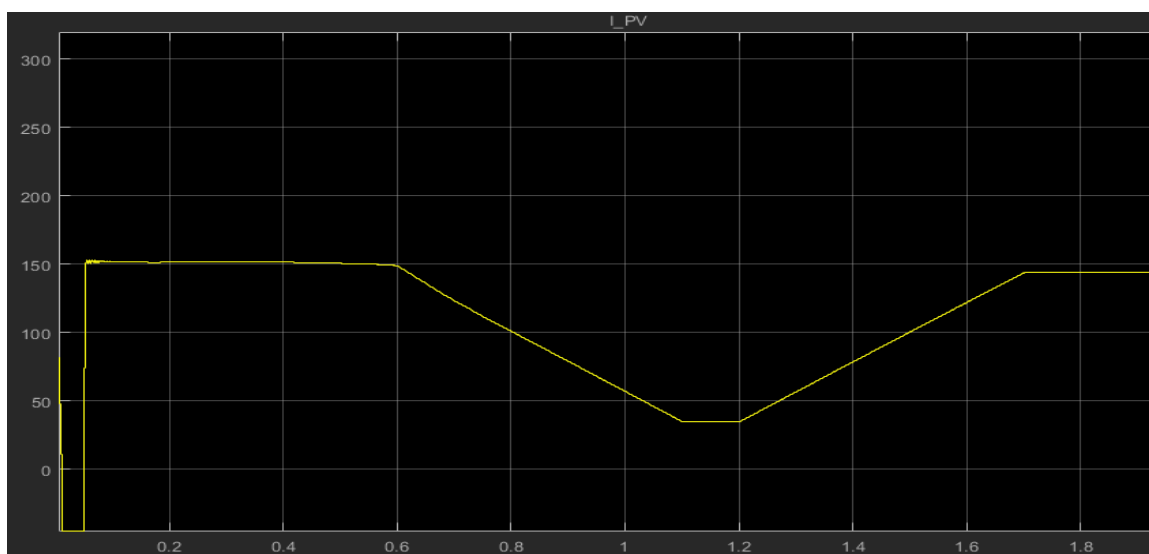
Figura 27- Comportamento da Tensão do Arranjo em Função do tempo



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Após a análise do resultado da tensão, observou-se a corrente do arranjo fotovoltaico, o gráfico que representa sua evolução ao longo do tempo de simulação estabelecido indica uma variação linear, que no instante $T_s < 0,2$ sofre variação, estabiliza nos instantes $0,2 > T_s < 0,6$, volta a cair, mas após o instante $T_s > 1,2$ volta a subir novamente e se estabiliza em 150A. Fato este justificado, pois a irradiância aplicada no sistema não foi constante, isso porque, durante o dia com a variação da posição do sol, podemos ter sombreamento de construções vizinhas, nuvens e até mesmo de outros elementos instalados ao lado do sistema solar.

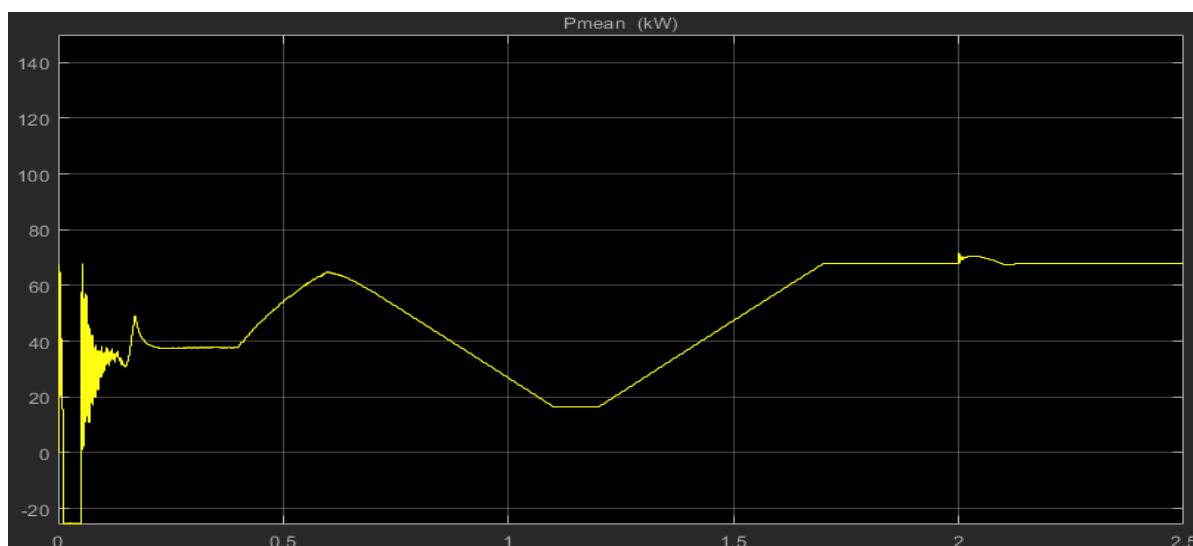
Figura 28- Comportamento da corrente do arranjo em função do tempo



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Tendo resultados da corrente e tensão apresentados, nota-se pela Figura 29 que a potência elétrica do sistema é consequência de ambos os fatores, com uma grande variação no início da simulação, $T_s < 0,5s$, uma queda entre os instantes $0,5 < T_s < 1,0s$, e vindo a estabilizar após os $T_s > 1,7s$.

Figura 29- Comportamento da potência do arranjo em função do tempo

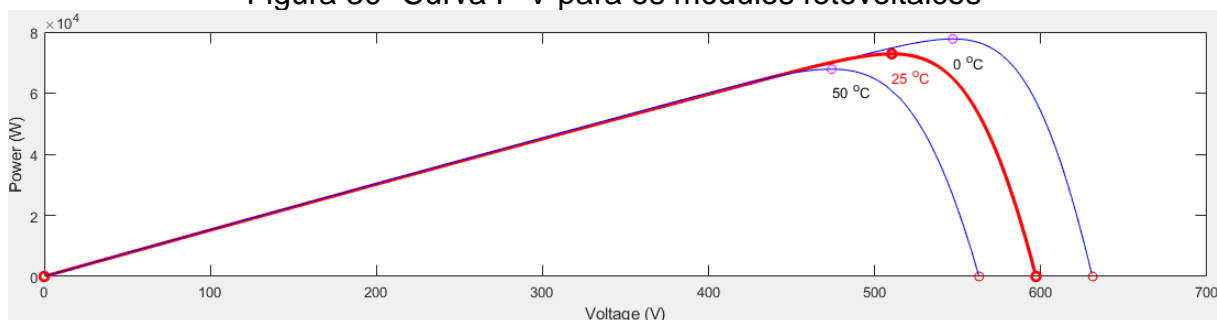


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Diante do que foi apresentado, os resultados obtidos do conjunto de módulos fotovoltaicos são consequências de, principalmente, variação da irradiância solar incidente e da temperatura a qual o sistema está sendo submetido. Isso é explicado, pois a relação entre tensão e corrente elétrica em módulos fotovoltaicos apresentam características não-lineares. Sendo que, para diferentes pares de irradiância e temperatura tem-se um determinado ponto de operação em que os módulos fotovoltaicos operam em sua máxima capacidade de fornecimento de energia. (CASTRO, 2019).

