



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA TRABALHO DE
CONCLUSÃO DE CURSO

KARLA DOS SANTOS FARIAS

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA RESSONÂNCIA SOBRE OS HAMÔNICOS
DENTRO GERADOS POR SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

BELÉM- PA

2025

KARLA DOS SANTOS FARIAS

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA RESSONÂNCIA SOBRE OS HAMÔNICOS
GERADOS POR SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Mota Soares.

APROVADO EM:

BANCA EXAMINADORA

**Prof. Dr Thiago Mota Soares Orientador
(FEEB/ITEC/UFPA)**

Prof. Dr Examinador Interno ()

Prof. Dr Examinador Interno ()

**BELÉM – PA
2025**

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido sabedoria e paciência nos momentos de dificuldade ao longo da minha jornada acadêmica, especialmente nesta reta final. Sou grato também por ter sido meu guia em todas as etapas da minha vida pessoal.

À minha família, minha mãe Ely, meu pai Klbherwal e meu irmão Klaus, deixo minha profunda gratidão por serem pilares fundamentais em minha vida e inspirações constantes. Obrigado por estarem sempre presentes, mesmo nos dias mais difíceis.

Às minhas melhores amigas: Beatriz Costa, Daniela Cássia, Jeanne Maria e Sophia Silveira. Agradeço pela amizade que atravessa toda a minha vida, desde a infância, e por nunca terem se afastado. Estendo também meu reconhecimento aos amigos que conquistei ao longo dessa caminhada acadêmica.

Ao professor Thiago, agradeço pela disponibilidade em aceitar este desafio, pela paciência, pelo apoio neste momento tão importante e por todas as aulas ministradas durante a graduação.

À Universidade Federal do Pará (UFPA), manifesto minha gratidão pela oportunidade de estudar na melhor universidade do Norte. Uma parte essencial do meu amadurecimento pessoal e acadêmico devo a essa experiência.

Por fim, agradeço a todos que torcem e acreditam em mim, pois cada demonstração de apoio foi fundamental para que eu chegasse até aqui

RESUMO

Esse trabalho apresenta um estudo de qualidade de energia da rede elétrica IEEE33bars disponibilizada pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) através da definição e funcionamento dos componentes de um sistema fotovoltaico, caracterização de harmônicos, modelagem da rede e avaliação do impacto da ressonância exerce sobre os harmônicos gerados pelos inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos junto com o grau de penetração fotovoltaica na rede. Mediante o exposto, é utilizado o software OpenDSS para o cálculo do fluxo harmônico no sistema de distribuição elétrica, e os dados de corrente, potência e tensão obtidos são tratados por meio de uma ferramenta da Microsoft, com o objetivo de possibilitar melhor visualização e análise dos resultados. No estudo, são considerados dois cenários de penetração fotovoltaica: 10% e 60%. Em ambos os casos, realiza-se a análise da tensão e da corrente harmônica em condições de baixa e alta irradiação, observando se ocorre ampliação ou atenuação dos valores de tensão e corrente. Além disso, avalia-se o comportamento da tensão e da corrente eficaz. Os resultados obtidos indicam que o grau de injeção fotovoltaica influencia na presença de distorções de corrente e tensão de forma não padronizada.

Palavras-chave: Ressonância. Harmônicos. Sistema Fotovoltaicos.

ABSTRACT

This paper presents a power quality study of the IEEE33bars electrical grid provided by the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). It examines the definition and operation of the components of a photovoltaic system, characterizes harmonics, models the network, and assesses the impact of resonance on the harmonics generated by inverters used in photovoltaic systems, along with the degree of photovoltaic penetration in the grid. Based on the above, OpenDSS software is used to calculate harmonic flux in the electrical distribution system, and the current, power, and voltage data obtained are processed using a Microsoft tool to enable better visualization and analysis of the results. The study considers two photovoltaic penetration scenarios: 10% and 60%. In both cases, harmonic voltage and current are analyzed under low and high irradiance conditions, observing whether voltage and current values increase or decrease. Furthermore, the behavior of the effective voltage and current is evaluated. The results obtained indicate that the degree of photovoltaic injection influences the presence of current and voltage distortions in a non-standardized manner.

Keywords: Resonance. Harmonics. Photovoltaic Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Células Fotovoltaicas	15
Figura 2 - Efeito Fotovoltaico	16
Figura 3 - Sistema Fotovoltaico à rede	17
Figura 4 - Módulo Fotovoltaico.....	18
Figura 5 - Circuito Interno da Células.....	18
Figura 6 - Curva Característica de Tensão.....	19
Figura 7 – Diagrama em bloco do <i>PVSystem</i>	21
Figura 8 - Curva do tempo x temperatura	22
Figura 9 - Curva do tempo x irradiância	23
Figura 10 - Formas de Ondas com Harmonicas.....	25
Figura 11 - Circuito em série	26
Figura 12 - Circuito em paralelo	27
Figura 13 - Circuito em paralelo.....	29
Figura 14 - Curva da impedancia x frequência	30
Figura 15 - Sistema Elétrico.....	32
Figura 16 - Fluxograma	33
Figura 17 -Gráfico das tensões na barra 18 e 22.....	34
Figura 18 –Gráfico das tensões.....	35
Figura 19 - Gráfico das correntes na barra 18 e 22	35
Figura 20 - Gráfico das correntes.....	36
Figura 21 -Gráfico das tensões na barra 18 e 22	36
Figura 22 -Gráfico das correntes na barra 18 e 22	37
Figura 23 -Gráfico das tensões	37
Figura 24 -Gráfico das correntes.....	38
Figura 25 –Gráfico das tensões com 10% penetração na baixa irradiação.....	38
Figura 26 – Gráfico das tensões com 10% penetração na alta irradiação	39
Figura 27 – Gráfico das correntes com 10% penetração na baixa irradiação	39
Figura 28 – Gráfico das correntes com 60% penetração na baixa irradiação	39
Figura 29 – Gráfico das tensões na barra 18 e 22.....	40
Figura 30 – Gráfico das tensões	41
Figura 31 – Gráfico das correntes na barra 18 e 22	41
Figura 32 – Gráfico das correntes	42

Figura 33 – Gráfico das tensões na barra 18 e 22	42
Figura 34 – Gráfico das correntes na barra 18 e 22	43
Figura 35 - Gráfico das tensões	43
Figura 36 – Gráfico das correntes.....	44
Figura 37 – Gráfico das tensões com 60% penetração na baixa irradiação.....	44
Figura 38 – Gráfico das tensões com 60% penetração na alta irradiação	45
Figura 39 - Gráfico das corrente com 10% penetração na alta irradiação	45
Figura 40 – Gráfico das correntes com 60% penetração na alta irradiação	46
Figura 41 –Curva de Impedância.....	46
Figura 42 - Gráfico da tensão eficaz com 10% de penetração na baixa irradiação.....	47
Figura 43 - Gráfico da tensão eficaz com 10% de penetração na alta irradiação.....	48
Figura 44 - Gráfico da corrente eficaz com 10% de penetração na baixa irradiação	48
Figura 45 - Gráfico da corrente eficaz com 10% de penetração na alta irradiação.....	49
Figura 46 - Gráfico da tensão eficaz com 60% de penetração na baixa irradiação.....	49
Figura 47 -Gráfico da tensão eficaz com 60% de penetração na baixa irradiação	50
Figura 48 - Gráfico da corrente eficaz com 60% de penetração na baixa irradiação.....	50
Figura 59 - Gráfico da corrente eficaz com 60% de penetração na alta irradiação.....	51

ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar
C	Capacitância
c.a.	Corrente Alternada
c.c.	Corrente Contínua
Connection	
Bus	Barramento
EPRI	Electric Power Research Institute (Instituto de Pesquisa em Energia Elétrica)
FP	Fator de Potência
G	Condutância
GAP	Gap de energia
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
IO	Corrente Fundamental
IINJ	Corrente Injetada
L	Indutância
Mvar	Mega volt-ampere reativo
MPPT	Maximum power point tracking
MTFF	Mean Time to first failure
OpenDSS	Open Distribution System Simulator (Simulador Open Source de Sistemas de Distribuição)
PvSystem	Photovoltaic System
PV's	Sistemas fotovoltaicos
PRODIST	Procedimento de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional
Q	Potência Reativa em MVar na frequência fundamental
QEE	Qualidade de energia
R	Resistência
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
THD	Distorção harmônica total
UFPA	Universidade Federal do Pará
Vmp	Tensão à Máxima Potência
V	Tensão Nominal do Sistema
X1	Reatância série na frequência fundamental
Xh	Reatância série

4.2	Descrição do Sistema Elétrico de 34 Barras do IEE	33
4.3	Metodologia Empregada no Estudo	34
4.4	Primeiro Caso: 10% de penetração no sistema elétrico	34
4.4.1	Primeiro Cenário: Baixa irradiação	34
4.4.2	Segundo Cenário: Alta irradiação.....	37
4.4.3	Análise comparativa da baixa e alta irradiação no cenário de 10% de penetração.....	38
4.5	Segundo Caso: 60 % de penetração no sistema elétrico	40
4.5.1	Primeiro Cenário: Baixa irradiação	40
4.5.2	Segundo Cenário: Alta irradiação	42
4.5.3.	Análise comparativa da baixa e alta irradiação no cenário de 60% de penetração.....	44
4.6	Impedância nas barras.....	46
4.7	Conclusão	47
	CAPÍTULO 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 Descrição do Problema

O estudo para o surgimento do sistema fotovoltaico veio no período do avanço dos estudos dos semicondutores, como por exemplo, os pesquisadores físico Adams e Day percebem que uma junção de selênio e platina desenvolve o efeito fotovoltaico quando exposta à luz solar (ZILLES et al., 2012).

Por volta do século XIX, alguns físicos como o Alexandre-Edmond Becquerel, descobriram o fenômeno da conversão fotovoltaica, que permitiam a conversão da luz em energia elétrica. Pela sua observação, percebe que uma solução de um eletrólito com eletrodos de metal, quando exposta à radiação luminosa, tem sua condutividade aumentada (ZILLES et al., 2012).

No ano de 1883, foi produzida a primeira célula solar produzida com selênio, com eficiência de conversão de aproximadamente 1%. Os estudos foram avançando durante o fim do século XIX até a metade do século XX com ajuda de diversos físicos como Lange, Grondahl e Schottkl, Ohl, Billing e Plessnar e Shockely, contribuíram direta e indiretamente para o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica (FADIGAS, 2012).