As curvas P-V dos módulos fotovoltaicos mostradas a seguir, tem relação com o Maximum Power Point (MPP), que é o ponto de máxima potência em que as placas fotovoltaicas podem chegar, sob a incidência de determinada temperatura e irradiância, atingindo a melhor eficiência possível. Quando não existe corrente elétrica circulando, a tensão que circula por eles é a de circuito aberto (V_{oc}), quando a corrente que passa por esses módulos é máxima, denomina-se corrente de curto circuito (I_{sc}), situação em que a tensão nos terminais do módulo é nula. Ambas não operam em conjunto.

Figura 30- Curva P-V para os módulos fotovoltaicos

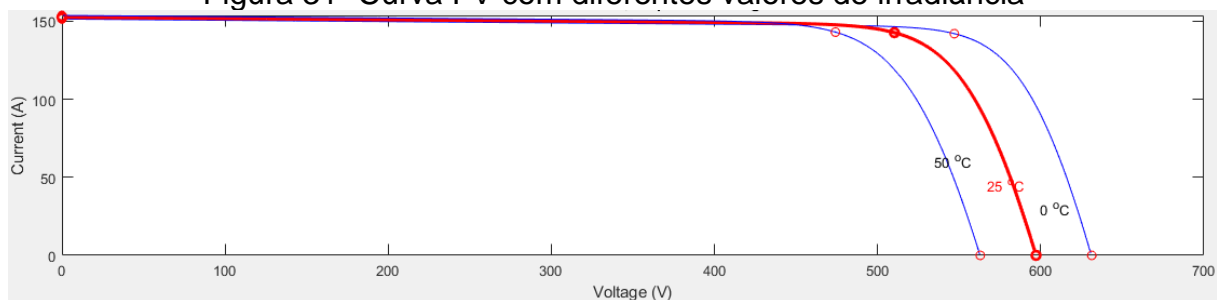


Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Constata-se que o fator que impacta V_{oc} de forma mais direta, é a temperatura. Na situação em que a temperatura do módulo aumenta a tensão de circuito aberto diminui e a corrente de curto-circuito permanece quase sem nenhuma mudança, indicando que apesar de ser desejável ter-se grandes valores de irradiância incidentes sobre os módulos, o aumento da temperatura nos mesmos ocasiona perda de eficiência. (CASTRO, 2019).

Quando a irradiância solar é distribuída igualmente entre módulos com características técnicas e elétricas iguais, eles operam com uma mesma corrente elétrica. Por isso, não é recomendado em uma mesma série ou arranjo ter módulos com características diferentes. Sendo assim, o resultado se explica pela interferência da temperatura na distribuição de uma irradiância uniforme.

Figura 31- Curva I-V com diferentes valores de irradiância



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

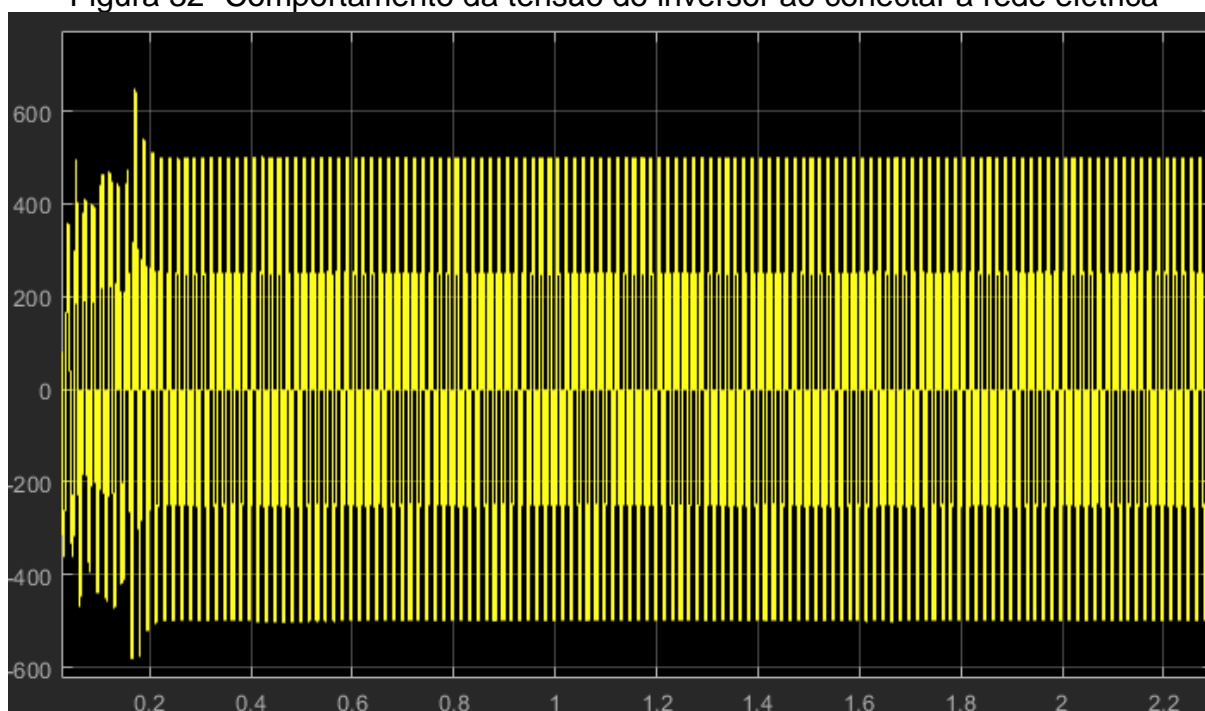
Isso mostra que as variações sofridas pela tensão, corrente e potência do sistema, além de ter relação com os instantes iniciais do sistema, pode ser justificada em decorrência do que foi explicito anteriormente. Nos próximos tópicos, serão apresentados os resultados referentes aos barramentos de medidas que foram posicionados antes e depois da conexão do sistema com a rede.

4.3.3 Barramento de medida antes da conexão

Os barramentos foram colocados em função de medir os dados de corrente e tensão do sistema antes e após a conexão com o grid. Isso se dá pela necessidade de se ter um parâmetro de comparação entre a TDHi gerada antes da conexão, na saída do inversor, e no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), que é o ponto de conexão e injeção do sistema fotovoltaico com a rede de distribuição da concessionária.