O grande impulso foi dado à utilização terrestre da geração fotovoltaica a partir da crise mundial de energia em 1973/1974. A partir do fim da década de 70, o uso terrestre supera o uso espacial, sendo que esta diferença tem aumentado grandemente. Este uso crescente vem sendo acompanhado por inovações que permitem o aumento da eficiência de conversão de energia das fotocélulas, bem como uma significativa redução de seus custos. (FADIGAS, 2012).

Lembrando que, os primeiros painéis solares foram utilizados para a corrida espacial, no ano de 1958, quando o satélite Vanguard I foi lançado em sua viagem espacial com um painel minúsculo, de 1 Watt, para alimentar o seu rádio. Enquanto no Brasil, o primeiro sistema fotovoltaico foi instalado no ano de 2011 no município de Tauá, no sertão do Ceará, a usina de 340 km e 4.680 painéis fotovoltaicos teve como capacidade inicial a geração de de 1 MW.

Desde do marco no território brasileiro, o sistema fotovoltaico vem crescendo cada vez mais. Pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar) aponta que o país superou a marca de 2 milhões de sistemas solares fotovoltaicos instalados em telhados, fachadas e pequenos terrenos, formando cerca de 22 gigawatts (GW) de potência instalada.

Devido à esse aumento, a rede de distribuição vem sofrendo varios impactos, como por exemplo, os harmônicos de corrente e tensão. Para Karimi et al. (2015), problemas de distorção harmônica são evidenciados na alta penetração fotovoltaica e tem contribuindo nas perdas no sistema de distribuição através do aquecimento, devido a conversão de corrente contínua em corrente alternada utilizando o conversor.

O problema de componentes harmônicas na rede surge quando uma das componentes possui uma frequência que corresponde a um valor máximo ou mínimo de impedância em uma associação em paralelo entre um elemento capacitivo e um elemento indutivo. Quando essa componente senoidal, com frequência múltipla da frequência da rede, está presente, ela excita essa associação, resultando em uma troca de energia entre os elementos indutivos e capacitivos.

Isso pode levar a um potencial aumento nos valores de corrente e tensão, o que, por sua vez, pode afetar negativamente outros elementos conectados no sistema. É importante observar que a ressonância em paralelo ocorre quando, em uma determinada frequência, a combinação das impedâncias resulta em um valor máximo de impedância.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho é avaliar o impacto da ressonância sobre os harmônicos gerados pelos inversores quando ocorre o aumento do grau de penetração na rede de média tensão.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Apresentar os componentes dos sistemas fotovoltaicos e realizar uma modelagem do mesmo;
- Analisar o que seriam harmônicos e o efeito de ressonância, e quais suas interferências em um sistema fotovoltaico;
- Simulação de um sistema do IEEE através do software OpenDSS afim de verificar como os SFCR's se comportam em um sistema elétrico;
- Avaliar os resultados dos estudos de caso.

1.3 Estrutura do trabalho

Com o objetivo de apresentar o trabalho de forma mais coesa, foi-se dividido em 5 capítulos:

O capítulo 1 faz a introdução do tema, contexto histórico da problemática, relevância do tema, objetivos e sua justificativa de estudo.

O capítulo 2 aborda os sistemas fotovoltaicos, apresentando sua estrutura e componentes pertencentes, como os módulos fotovoltaicos e inversores, além disso apresentar a modelagem de sistema fotovoltaicos feita no sistema do IEE que simulará os casos e suas conclusões.

O capítulo 3 trata sobre os harmônicos e a ressonância nos sistemas fotovoltaicos, introduzindo o tema, conceitos, impacto causado na distribuição de energia e métodos computacionais para a análise dos harmônicos na rede de distribuição e suas conclusões

O capítulo 4 apresenta o estudo de casos do trabalho, inicialmente uma introdução sobre a rede elétrica, e depois apresentando o comportamento do sistema em dois modos, condição de alta irradiação e de baixa irradiação, e mostrando os resultados obtidos e conclusões acerca dos estudos.

O capítulo 5 refere-se as considerações finais dos cenários propostos e resultados da pesquisa, quais implicações em relação as harmônicos injetados na rede, e o efeito de ressonância nelas, e as dificuldades com o crescimento de instalações de SF6's nas redes de distribuição e quais os próximos caminhos para a pesquisa.

CAPÍTULO 2: SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

2.1 Introdução

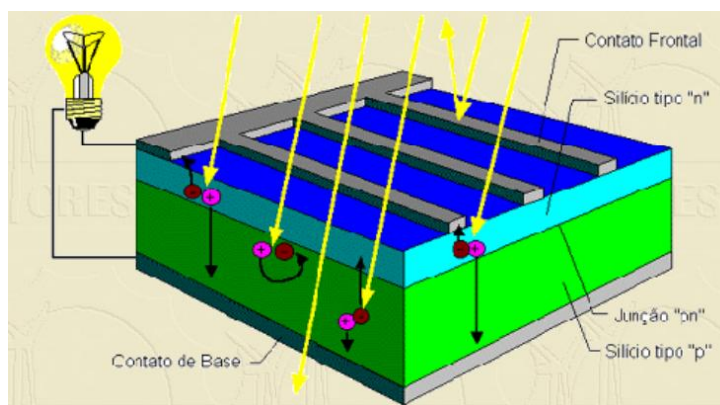
O sistema fotovoltaico é um circuito elétrico que consegue converter a energia solar em eletricidade, através dos painéis solares. São equipamentos responsáveis em captar a luz do sol e a transformam em corrente elétrica (SOPRANO, 2021).

O conhecimento do efeito fotovoltaico tem raízes que remontam ao século XIX. Em 1839, Becquerel demonstrou a viabilidade da conversão da radiação luminosa em energia elétrica, ao expor um eletrodo imerso em uma solução de eletrólito à luz. Esse mesmo fenômeno foi observado em um sólido, o selênio, em 1877 por Adams e Day na Inglaterra. Foi somente em 1883 que surgiu a primeira célula solar feita de selênio, apresentando uma eficiência de conversão de aproximadamente 1%.

Os materiais semicondutores, como por exemplo o selênio, são utilizados nas células fotovoltaicas, pois possuem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução totalmente vazia à temperaturas muito baixas. Entre as bandas, apresentam uma separação de ordem 1eV, com isso aumentando a sua condutividade.

Uma propriedade fundamental para as células fotovoltaicas é a possibilidade de fótons, na faixa do visível, com energia superior ao gap do material, excitarem elétrons à banda de condução. Este efeito, que pode ser observado em semicondutores puros, não garante por si só o funcionamento de células fotovoltaicas. Para obtê-las é necessário uma estrutura apropriada para que os elétrons excitados possam ser coletados, gerando uma corrente útil.

Figura 1 – células fotovoltaicas



Fonte: USP, 2018

O semicondutor mais comumente empregado é o silício, cujos átomos são distintivos por terem quatro elétrons de ligação que se conectam uns aos outros, constituindo uma estrutura cristalina. Se adicionarem átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, um elétron excedente surge, incapaz de ser emparelhado, e permanece fracamente associado ao seu átomo

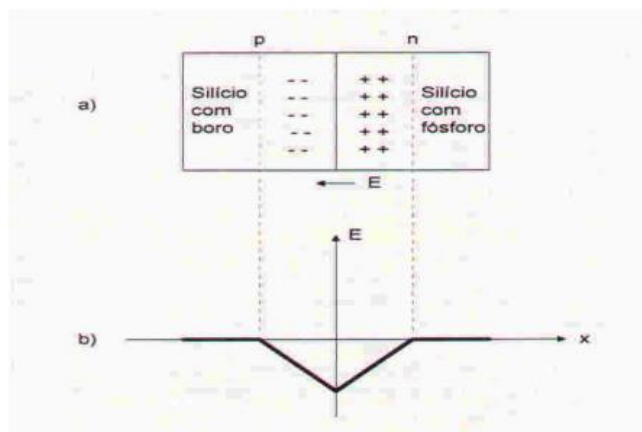
de origem. Esse fenômeno resulta na liberação desse elétron para a banda de condução com a aplicação de uma quantidade mínima de energia térmica.

Por outro lado, quando átomos com apenas três elétrons de ligação, como o boro, são introduzidos, ocorre uma deficiência de um elétron necessário para preencher as ligações com os átomos de silício na estrutura. Essa ausência de elétron é conhecida como "buraco" ou "lacuna", e com a aplicação de uma quantidade mínima de energia térmica, um elétron de um local adjacente pode ocupar essa posição, resultando no deslocamento do buraco.

Se, partindo de um silício puro, forem introduzidos átomos de boro em uma metade e átomos de fósforo na outra, será formado o que se chama de junção pn.

Caso uma junção pn for exposta a fótons com energia maior que o *gap* (gap de energia), que é a diferença de energias entre as bandas de valência e condução, ocorre a geração de pares elétron-lacuna. Acontecendo em uma região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando assim, uma corrente através da junção, este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial ao qual chamamos de Efeito Fotovoltaico.

Figura 2 – efeito fotovoltaico



Fonte: USP, 2018

Neste capítulo, pretende-se apresentar os componentes de um sistema fotovoltaico e elucidar o seu funcionamento, como os módulos fotovoltaicos e inversores. Além disso apresentar a modelagem de sistema fotovoltaicos feita no sistema do IEE que simulará os casos e suas conclusões.

2.2 Componentes do Sistema Fotovoltaico

A energia solar pode ser implementada em dois tipos: conectada à rede (*on-grid*) e autônoma (*off-grid*). Independentemente do tipo de sistema escolhido, ambos compartilham os mesmos elementos fundamentais, ou seja, os painéis solares e os inversores.