A Figura 32 mostra o comportamento da tensão na saída do inversor ao longo do tempo. No instante $T_s=0s$ ele começa a sua conexão com a rede, e até o instante $T_s<0,2s$ apresenta instabilidade, sendo esse um processo de sincronização com a rede. Após esse estágio, o equipamento conecta-se a rede elétrica e começa a injetar corrente.

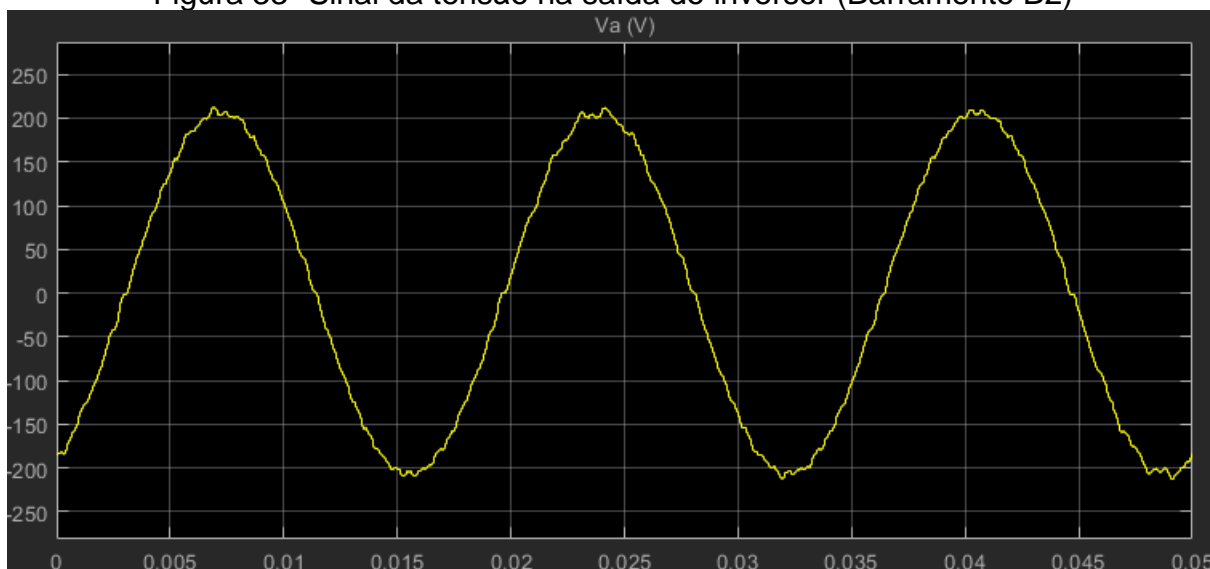
Figura 32- Comportamento da tensão do inversor ao conectar a rede elétrica



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

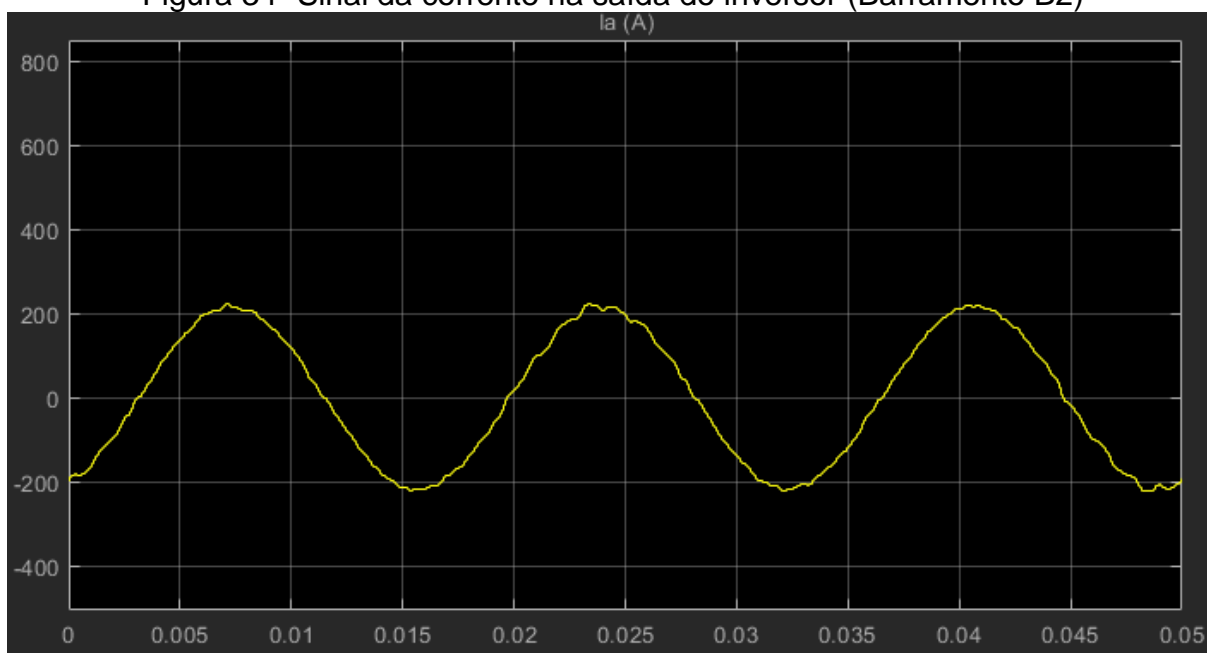
Os resultados do barramento B2, serão apresentados e discutidos. Este barramento está localizado após o inversor e antes do PAC. Não se notou diferença significativa da potência encontrada nos módulos, em relação à potência em B2. Observou-se que o sinal da tensão e da corrente após sair do inversor apresentam-se degradados e com total distorção harmônica. Isso pode ser explicado, pelo que foi visto no tópico 2.3.3 e no Capítulo 4.

Figura 33- Sinal da tensão na saída do inversor (Barramento B2)



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Figura 34- Sinal da corrente na saída do inversor (Barramento B2)