O sistema *on grid* é aquele utiliza a rede de distribuição, ou seja, está ligado diretamente a rede. De maneira simplificada, os painéis solares geram eletricidade em corrente contínua e,

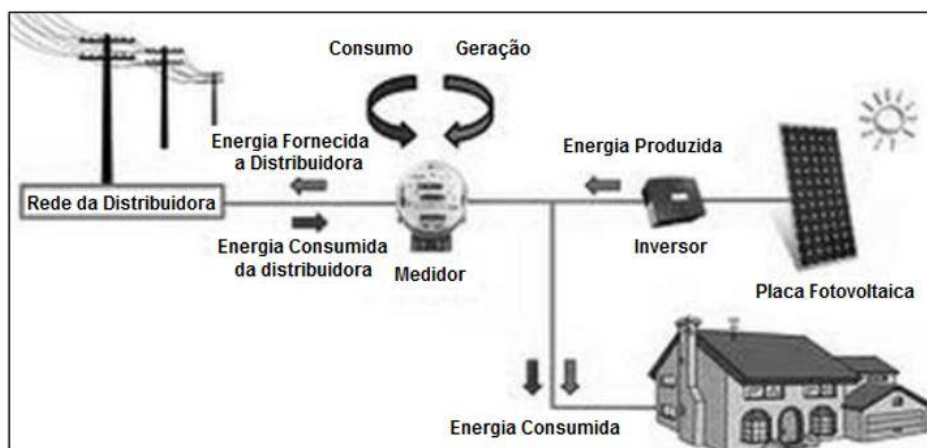
após ser transformada em corrente alternada por meio do inversor de frequência, é introduzida na rede de energia elétrica. Esse processo de conversão ocorre graças ao inversor (PEREIRA & OLIVEIRA, 2013).

Por outro lado, no sistema off-grid, não há necessidade de incluir a rede de distribuição elétrica em seu circuito. Esse sistema também é referido como autônomo ou isolado e, por isso, é mais comum ser empregado em locais remotos, como as regiões ribeirinhas do estado do Pará. Há dois tipos de sistemas off-grid: aqueles com armazenamento e aqueles sem armazenamento. O primeiro é adequado para o carregamento de baterias de veículos elétricos, enquanto o segundo é mais comum em aplicações como o bombeamento de água. (VILLALVA & GAZOLI, 2012)

Como mencionado, um dos elementos mais importante do sistema fotovoltaico são os módulos solares. Um módulo solar padrão é composto por várias células fotovoltaicas, que desempenham um papel fundamental no processo de transformação da energia solar em eletricidade. Para realizar essa conversão, as células fotovoltaicas aproveitam o efeito fotovoltaico. (PERES PACHECO; NUNES SANTOS, 2021).

Além dos painéis solares, os inversores desempenham a função de converter a corrente contínua em um valor de corrente alternada, com a capacidade de ajustar a frequência e o nível de tensão gerados, tornando possível a conexão do sistema à rede elétrica convencional. (PEREIRA & OLIVEIRA, 2013)

Figura 3 - Sistema fotovoltaico à rede



Fonte: Empresa EXACTA

Quando escolhido o sistema fotovoltaico mais adequado, é crucial considerar alguns aspectos, como a inclinação das placas. Isso ocorre devido à difusão dos raios solares ao atravessar a atmosfera, o que resulta em uma inclinação específica para cada região do mundo, visando a eficiência do sistema fotovoltaico.

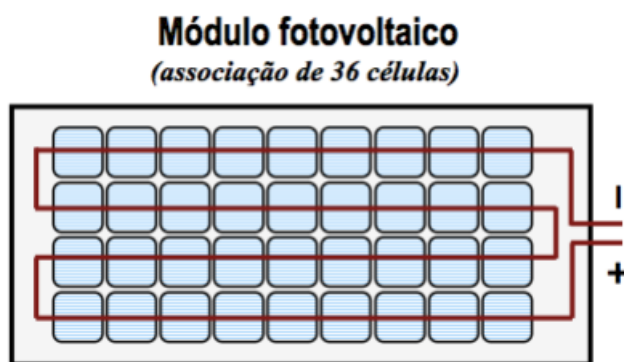
É importante destacar que todas as etapas de produção de energia ocorrem perdas, por exemplo perdas nos cabos e na conversão de energia. Por essa razão, é fundamental dimensionar

cada circuito levando em conta essas perdas, e constantemente buscar abordagens para minimizar esses desafios (PINHO et al., 2008).

2.2.1 Módulo Fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos têm uma importância crítica nos sistemas fotovoltaicos, já que desempenham o papel fundamental de converter a radiação solar em eletricidade. Esses módulos consistem em células fotovoltaicas, cada uma produzindo até 3 watts no máximo, o que significa que as placas são compostas por várias dessas células interligadas em série.

Figura 4 – módulo fotovoltaico

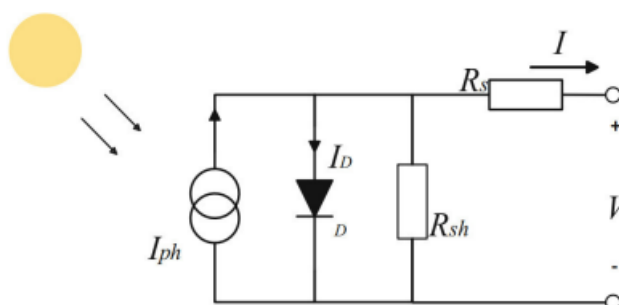


Fonte: Módulos fotovoltaicos (2010)

Para a construção dos módulos, é essencial conferir características que lhes permitam resistir às adversas condições ambientais às quais estarão expostos. Para garantir proteção contra os efeitos mecânicos, intempéries e umidade, as células são habitualmente encapsuladas em uma camada de etileno-acetato de vinila (EVA). Esse material é flexível, translúcido e não reflete a radiação solar, além de proporcionar isolamento elétrico entre as células. (CARNEIRO, 2010)

As células solares são responsáveis por gerar o efeito fotovoltaico. Esse efeito acontece quando a luz solar atinge uma junção P-N em um semicondutor, o que resulta na excitação dos elétrons e sua liberação dos átomos. Esses elétrons liberados são então direcionados para os terminais da célula solar por meio de um campo elétrico, onde podem ser aproveitados para alimentar uma carga elétrica externa. (MESSENGER;ABTAHI,2017).

Figura 5 – circuito interno da células



A figura apresenta o circuito equivalente do efeito fotovoltaico, e a partir do circuito é possível definir o comportamento de tensão e corrente da célula, seguindo a equação:

Equação 1 - Corrente da célula fotovoltaica

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\left(\frac{q(V+I.R_S)}{AkT} - 1 \right)} - \frac{V+I.R_S}{R_{SH}} \right) \quad (1)$$

Onde:

I: corrente de saída da célula.

I_L : corrente gerada pela luz.

I_0 : corrente de saturação do diodo.

q: carga do elétron.

V: tensão de saída da célula.

R_S : resistência série da célula solar.

R_{SH} : resistências hunt.

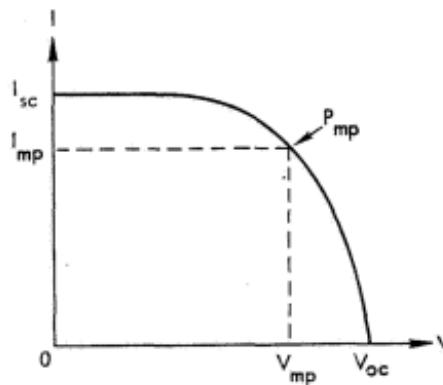
k: Constante de Boltzmann.

T: Temperatura absoluta.

A: Constante arbitrária para adequação da curva (entre 1e5).

A equação estabelece uma curva característica de tensão vs corrente, como mostra a figura abaixo:

Figura 6 – curva característica de tensão



Fonte: (RAUSCHENBACH, 1976)

Conhecida como curva V-I, é responsável por retratar o comportamento característico da célula fotovoltaica. Possui três regiões distintas: uma região de corrente constante, outra de tensão constante e uma região intermediária de transição com um ponto de inflexão. Além dessas regiões, três pontos de funcionamento principais na curva V-I são o ponto de circuito aberto (V_{OC} - corrente zero), o ponto de curto-circuito (I_{sc} - tensão zero) e o ponto de máxima potência (P_{MP}), que está na região de transição e representa um equilíbrio entre corrente e tensão, maximizando a potência de saída. (PACHECO, 2021).

Diversos fatores podem afetar as características elétricas dos módulos fotovoltaicos. Estes incluem a qualidade da fabricação das células, as opções de conexão em série ou paralelo e a eficiência de conversão. A qualidade na fabricação das células pode influenciar tanto a

capacidade de absorção da energia solar pelos painéis, a conexão dos módulos interfere na corrente e na tensão do circuito. E, por fim, a eficiência da conversão diz o quanto a célula consegue converter.

2.2.2 Inversores

Outro equipamento de extrema importância, inversores. São os dispositivos eletrônicos que fornecem energia elétrica em corrente alternada a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua (PINHO & GALDINO, 2014).

A energia na saída dos módulos é em corrente contínua (CC), inviabilizando a aplicação direta nos equipamentos, que na sua maioria, atendem em corrente alternada (CA), então, utiliza-se os inversores que convertem de CC para CA. Também, é capaz de ajustar a frequência e nível de tensão gerada, para que o sistema possa ser conectado à rede pública, on grid, de acordo com as normas vigentes estabelecidas pela Aneel. (PEREIRA & OLIVEIRA, 2011)

Apresentam algumas características necessárias, voltados para segurança, rastreamento e confiabilidade. Quando conectados à rede, é comum que haja uma característica de desligamento automático quando a presença da rede elétrica não é detectada. Essa funcionalidade é conhecida como "proteção anti-ilhamento" (*anti-islanding*) e serve para prevenir a possibilidade de ocorrência de tensões inesperadas durante a manutenção da rede elétrica.

O inversor possui "Maximum Power Point Tracking (MPPT)", que otimiza o ponto de operação para atingir a máxima potência sob condições específicas de irradiação solar e outros fatores climáticos, como a temperatura dos módulos fotovoltaicos. (KJAER, PEDERSEN e BLAABJERG, 2005)

Além disso, asseguram a confiabilidade do sistema, uma vez que qualquer falha em um inversor terá impacto apenas em uma parcela da usina fotovoltaica. O tempo médio para a primeira falha (Mean Time to First Failure - MTFF) (BONN, 2002) é estimado em aproximadamente cinco a dez anos. (TEODORESCU, LISERRE e RODRÍGUEZ, 2011).

Dado que a instalação de um sistema fotovoltaico permanece como um investimento significativo para a maioria dos brasileiros, muitos acreditam que os microinversores representam a escolha mais vantajosa, mesmo que tenham uma capacidade menor de geração de energia.

Conforme indicado pelos pesquisadores (RODRIGUEZ, FUENTE, et al., 2013), fica evidenciado que os microinversores possuem uma vida útil superior, que está principalmente relacionada à tecnologia dos capacitores utilizados (por exemplo, a substituição de capacitores

eletrolíticos por capacitores de filme). Além disso, eles ocupam menos espaço em comparação aos inversores convencionais ligados em série (strings).

Os microinversores comerciais frequentemente empregam topologias com transformadores, o que tende a diminuir a eficiência. Então, para diminuir esses desafios de tamanho e peso, são adotados transformadores de alta frequência na etapa de conversão de tensão contínua para contínua (CC-CC). Este transformador proporciona isolamento galvânico entre a rede elétrica e o sistema fotovoltaico, eliminando qualquer corrente de fuga entre os módulos fotovoltaicos e o aterramento, por meio de uma abordagem de aterramento duplo da estrutura (BRITO, 2013).

Mas, existe inversores que operam sem um transformador incorporam um circuito que envolve o filtro de saída, a impedância da rede elétrica e a capacitância parasita que surge entre as células do módulo fotovoltaico e o aterramento. Como resultado, há a geração de uma corrente de modo comum que é injetada na rede elétrica, o que leva ao aumento do conteúdo harmônico e à ocorrência de interferências eletromagnéticas (EMI). (MENESES, BLAABJERG, et al., 2013).

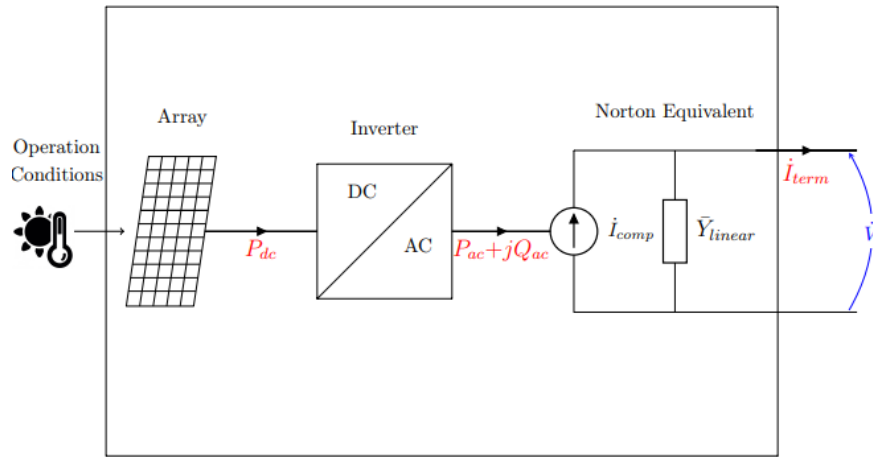
Lembrando que a distorção harmônica se refere à alteração na forma da onda senoidal na saída do inversor. Uma vez que os inversores operam por meio de comutação, eles geram harmônicos em sua saída. Portanto, é crucial priorizar um inversor que forneça a melhor qualidade de energia possível. A magnitude dessa distorção pode variar dependendo do tipo de inversor e deve ser especificada pelo fabricante.

2.3 Modelagem do sistema Fotovoltaico

O diagrama utilizado no software para representar o elemento *PVSystem* (sistema fotovoltaico) modela a interação entre os módulos e o inversor, assumindo que o inversor é capaz de rastrear rapidamente o ponto de potência máxima (MPP) do painel. O *array* é o componente responsável por converter a energia solar em energia elétrica, enquanto o inversor realiza a conversão da corrente contínua gerada pelo arranjo fotovoltaico em corrente alternada para ser injetada na rede elétrica.

A figura 8 apresenta o diagrama em bloco do *PVSystem*, detalhando os componentes principais do sistema, desde as condições de operação até o equivalente elétrico do inversor representado pelo modelo de Norton. Este modelo simplifica a interação do sistema com a rede elétrica, permitindo uma análise dinâmica do comportamento do inversor e sua resposta às condições da rede.

Figura 07 – Diagrama em bloco do *PVSystem*



Fonte: EPRI, 2020

Um circuito equivalente de Norton consiste em uma fonte de corrente independente em paralelo com a resistência equivalente de Norton, como ilustra a figura 08. O OpenDss utiliza a definição do equivalente de Norton para um sistema fotovoltaico trifásico conectado à rede por meio do barramento **Connection Bus**.

Para obter a potência de saída do painel fotovoltaico, o software necessita da irradiância em um intervalo de tempo, t , é convertida na potência de saída DC do painel, como ilustra na equação 2:

$$P_{dc}[t] = P_{mpp} \times irradiance \times \varphi(t) \times PTCurve(Temperature[t]) \quad (2)$$

Fonte: EPRI, 2020

Onde:

P_{mpp} : potência máxima do painel

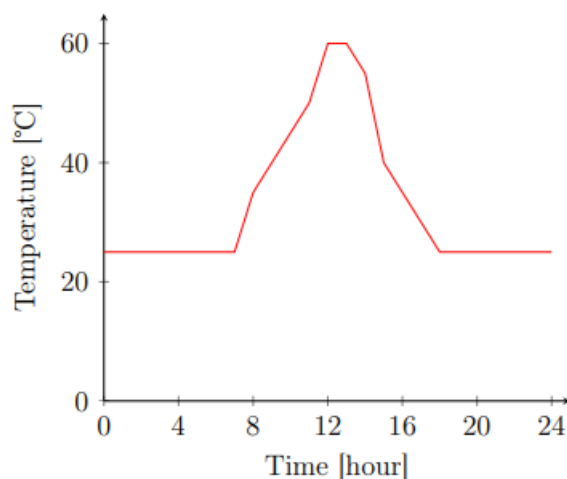
$Irradiance$: irradiância em kW/m^2 ;

$\varphi(t)$: curva de irradiância em relação ao tempo;

$PTCurve$: valor de correção.

A irradiância e a temperatura no arranjo fotovoltaico são dados que definem a condição operacional do circuito. A curva de temperatura por um período de tempo, em $^{\circ}\text{C}$ no arranjo fotovoltaico, como mostra a figura:

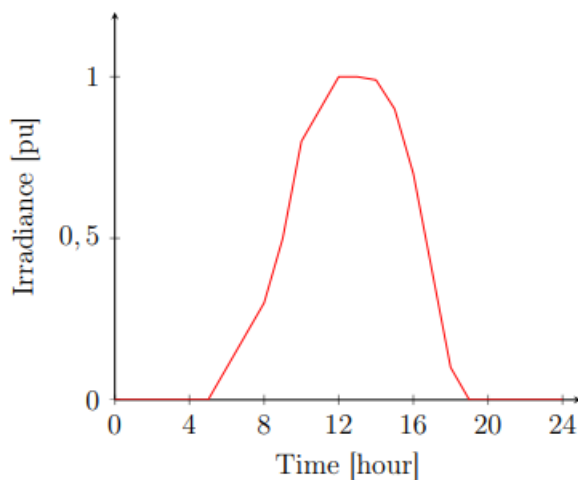
Figura 08 – Curva do tempo x temperatura



Fonte: EPRI,2020

A curva de irradiância é expressa em unidades por unidade (p.u) e varia ao longo do tempo. Como mostrado no gráfico, o valor máximo de irradiância, que é 1 p.u, ocorre ao meio-dia, às 12h.

Figura 09 – Curva do tempo x irradiância



Fonte: EPRI,2020

2.4 Conclusão

O sistema fotovoltaico é composto por diversos dispositivos que auxiliam na conversão da energia proveniente da radiação solar em eletricidade. O conhecimento detalhado desses dispositivos é essencial para a modelagem computacional, permitindo o planejamento adequado de redes elétricas que utilizam esse tipo de geração. Diante disso, este capítulo apresentou e descreveu a modelagem necessária para a realização de estudos em regime permanente e harmônico em redes de distribuição com sistemas fotovoltaicos. No próximo capítulo, será

abordada a modelagem harmônica dos elementos de uma rede elétrica e dos sistemas fotovoltaicos.

CAPÍTULO 3: ANÁLISE HARMÔNICO NO SISTEMA ELÉTRICO

3.1 Introdução

Nos tempos atuais, um dos assuntos mais debatidos é sobre a qualidade de energia em um sistema elétrico. De forma ampla, qualidade de energia elétrica (QEE) é a conformidade da energia elétrica entregue aos usuários nos parâmetros estabelecidos ou dos valores de referência. Analisa os níveis de tensão e corrente nas barras dos sistemas elétricos de potência, afim de manter a forma senoidal esperada e nível de frequência da rede (FUCHS; MASOUM, 2008).

Devido ao crescimento dos problemas associados à qualidade da energia elétrica decorrente da contaminação das redes ao longo do tempo, tornou-se imprescindível estabelecer regulamentações para os limites dos parâmetros de qualidade da energia elétrica. No âmbito nacional, esses parâmetros e seus limites são definidos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), que desenvolve as diretrizes do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional).

O PRODIST consiste em um conjunto de documentos normativos que delineiam as orientações para as atividades de distribuição de energia elétrica no Brasil. Especificamente, o Módulo 8 define valores precisos para todos os parâmetros ligados ao fornecimento ou uso de energia elétrica. Dentro desses limites estabelecidos, uma das grandezas regulamentadas pelo Módulo 8 são as harmônicas, determinando os limites aceitáveis para sua ocorrência.

O objetivo do capítulo 3 é iniciar a análise das harmônicas do sistema, devido à crescente injeção de potência ativa na rede através dos sistemas fotovoltaicos. À medida que a quantidade de harmônicas no sistema elétrico aumenta, há uma maior probabilidade de que alguma harmônica ressoe com uma das frequências naturais do sistema, o que resulta em um aumento da distorção harmônica. Esse fenômeno é conhecido como ressonância harmônica e pode causar degradação na qualidade da rede.