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

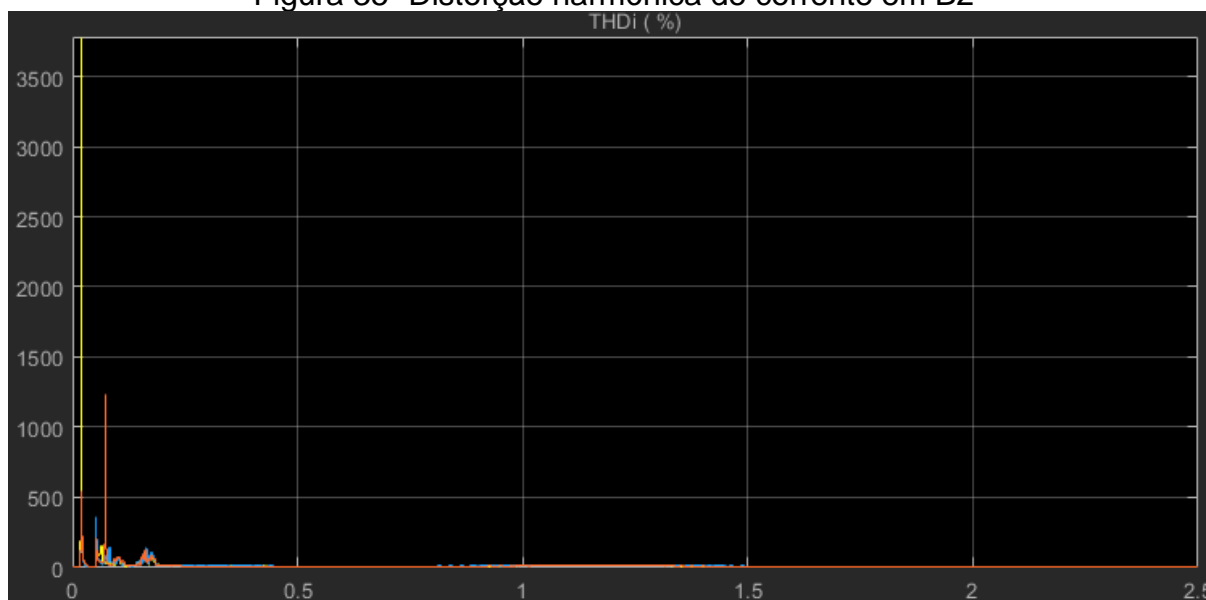
Fator que está ligado com a distorção harmônica apresentada no momento inicial de tempo de início das simulações e representados pelas figuras acima, está ligado ao processo de chaveamento realizado pelas chaves eletrônicas (IGBT's ou MOSFETS), que compõem a onda senoidal de saída. As harmônicas geradas nesse chaveamento ocorrem em virtude do controle de modulação por largura de pulso (PWM- Pulse Width Modulation) necessitar de um tempo de sobreposição entre as ordens de comutação das chaves do conversor como fonte de corrente, a fim de assegurar um fluxo de CC no barramento. (SOUZA,2016).

Esse tempo de sobreposição entre as ordens de comutação das chaves é igual ao tempo inativo do conversor de fonte de tensão. Nesse intervalo, nenhuma das chaves está em condução, não evitando o curto-circuito da fonte por meio das semicondutoras. Com isso, são produzidas correntes harmônicas de baixa ordem a partir de deficiência na malha de controle do inversor e na ligação destes em redes francas ou distorcidas.

Diante das figuras 33 e 34, e a comprovação da existência dos harmônicos na saída do inversor, coube utilizar as equações citadas no Capítulo 4, com a finalidade de se obter o valor de THDv e THDi, durante o T_s da simulação em questão. Para obter esses valores, foi usado a aplicação da fórmula (2) e (3), que são simplificações da fórmula (1), aplicadas utilizando um bloco de parâmetro disponível no MATLAB, que contempla a aplicação direta deste cálculo.

Com isso, obteve-se um valor de distorção alta de corrente, chegando a 3.800% em uma das fases entre os instantes $0 > T_s < 0,1s$, as outras duas fases ficam entre 1.000%, nesse instante. Contudo, após $T_s > 0,5s$, a distorção harmônica se estabiliza e fica constante em um valor igual a 7%.

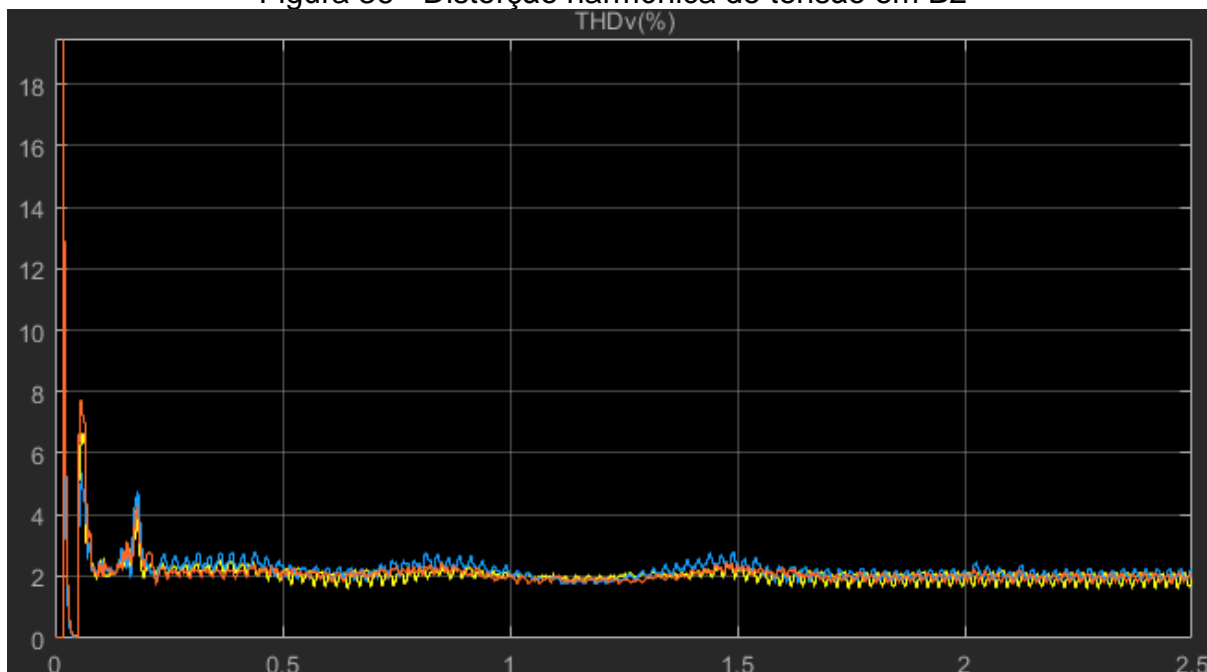
Figura 35- Distorção harmônica de corrente em B2



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Já os valores de THDv em cada fase apresentam valores menores do que THDi, entre os instantes iniciais $0 > T_s < 0,1$, o máximo valor encontrado para uma fase foi de 20%, e após o instante $T_s > 0,2$, a distorção harmônica se estabiliza em valor igual a 2%.

Figura 36 - Distorção harmônica de tensão em B2



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Observou-se os altos resultados de THD no início da simulação. Fato que pode ser explicado por ser o momento no qual a produção de energia entregue pelo inversor está muito abaixo da sua capacidade nominal, sendo mais recorrente nos momentos em que há baixa insolação, o que pode ser comprovado, pelas figuras apresentadas no tópico anterior.

As distorções harmônicas apresentam-se em valores mais altos quando o ponto de operação do inversor é inferior a 20% da sua potência nominal, em decorrência do plano de controle presente na maioria destes equipamentos não terem a capacidade de encontrar ponte de eficiência para produzir uma onda senoidal na saída.