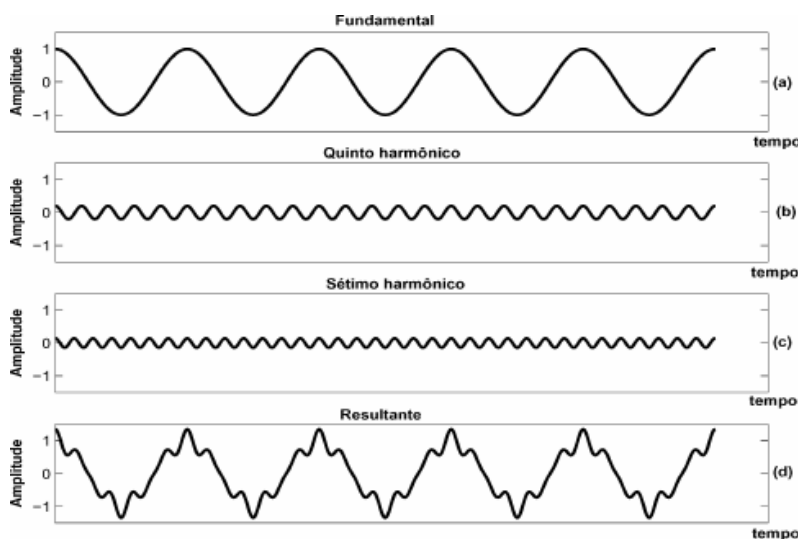
3.2 Conceito de Harmônico

Em um sistema elétrico ideal, as tensões e as correntes devem apresentar formas de onda senoidais perfeitas e estar em equilíbrio. No entanto, na prática, observam-se distorções, as quais são conhecidas como harmônicos de tensões ou correntes. Um harmônico é um componente de uma onda periódica, o qual a sua frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental (Brasil, 60 Hz.). (ARRILAGA, 2004).

Com o aumento de cargas não lineares na rede, a presença de harmônico de tensão ou corrente são maiores, causando uma queda na qualidade de energia promovido por uma concessionária. Por causa disso, é comum utilizar ferramentas matemáticas, como a série de

Fourier, para a quantificação do grau da distorção principalmente em relação as harmônicas ímpares, quais são as mais prejudiciais.

Figura 10: formas de ondas com harmônicas



Fonte: TORRES, 2010

A intensidade da distorção depende principalmente da impedância equivalente percebida pela carga não linear ou pela fonte de corrente harmônica, bem como da corrente fornecida por ela. É importante observar que a carga não tem controle sobre os níveis de distorção de tensão. Portanto, a mesma carga pode resultar em diferentes distorções de tensão, dependendo de sua localização no sistema elétrico. (PAULILO e TEIXEIRA , 2010)

Dispositivos não linear são aqueles que não produzem uma corrente senoidal mesmo quando aplicada uma tensão senoidal. E são separados em três grupos: dispositivos a arco, saturados e equipamentos de eletrônica de potência.

Como os estudos de caso estão voltados para as consequências na rede de média tensão, envolvendo um sistema fotovoltaico de 50 kW, será abordado com mais detalhes o impacto de dispositivos saturados e eletrônica.

Os transformadores, dispositivo saturado, podem sofrer alguns danos por causa das harmônicas, principalmente na região dos enrolamentos, como possíveis ressonâncias entre os enrolamentos do transformador. Além disso, um transformador que esteja submetido a uma distorção de corrente superior a 5% deverá ser operado abaixo da sua potência nominal, operação conhecida como derating. (PAULILO e TEIXEIRA , 201-)

Sendo um dos equipamentos mais importantes em uma rede de distribuição, existem limites estabelecidos para as tensões harmônicas. Há diversas normas internacionais (IEEE 519, IEC, NRS 048, NTCSE) que estabelecem esses limites tanto para a tensão quanto para a emissão de correntes harmônicas. No Brasil, o ONS, por meio do submódulo 2.2 (padrões de desempenho da rede básica), oferece níveis tanto para as ordens ímpares quanto para as componentes pares.

Os harmônicos também podem ser encontrados em equipamentos de eletrônica de potência, como os inversores, que estão em sistemas fotovoltaicos, para converter corrente contínua em corrente alternada.

3.3 Conceito de Ressonância

Além das distorções harmônicas, as cargas não lineares podem causar o fenômeno da ressonância série ou paralela em um sistema elétrico. Este fenômeno é caracterizado pela troca de energia entre dispositivos indutivos e capacitivos distribuídos ao longo do sistema, podendo resultar na amplificação das tensões nodais do sistema. (ARRILLAGA; WATSON, 2003, XU *et al.*, 2005).

A condição de ressonância pode causar uns efeitos indesejados na rede, como a amplificação dos componentes harmônicos, redução na eficiência da geração, redução de vida útil de alguns componentes elétricos e o mal funcionamento do sistema e cargas conectadas. (ARRILLAGA; WATSON, 2003).

Quando um circuito elétrico apresenta combinações entre resistores, capacitores e indutores tende a ter um determinado comportamento quando a frequência da fonte de alimentação CA se aproximar da sua frequência natural. Se a frequência da fonte de alimentação para um circuito corresponder exatamente à frequência natural resultante da configuração do circuito, o circuito estará na condição de ressonância.

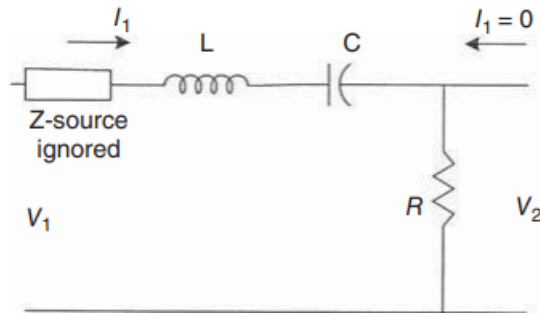
Nessa condição, os elementos reativos trocam energia apenas entre si, ou seja, exceto pelas perdas resistivas no sistema, a fonte não precisa fornecer energia para nenhum deles. Assim, a ressonância é precisamente definida como a condição em um circuito RLC na qual a corrente resultante está em fase com a tensão aplicada, ou seja, o circuito se apresenta para a fonte como uma impedância puramente resistiva.

Existem dois tipos de circuito ressonante, série e paralelo. Em série é a condição na qual as reatâncias capacitivas e indutivas de um circuito RLC são iguais. Enquanto, em um circuito ressonante paralelo é entre a troca de energia entre o indutor e capacitor ligados em paralelo com uma fonte de tensão.

3.3.1. Circuito Ressonante Série

Em um circuito RLC série, entra em ressonância se a corrente está em fase com a tensão total sobre o circuito, em que a frequência do efeito depende dos valores de L (indutância) e C (capacitância). Na figura, um circuito RLC em série:

Figura 11: Circuito em série



Fonte: DAS, 2015

Com isso, a sua impedância:

$$Z_{eq}: R + j(X_L - X_C) \quad (2)$$

Onde:

R = Resistência

X_L = Reatância indutiva

X_C = Reatância capacitiva

E a corrente na ressonância:

$$I: \frac{V_1}{R} = \frac{V_2}{R}. \quad (3)$$

A corrente é limitada pela resistência, ou seja, são diretamente proporcional. Além disso, se a tensão e a corrente estão em fase no circuito, este está em ressonância, ou seja, um circuito RLC está em ressonância se sua impedância é puramente resistiva. Para isso ocorrer, é necessário que o termo imaginário da impedância seja igual a zero. (DAS, 2015)

Com essa relação, é possível saber a frequência de ressonância: $f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Os circuitos ressonantes são seletivos em frequência, o circuito responde a uma faixa estreita de frequências.

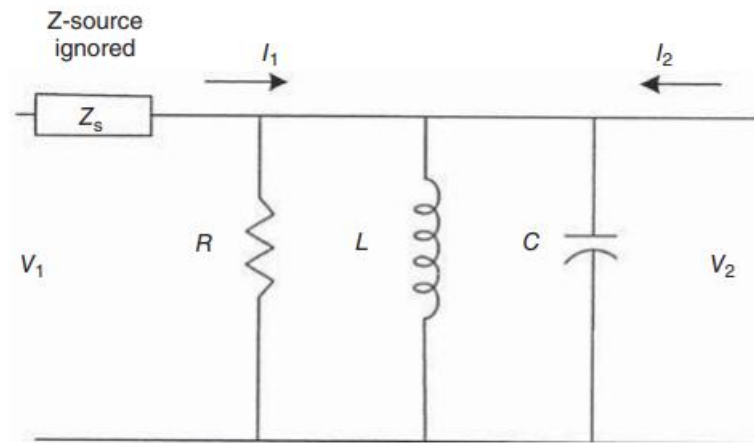
3.3.2. Circuito Ressonante Paralelo

Na teoria, existe dois estudos para circuitos ressonantes: ideal e o real. O ideal utiliza as mesmas exigências de um circuito ressonante série, a diferença está no comportamento quando em ressonância. Em série, ocorre um cancelamento das reatâncias do capacitor e indutor e por isso apresentam uma impedância resultante nula. (DAS, 2015)

Enquanto no circuito paralelo ideal, com a associação paralela do capacitor e indutor na frequência de ressonância, gera uma impedância infinita. Dessa forma, ambos circuitos estejam em ressonância, a impedância equivalente é um valor resistivo puro.

No circuito ressonante real, deve-se incluir a resistência elétrica do indutor devido ao seu fio. A figura abaixo circuito RLC paralelo:

Figura 12: Circuito em paralelo



Fonte: DAS, 2015

Em um circuito RLC paralelo, a admitância é alta na frequência de ressonância:

$$Y_{R-L}: \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \quad (4)$$

Um circuito ressonante em série a frequência de ressonância é aquela na qual a impedância era mínima com a corrente máxima, então a impedância de entrada é puramente resistiva e o circuito apresenta um fator de potência unitário. No caso do circuito ressonante paralelo, a resistência R no circuito equivalente depende da frequência, logo, o valor máximo de Vc não é necessariamente a mesma para quando o fator de potência unitária. (DAS, 2015)

3.3.3. Ressonância Harmônica

A ressonância harmônica ocorre em um ou mais harmônicos de ordem inferior gerados por cargas não lineares, como os capacitores. Quando esses capacitores são conectados à rede para melhorar o fator de potência ou a compensação de potência reativa, eles atuam em paralelo com a impedância do sistema. Isso significa que a impedância do sistema será considerada indutiva.

Segundo J.C. Das, a impedância indutiva da fonte, analisada no ponto de aplicação dos capacitores é igual a reatância capacitiva dos capacitores de potência na frequência de ressonância, mostrado na fórmula a seguir:

$$j2\pi f_n L = \frac{1}{j2\pi f_n C} \quad (5)$$

Quando excitado na frequência ressonante, ocorre uma ampliação da corrente harmônica no circuito sintonizado em paralelo. Essa ampliação pode sobrecarregar os capacitores, interferir no fusível e distorcer a forma de onda, o que pode causar efeitos danosos no sistema de energia.

Um sistema de distribuição está sempre em constante mudança, fazendo com que a frequência ressonante também oscile, sendo dependente das variações na impedância do sistema, mesmo quando os equipamentos, como os capacitores, são dimensionados para evitar a condição ressonante. (DAS, 2015)

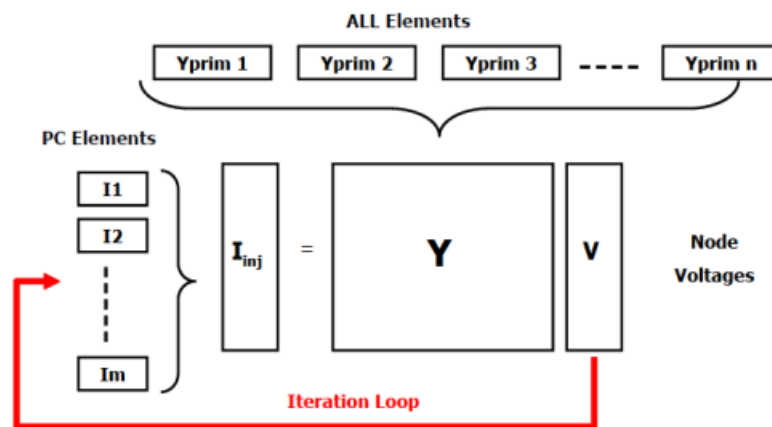
A ressonância no sistema de energia é um problema potencial sério, podendo causar falhas nos componentes e desligamentos de usinas. Além disso, é um fenômeno muito incerto, que pode não surgir de imediato e aparecer apenas sob certas condições operacionais. Uma forma de reconhecê-la é associando-a a algum tipo de carga perturbadora, como os fornos a arco, inversores e realizando medições online de longo prazo (DAS, 2015)

3.4. Métodos Computacionais para Análise Harmônica

Os harmônicos utilizados para modelagem da rede elétrica são baseados em dados obtidos de um SFCR. O fluxo de carga harmônico verifica repetidamente a solução para cada ordem harmônica do espectro especificado da mesma forma que faz para a frequência fundamental, alternando apenas a ordem de frequência utilizada. O software utilizado para modelar o sistema e seus componentes de rede é o *OpenDS*, e o modo do fluxo de potência aplicado é o *HarmonicT*, que emprega controle temporal e ações em sua resolução.

O OpenDSS é um software para modelar sistemas de distribuição de energia elétrica, integrado a uma rede de comunicação que coordena os controles dos componentes de distribuição e conversão de energia. Assim, os elementos de entrega e conversão de energia operam de forma conjunta para solucionar o circuito proposto. A Figura 16 ilustra o método de fluxo harmônico aplicado no software.

Figura 13: Circuito em paralelo



Fonte: DUGAN; MONTENEGRO, 2022

O programa opera com uma formulação nodal, onde cada nó é representado por uma matriz Y . Inicialmente, é calculada uma matriz de admitância para cada elemento. O conjunto de todas essas matrizes influencia na formação da matriz de admitância geral (Y_s).

A Figura 16 representa o ciclo de iteração do programa, cujo objetivo é obter as correntes de injeção utilizadas na modelagem das cargas harmônicas. O processo inicia com a

inserção de um valor de tensão pelo software, dando início aos ciclos. Assim, as correntes de injeção de cada elemento de conversão de energia são armazenadas em um vetor e calculadas de acordo com a seguinte equação:

$$I_{INJ}(V) = Y_s \times V \quad (6)$$

A corrente injetada é uma função da tensão e representa a parte não linear das correntes dos elementos. Dessa forma, a maneira mais simples de resolver o sistema é por meio de um ponto fixo, conforme definido na equação Y. O processo inicia com a matriz de admitância do sistema, seguida da atribuição de um valor inicial para V_n . Em seguida, são computadas as correntes de compensação de cada elemento de conversão de energia para formar o vetor de corrente injetada, permitindo a estimativa dos valores de V_{n+1} .

$$V_{n+1} = [Y_s]^{-1} \times I_{INJ}(V_n) \quad (7)$$

Onde $n=0, 1, 2$, dessa forma, é calculada o fluxo harmônico, tendo o processo repetido para cada ordem de harmônico presente no sistema.

3.4.1. Frequência de Varredura

Os estudos de harmônicos podem ser realizados no domínio do tempo ou da frequência dependendo, na industria, os metodos no domínio da frequência são os mais utilizados. A varredura de frequência é uma tecnica com o objetivo de mostrar a resposta em frequência da rede sendo observada de um barramento ou nó, por isso, o *OpenDSS* usa esse método de analise na sua modelagem.

Aplicando a técnica, a impedância da barra é plotada em relação à frequência, com isso, a matriz de admitância da rede é recalculada em cada frequência que está dentro da faixa, mais a injeção de corrente para obter as tensões de barramento, como apresenta:

$$[X_h][V_h] = [I_h] \quad (8)$$

Onde o valor resultante no barramento de injeção corresponde à impedância de transferência do ponto de acionamento, os picos de impedância na varredura respondem em uma ressonância paralela enquanto o vale implica uma ressonância em série.

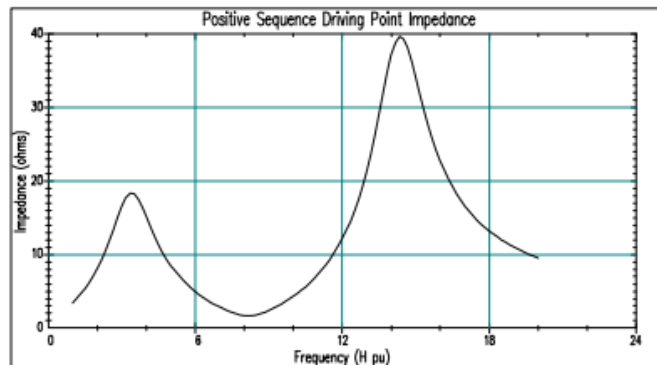
O método de varredura serve para componentes lineares, como, as aplicações em estudos de harmônicos e ressonancia, esses componentes operam em sua região linear, trazendo uma eficiencia nos resultados.

Existem dois tipos de varreduras de frequência, o mais comum basea-se na injeção de corrente no nó. Se a injeção de corrente for atribuída a um valor de 1A ou 1pu, os valores das tensões determinadas representam o ponto de condução e as impedâncias de transferência como visto no nó. Dessa forma, é aplicado para estimar as tensões harmonicas que serão produzidas.

Essa técnica é frequentemente usada para avaliar os impactos potenciais de novos TEA ou outra carga produtora de harmônicos e é muito útil para identificar ressonâncias em série e paralelas.

Ressonâncias paralelas, que estão associadas a altas impedâncias aos fluxos de corrente, aparecem como "picos" em gráfico. As ressonâncias em série, que estão associadas a baixas impedâncias para fluxos de corrente harmônica, aparecem como "vales".

Figura 14: Curva da impedancia x frequência



Fonte: HALPIN; RIBEIRO, 1998

O segundo tipo de varredura é conduzido da mesma maneira descrita anteriormente, exceto que uma tensão de 1V ou 1pu é conectada a um nó na rede, as tensões resultantes representam as funções de transferência de tensão para todos os outros nós no modelo do sistema.

Mesmo sendo semelhante na técnica à varredura de frequência descrita anteriormente, o procedimento de aplicação de uma fonte de tensão é mais comum ser chamado de análise de "função de transferência de tensão", para ser "varredura de frequência" é preciso que seja associado ao ponto de condução e às impedâncias de transferência determinadas pela injeção de uma corrente conhecida em um nó.

3.5 Conclusão

Com o aumento dos sistemas fotovoltaicos, ocorre, conseqüentemente, um crescimento das injeções de potência ativa na rede de distribuição. Dessa forma, o estudo das harmônicas e das ressonâncias torna-se fundamental para garantir a qualidade do sistema elétrico. Diante disso, o Capítulo 3 apresentou e descreveu a modelagem necessária para a realização de estudos sobre harmônicos e ressonâncias nos elementos da rede elétrica. No próximo capítulo, serão abordados os estudos de caso da rede, analisando as vantagens e desvantagens desses fenômenos.

CAPÍTULO 4 : ESTUDO DE CASO

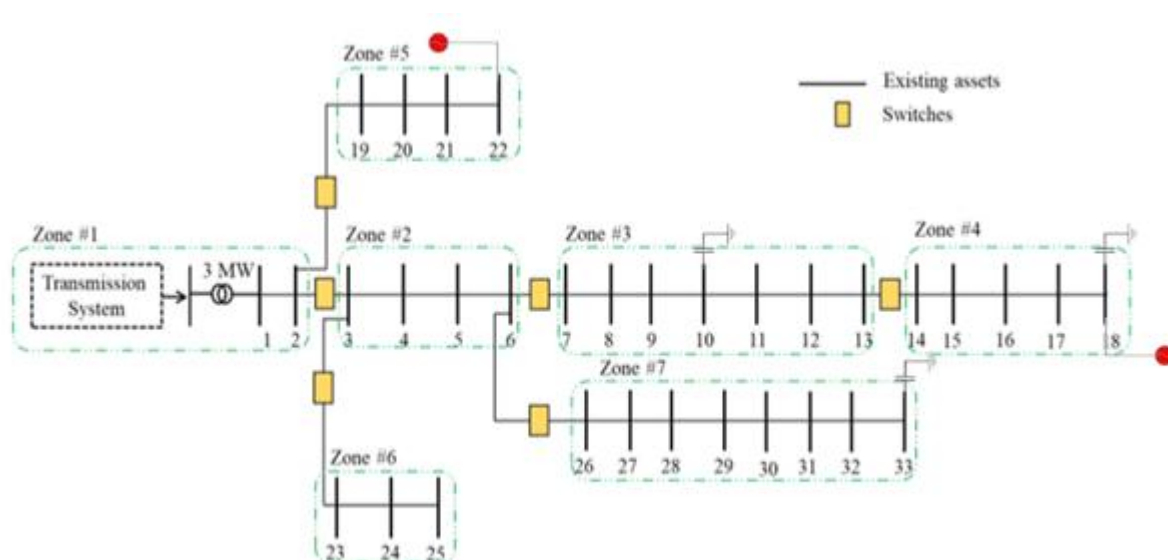
4.1 Introdução

Este capítulo descreve o estudo de caso realizado durante o desenvolvimento dessa monografia, que consiste em avaliar qual é o impacto que a ressonância exerce sobre os harmônicos gerados pelos inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos. Logo, ele é estruturado da seguinte forma: seção 4.2 aborda sobre o sistema elétricos de 33 barras do IEEE que utilizado durante as simulações; na seção 4.3, é apresentada a metodologia empregada durante o desenvolvimento do estudo;