No próximo tópico, serão apresentados os dados coletados no barramento de conexão com a rede, após o transformador, esses dados serão confrontados com os obtidos neste barramento, e com a fundamentação teórica deste trabalho para produzir a conclusão do estudo.

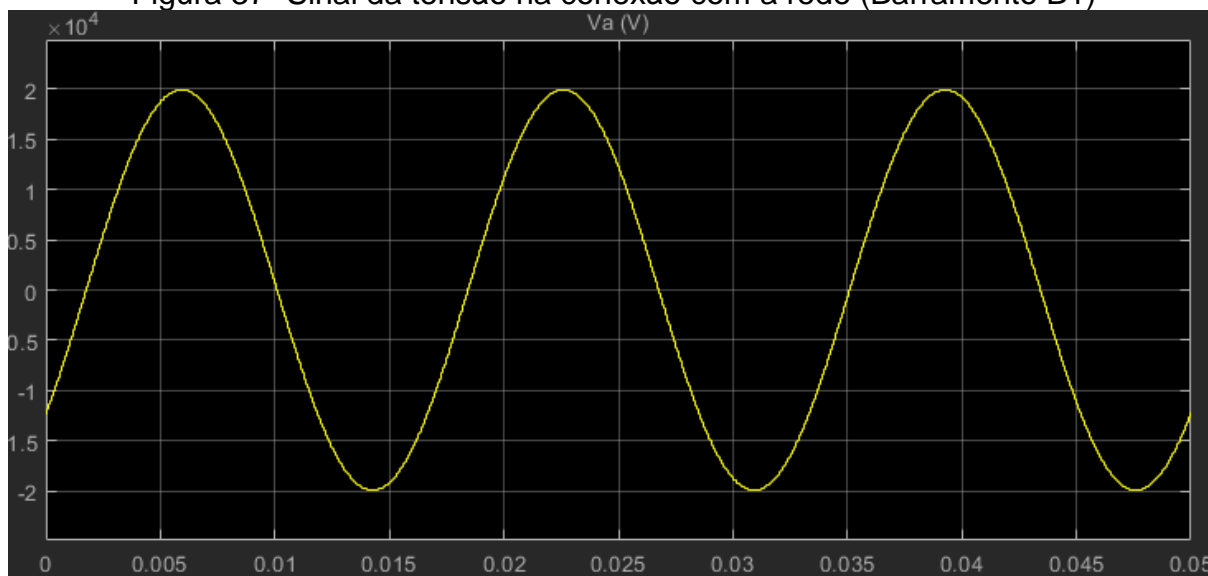
4.3.4 Barramento na conexão com a rede.

Este barramento foi aplicado para compreender como o sinal da tensão e da corrente chegam na conexão com a rede, e se os valores da distorção harmônica,

gerados, principalmente, pelo o inversor fotovoltaico, estão condizentes aos valores estabelecidos pelas normas e valores apresentados no item 3.1.2.

O transformador utilizado twm 250kVA de potência. Diante disso, obteve-se o seguinte resultado para o sinal de tensão que injetado na rede pelo sistema fotovoltaico.

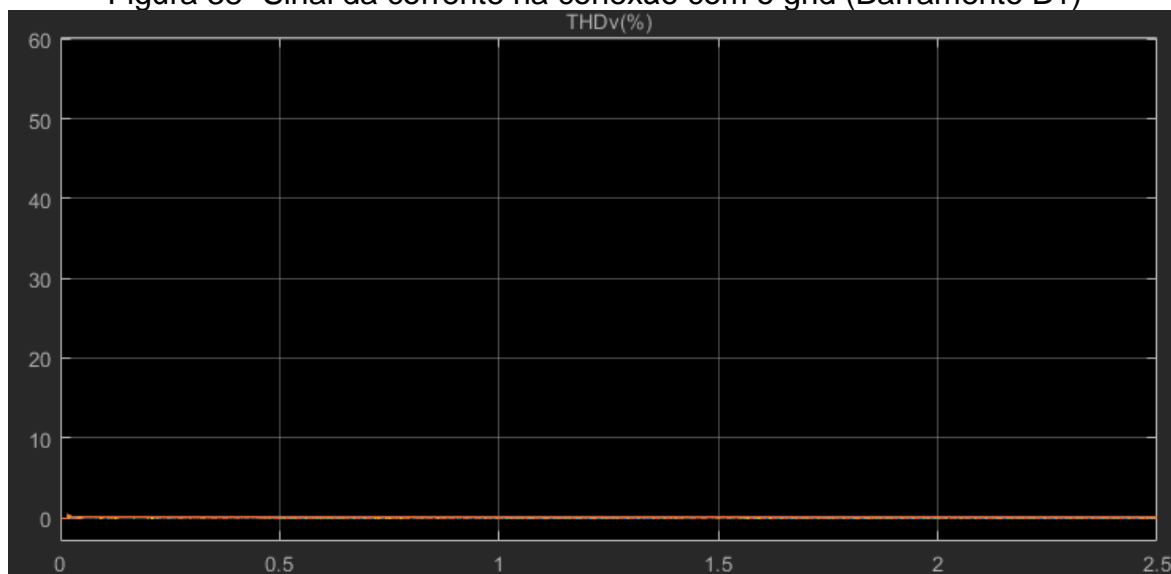
Figura 37- Sinal da tensão na conexão com a rede (Barramento B1)



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Diferente do que foi exibido para o barramento B1, a tensão do barramento se encontra com o sinal íntegro, ou seja, na conexão com a rede, o sinal de tensão não sofreu os mesmos efeitos observados anteriormente. O gráfico representado pela Figura 38, com aplicação do cálculo de THD no instante T_s da simulação, mostra um valor praticamente de 0% na THDv conectada à rede elétrica.

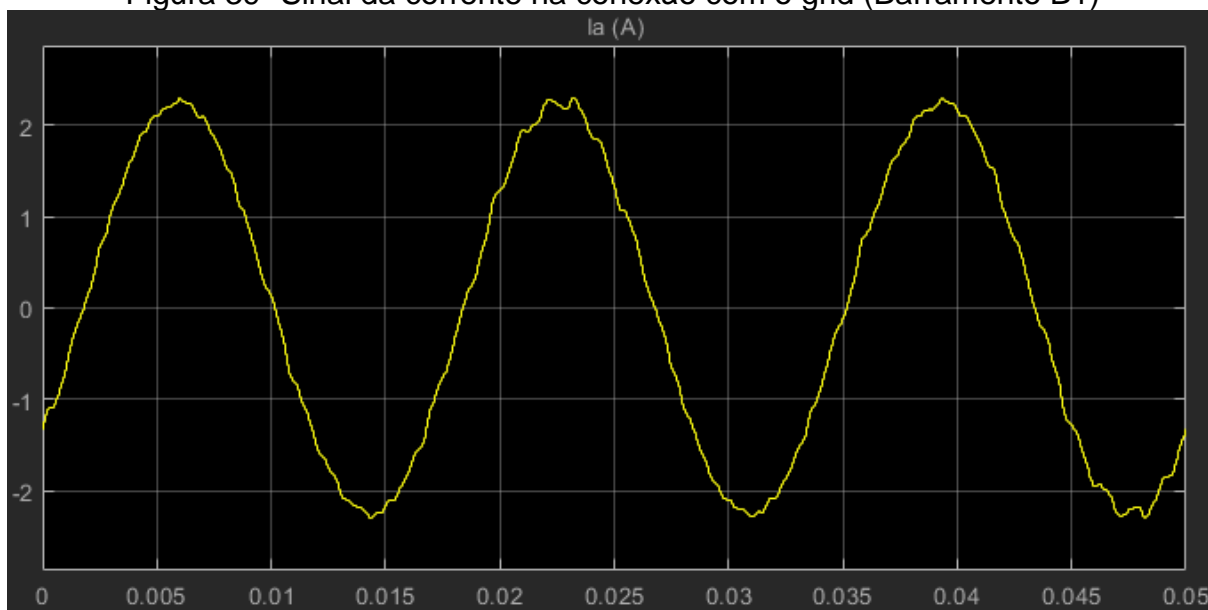
Figura 38- Sinal da corrente na conexão com o grid (Barramento B1)



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Já o sinal da corrente, continuou apresentando distorção, como pode se inferir pelo o gráfico 39.

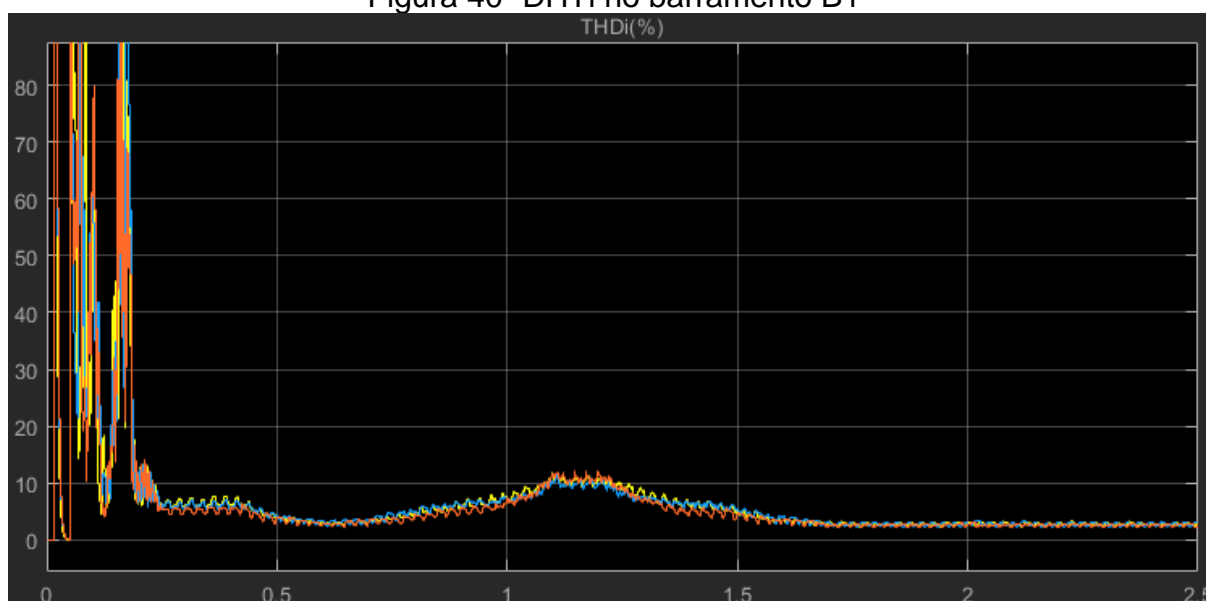
Figura 39- Sinal da corrente na conexão com o grid (Barramento B1)



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Contudo, ainda que com sinal degradado pela DHTi, os valores foram bem menores do que os vistos logo na saída do inversor, atingindo um valor máximo de 90% nos instantes iniciais, onde a geração é bem diferente das condições nominais e a distorção já é esperada, e se estabilizando após $T_s > 1,5$ em 3%.

Figura 40- DHTi no barramento B1



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Para entender os resultados obtidos é importante destacar que os níveis de distorção são bastante elevados nos períodos da manhã e ao final do dia, em que a geração comumente fica abaixo dos 25%. Outro fator que pode provocar a THDi alta, são os períodos do dia em que o sistema sofre com o sombreamento de nuvens, ou obstáculo físico, o que leva a uma baixa irradiação e alta TDHi. A produção de corrente harmônica pelo inversor, é fortemente dependente da potência elétrica entregue pelo arranjo fotovoltaico, sendo essa relação inversamente proporcional. (FORTES, 2016).

Com ambos os resultados apresentados, foi montada a tabela abaixo para comparar os dados obtidos antes do barramento e no PAC.

Tabela 3 - Valores fixos de DHTi e DHTv

Indicador	Valores obtidos THD	
	Antes da Conexão	Após a Conexão
DHTi	7%	3%
DHTv	2%	0%

Fonte: elaborada pelo autor (2022)

É observada uma grande diferença nos resultados das DHTv e DHTi em relação ao barramento B1 colocado após o inversor. Explicação plausível para este acontecimento está diretamente associada ao modelo do transformador utilizado na simulação, e mais comum nas redes elétricas de distribuição, isso porque, o transformador é um modelo trifásico de ligação estrela-triângulo.

Na ligação estrela triângulo, a tensão de linha do primário (V_{lp}) se relaciona com a tensão de fase do primário ($V_{\phi p}$) através de $V_{lp} = \sqrt{3}V_{\phi p}$, ao passo que a tensão de linha do secundário é igual a tensão de fase do secundário. Por isso, a ligação apresenta redução das componentes harmônicas, porque parte delas fica suprimida por uma corrente que circula no lado delta da ligação.

4.4 Discussões dos resultados

As discussões mostram a importância da energia solar fotovoltaica no cenário mundial, e como essa forma de conversão de energia ganhou força nos últimos anos por ser, principalmente, renovável e limpa. No Brasil, os 14GW já instalados produzem a mesma quantidade de energia da principal usina em território nacional, a de Itaipu.

O sistema é composto por placas fotovoltaicas formadas por células de Si que captam a energia proveniente da luz solar, e o inversor que converte a energia proveniente das placas que utilizamos na rede, e nas tomadas da nossa residência.

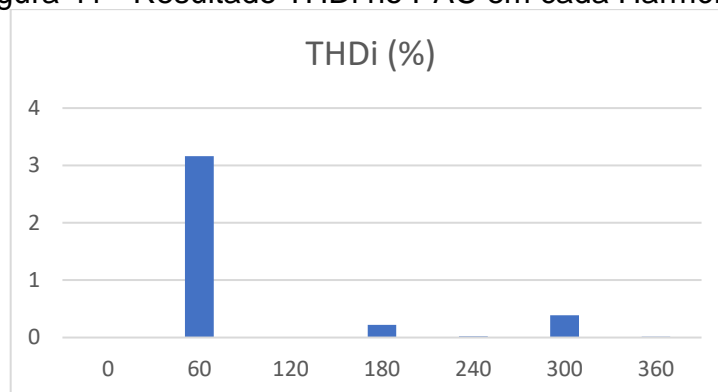
Apesar de benéfica em sua maioria, o sistema fotovoltaico pode impactar na qualidade de energia elétrica, e cabe ao PRODIST, a ABNT e padrões internacionais estabelecerem as regras e parâmetros para a avaliação dessa qualidade, estabelecendo os limites de distorção harmônica, fator de potência e níveis de tensão aceitos. E cabe a ANEEL fiscalizar as distribuidoras de energia quanto ao cumprimento das normas.

Diante a isso, o trabalho traz resultados a serem comparados, entre o percentual aceito, representados pelas tabelas contidas no tópico 3.1.2, e o que foi obtido pela simulação computacional do modelo elaborado. Notou, que a THD apresenta altos valores no barramento colocado na saída do inversor fotovoltaico, chegando a quase 100% de aumento da THD nos segundos iniciais da simulação em uma das fases, devido a atuação do sistema fora da sua operação nominal, ou seja, do seu ponto ideal.

Após sincronizado com a rede, a THD tende a se estabilizar. Considerando os dados obtidos, afim de analisar as tabelas contidas em 3.1.2 e concluir a monografia ,temos que estamos em uma tensão de operação de 120kV, tensão está sendo a da rede elétrica em que o sistema encontra-se conectado. A figura 41, nos traz o 3º harmônico, onde a THDi atinge o seu maior valor, e comprova esse mesmo resultado

com o da tabela 3, e também nos traz a baixa distorção harmônica em harmônicas pares.

Figura 41 - Resultado THDi no PAC em cada Harmônico



Fonte: Autoria Própria

5 Conclusão

Para concluir, tomamos o parâmetro de cálculo da ANEEL, que se vale do resultado obtido no PAC, ou seja, no ponto de acoplamento do sistema fotovoltaico com a rede elétrica, que no caso da simulação, é representado pelos resultados obtidos no barramento “B2”. Para esse barramento, foram obtidos os valores representados tabela 3 de resultados.

A tensão possui valores permitidos, pois praticamente não se encontrou distorção nesse parâmetro, fato devido ao filtro harmônico presente nos transformadores que possuem a ligação tipo delta- estrela. O valor da THDi no ponto de acoplamento comum, teve um resultado de 2%. Resultado que está dentro dos valores estabelecidos pela ABNT e que servem de parâmetro para as fiscalizações da ANEEL.

Com isso, é possível concluir que o sistema fotovoltaico em questão, apesar de sofrer com valores altos de THD em momentos em que o sistema não está operando na nominal, está de acordo com as normas estabelecidas, e não tem maiores impactos sobre a rede. Vale destacar, que no software utilizado o fator de potência é definido no início da simulação, não podendo se avaliar se há ou não impacto desse tipo de distorção no sistema. E por essa questão, sugere-se trabalhos futuros que possam conseguir com uma melhor exatidão esse tipo de distorção.

5.1 Trabalhos Futuros

Com o intuito de avaliar com mais precisão as THD e também de se obter outros fatores de geração de harmônicos, durante o desenvolvimento deste trabalho aventou-se a realização futura de pesquisas, como: realização de medições com equipamentos apropriados na planta fotovoltaica, utilizando equipamentos que medem a qualidade de energia.

Há também a possibilidade de medição dos fatores como potência reativa, potência indutiva, potência, entre outros, em vários pontos do sistema e em diferentes horários do dia de diferentes dias. Analisar não só o impacto do sistema fotovoltaico na rede, mas de outros sistemas acoplados a ela que causam harmônicos e podem prejudicar a qualidade de energia. Verificar a qualidade dos equipamentos utilizados em detrimento de outros.

Após sincronizado com a rede, a THD tende a se estabilizar e no mesmo barramento apresentou $THDi = 7\%$ e $THDv = 2\%$, considerando a análise das tabelas contidas em 3.1.2, que estamos em uma tensão de operação de 120kV, tensão esta sendo a da rede elétrica em que o sistema encontra-se conectado. No 3° harmônico, como demonstrado na Figura 41. Sendo assim, o máximo valor permitido é de 5% para THDv e 4% para THDi, indicando que apesar da distorção de tensão se mostrar dentro dos parâmetros estabelecidos por normas vigentes, a de corrente ultrapassa esse limite.

REFERÊNCIAS

ALDABÓ, R. Qualidade na energia elétrica. Efeitos dos distúrbios, diagnósticos soluções. 2. ed. Artliber, 2013.

ANNEL. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 19 abr. 2012. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=342518>>. Acesso em: 05 fev. 2022.

BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. 4. ed. Elsevier, 2014.

BRASIL. Decreto nº 5.163, de 30 de julho 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. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 04 ago. 2004. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5163.HTM>. Acesso em: 05 fev. 2022.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 06 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 06 jan. 2022. Disponível em: <<https://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>>. Acesso em: 05 fev. 2022.

CASTRO, F. C. de. **DISTORÇÃO HARMÔNICA DE CORRENTE PRODUZIDA POR INVERSORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE**. 2019. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**. 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 05 jan. 2022.

FERNANDES, E. S. **IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA SOLAR FOTOVOLTAICA SOBRE A REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO**. 2021. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

FORTES, R. R. A. **DISTORÇÕES HARMÔNICAS PRODUZIDAS POR INVERSORES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA EM CONDIÇÃO DE RESSONÂNCIA PARALELA**. 2016. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista (Campus Ilha Solteira), Ilha Solteira, 2016.

GUSMAN, S. L. **Impacts of photovoltaic plants on the power factor correction: the cat head curve**. 2018. 35 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

LUCCHESI, F. C. et al. Análise do impacto da geração distribuída fotovoltaica na rede elétrica da Universidade Federal de Santa Maria. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2018, Gramado. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/73>>. Acesso em: 02 mar. 2022.

Mais de 800 milhões de pessoas no mundo não têm acesso a energia elétrica, diz Banco Mundial. **Jornal G1**, 22 maio. 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2019/05/22/mais-de-800-milhoes-de-pessoas-no-mundo-nao-tem-acesso-a-energia-eletrica-diz-banco-mundial.ghtml>>. Acesso em: 05 jan. 2022.

MATLAB Project for MathWorks. Versão R2021a, 17 fev. 2021.

NETO, A. F. C. P. de. **AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO**. 2016. 109 f. Tese (Doutorado em Energia e Ambiente) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

PETRY, C. A. **Introdução aos Conversores CC-CC**. Instituto de Eletrônica de Potência, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001. Disponível em: <https://www.professorpetry.com.br/Bases_Dados/Apostilas_Tutoriais/Introducao_Conversores_CC_CC.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2022.

POMILIO, J. A. **CONVERSORES CC/CA – INVERSORES**. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013. Disponível em: <<https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/files/it744/cap5.pdf>>. Acesso em: 04 jan. 2022.

Portal Solar. **Vantagens e Desvantagens da Energia Solar Fotovoltaica**. Portal Solar. 2022. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/vantagens-e-desvantagens-da-energia-solar.html>>. Acesso em: 01 fev. 2022.

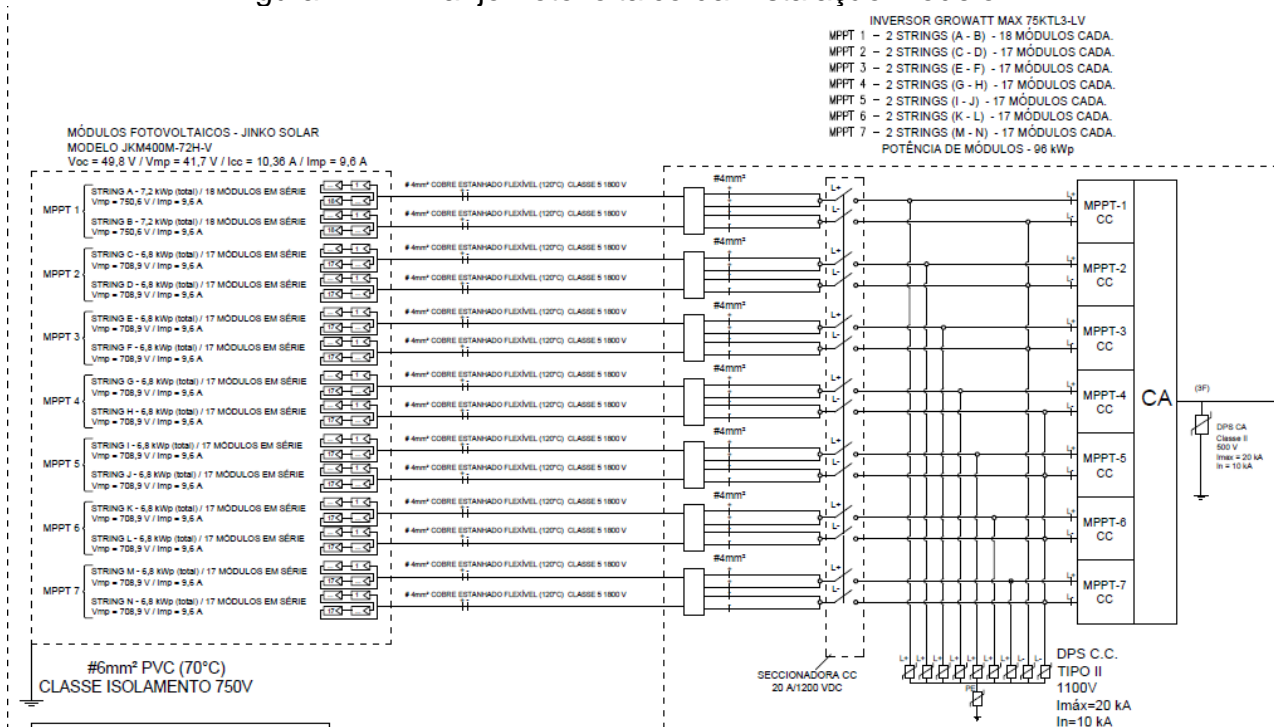
SILVA, J. E. S. R. da. **CÉLULAS FOTOVOLTAICAS: ESTADO DA ARTE E PERSPECTIVAS FUTURAS**. 2014. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletromecânica) – Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2014.

SOUZA, R. A. de. **ANÁLISE DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA E SEUS EFEITOS EM TERMOS DE FATOS DE POTÊNCIA E DISTORÇÕES HARMÔNICAS**. 2016. 160 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

ZILLES, R. et al. **Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo, Oficina de Textos, 2012.

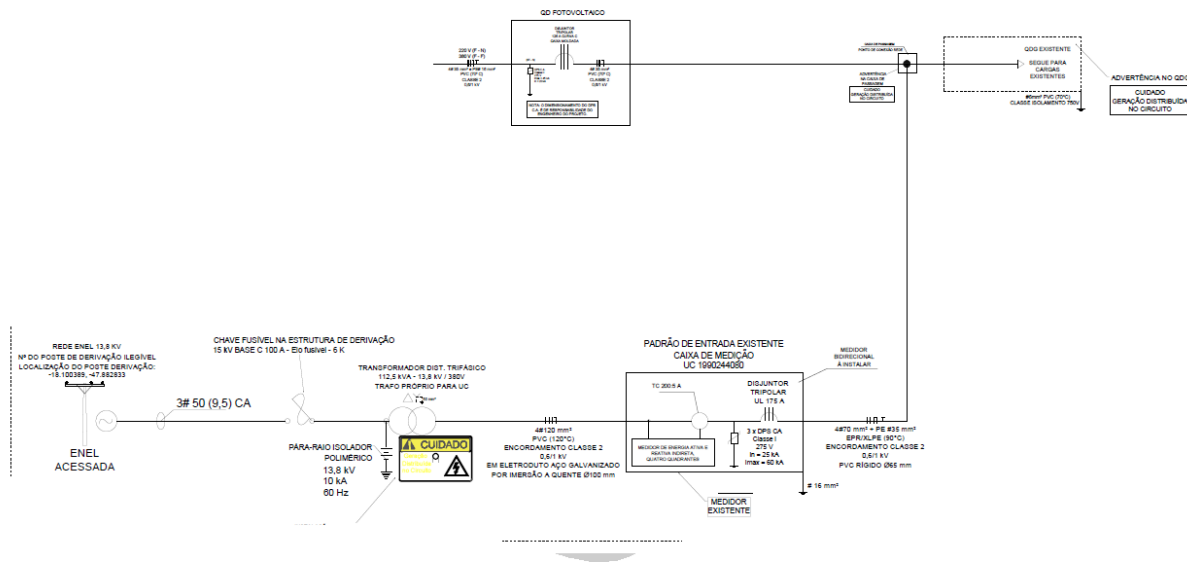
APÊNDICE

Figura 41 – Arranjo Fotovoltaico da Instalação Modelo



Fonte: Autoria Própria

Figura 42 – Conexões elétricas da Instalação Modelo



Fonte: Autoria Própria