4.2 Descrição do sistema Elétricos de 34 barras do IEEE

O estudo é realizado utilizando o software OpenDSS, por meio da simulação do fluxo de potência elétrica do sistema. A base de dados utilizada é o arquivo de estudo *IEEE 33bus*, que representa uma rede composta por 33 barras, transformadores, bancos de capacitores e diversas cargas. As tensões base do sistema são de 69 kV e 13,8 kV.

figura 15- sistema elétrico



fonte: EPRI, 2020

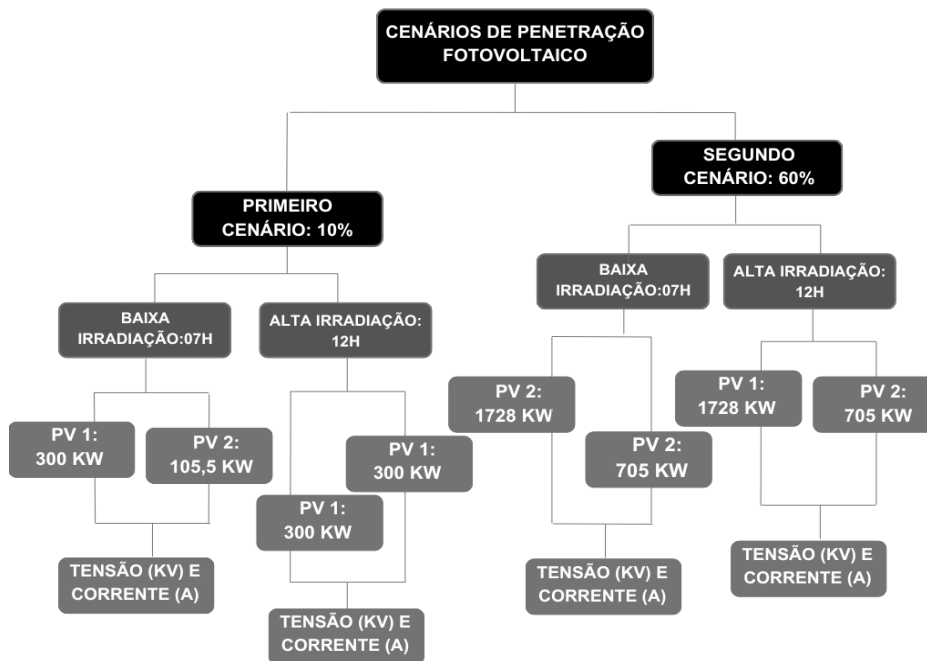
Com base nessa rede, o sistema de 33 barras foi reorganizado em sete (07) zonas ativas, incluindo uma subestação de 13,8 kV equipada com um transformador de 3 MW. Nessa configuração, serão distribuídas cargas, dois (02) sistemas fotovoltaicos e três (03) bancos de capacitores. Além disso, serão utilizados monitores de tensão e corrente para coleta de dados e apresentação dos resultados, bem como espectros harmônicos para a análise dos efeitos de ressonância.

Com esta modelagem, será estudado como a ressonância interfere na rede e nos componentes. Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos dois casos: o primeiro com uma penetração de 10%, considerando condições de baixa e alta irradiação, e o segundo com uma penetração de 60%, também sob baixa e alta irradiação.

4.3. Metodologia Empregado no Estudo

O estudo considera dois cenários de penetração fotovoltaica: 10% e 60%. Em ambos os casos, são analisadas duas condições de irradiação: baixa, às 07h da manhã, e alta, ao meio-dia (12h). A penetração dos sistemas fotovoltaicos (PVs) é calculada com base na potência de saída do alimentador, estimada em aproximadamente 4,05 MW. Dessa forma, no cenário de 10% de penetração, a injeção fotovoltaica corresponde a 405,5 kW, e no cenário de 60%, totaliza 2.433 kW. Esses valores são distribuídos proporcionalmente entre dois sistemas fotovoltaicos. A seguir, um fluxograma para facilitar o entendimento da metodologia:

Figura 16: Fluxograma



4.4. Primeiro Caso: 10% de penetração no sistema elétrico

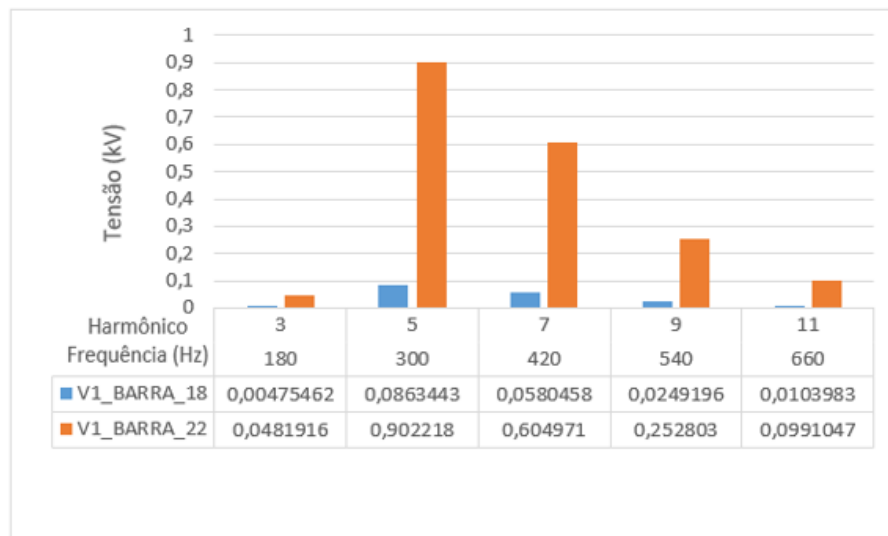
4.4.1. Primeiro cenário: Baixa Irradiação

Para o estudo, foram selecionadas as barras onde estão instalados os sistemas fotovoltaicos, devido à presença de ressonâncias. No cenário de 10% de penetração de baixa irradiação no horário das 07h da manhã, a geração distribuída foi dividida entre duas unidades: 300 kW conectados à barra 18 e 105,5 kW à barra 22.

A análise mostrou que, ao final da rede, ocorre uma elevação significativa na tensão harmônica aproximadamente 10 vezes maior na barra 22, indicando um pico de impedância

característico de uma ressonância em série. O gráfico em colunas (Figura 17) apresenta a variação das tensões harmônicas nas barras 18 e 22.

Figura 17: Gráfico das tensões na barra 18 e 22



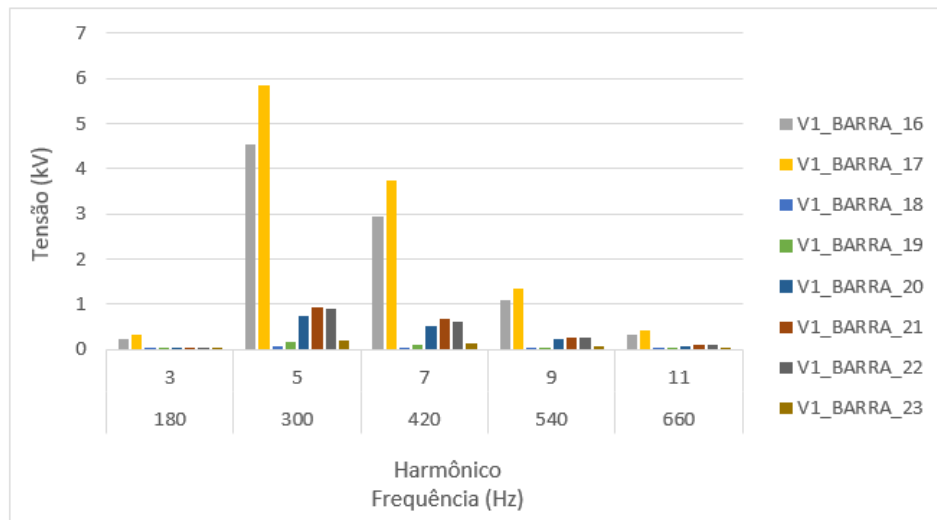
Esse comportamento sugere que a barra 22 está sujeita a um ambiente propenso à distorção harmônica, o que compromete a estabilidade e a qualidade da energia na rede. Além disso, a distorção harmônica total (THD) na barra 22 informa que ultrapassa 100% de distorção total, podendo comprometer equipamentos.

$$THD_V = \sqrt{\sum_{h=2}^n \left(\frac{V_h}{V_1}\right)^2} \times 100\%$$

Enquanto na barra 18 tem um THD de 10,76% aceitável para rede. E, por ter um sistema fotovoltaico de maior potência, promove maior amortecimento das oscilações, reduzindo os impactos negativos sobre o sistema elétrico.

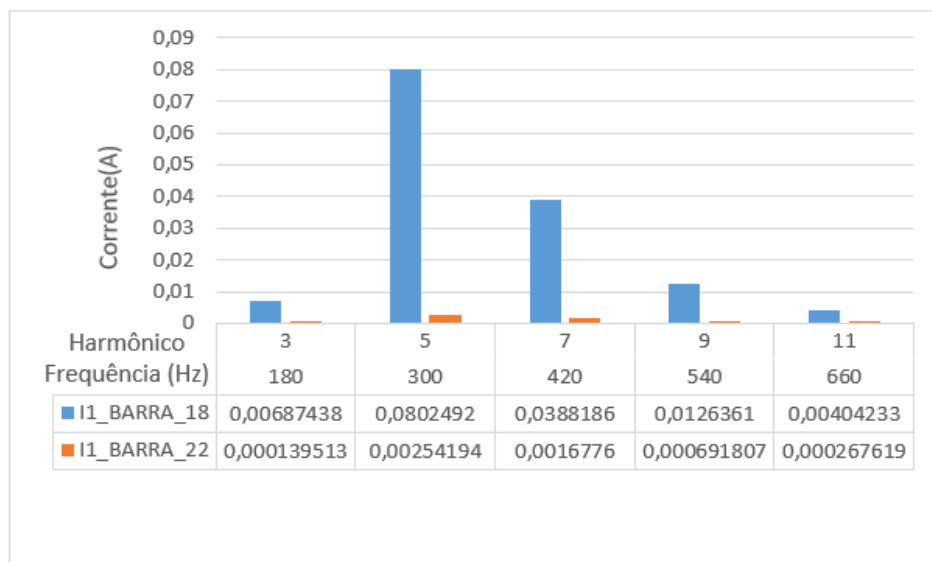
Além disso, observando as barras próximas ao ponto de ressonância, percebe-se que as harmônicas 5ª e 7ª nas barras 16 e 17, que ficam antes dos sistemas fotovoltaicos, apresentam amplificação devido ao fenômeno. As barras entre os sistemas fotovoltaicos sofrem uma atenuação relativa das tensões e correntes harmônicas, configurando uma região crítica do perfil harmônico. As barras após os sistemas tendem a apresentar valores de tensão harmônica mais próximos da normalidade conforme mostra a figura:

Figura 18: Grafico das tensões



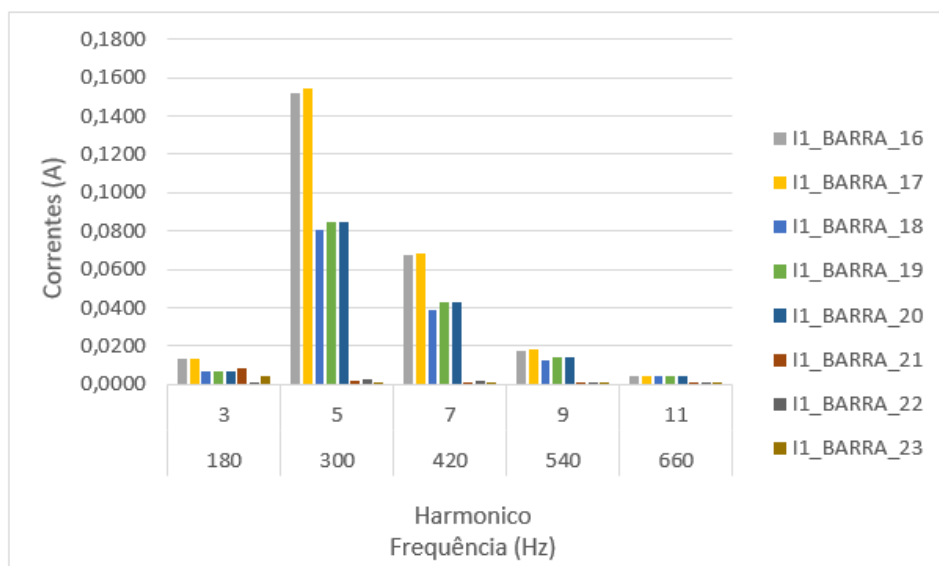
Em relação às correntes nas barras, observa-se uma queda abrupta nos valores de corrente nas regiões de maior tensão, a fim de manter a proporcionalidade do sistema, comportamento típico de uma ressonância paralela.

Figura 19: Grafico das correntes nas barras 18 e 22



As correntes harmônicas antes dos sistemas fotovoltaicos, ocorre amplificação significativa, principalmente na 5ª ordem, devido ao efeito de ressonância. Nas barras que contêm os sistemas fotovoltaicos 18 e 22, observa-se forte atenuação das correntes harmônicas como mostrado antes, configurando uma região crítica de interação entre os inversores e a rede. Nas barras intermediárias 19 a 21, as correntes permanecem reduzidas, refletindo a absorção local dos harmônicos. A depois do sistema, os níveis mantem baixo por também estar no final do circuito.

Figura 20: Grafico das correntes

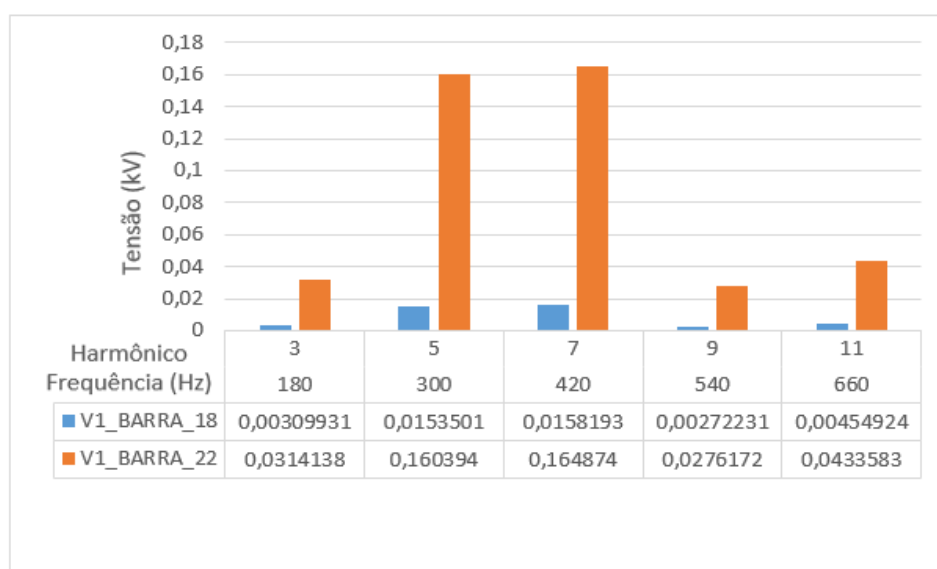


4.4.2. Primeiro cenário: Alta Irradiação

No cenário de 10% de penetração com alta irradiação no horário de 12h, a geração distribuída também foi dividida entre duas unidades: 300 kW conectados à barra 18 e 105,5 kW à barra 22.

A análise mostrou que, ao final da rede, tensão nas harmônicas 5, 7 e 11 está significativamente maior na barra 22, o que sugere proximidade de um ponto de ressonância nessa barra, indicando um pico de impedância característico de uma ressonância em paralelo. E, também, com uma penetração de 10% na alta irradiação tem um aumento de tensão nas barras. O gráfico em colunas (Figura 21) apresenta a variação das tensões harmônicas nas barras 18 e 22.

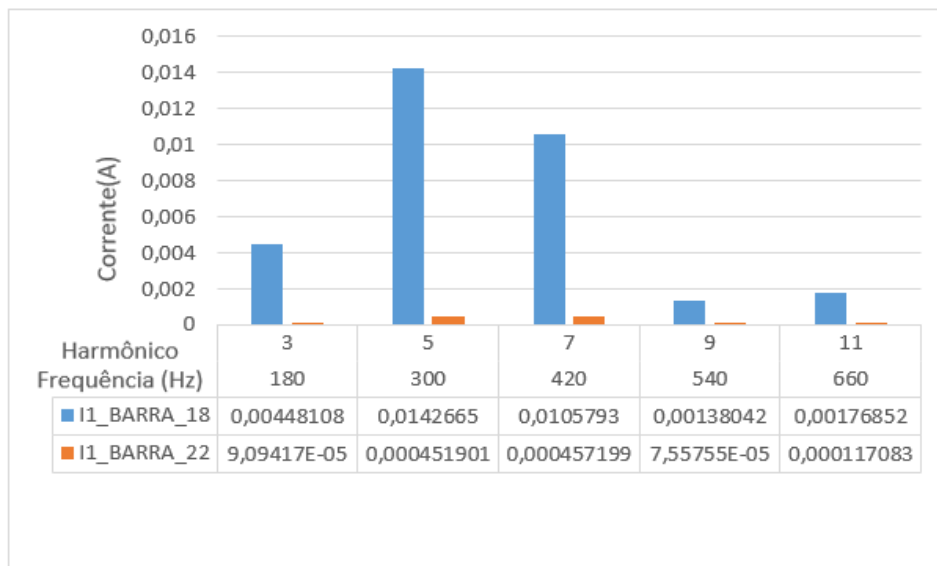
Figura 21: Grafico de tensão nas barras 18 e 22



Com esse comportamento na barra 22 a distorção harmônica total de tensão (THD) fica em torno de 3,45%, apesar de aparentar baixa, pode causar mais ressonância e danos a componentes mais sensíveis por está no período de maior irradiação.

Na barra 18, apesar de ter uma distorção harmônica de tensão de 0,032%, ele apresenta valores de corrente harmônicos estão mais elevados do que na barra 22, tendo ressonância em série na região. O gráfico em colunas (Figura 19) apresenta a variação das correntes harmônicas nas barras.

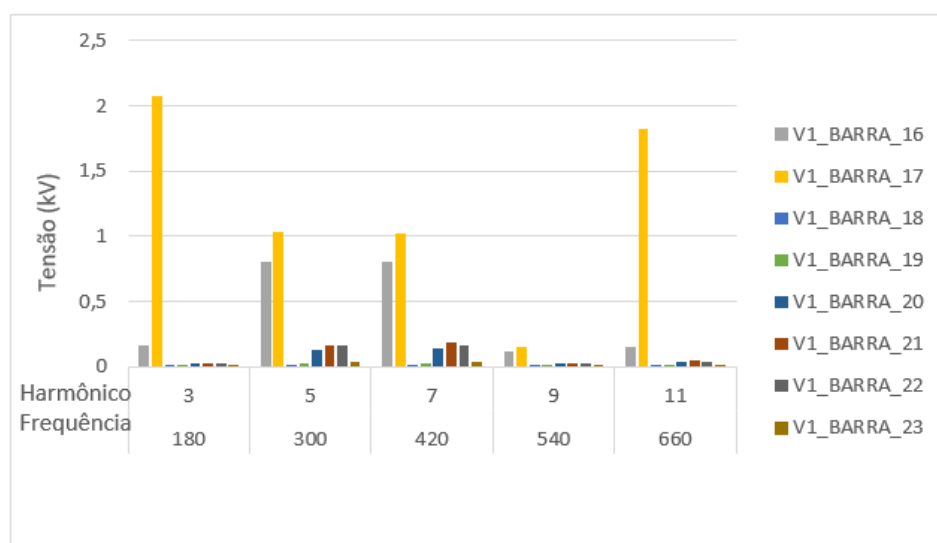
Figura 22: Grafico das correntes nas barras 18 e 22



Isso mostra que mesmo pequenas penetrações podem causar efeitos locais importantes se as condições da rede forem favoráveis à ressonância.

Comparando as barras próximas ao ponto de ressonância, percebe-se que as harmônicas, principalmente, na barra 17 que fica antes dos sistemas fotovoltaicos, apresentam amplificação devido ao fenômeno. As barras entre os sistemas fotovoltaicos sofrem uma atenuação relativa das tensões e correntes harmônicas, configurando uma região crítica do perfil harmônico. As barras após os sistemas tendem a apresentar valores de tensão harmônica mais próximos da normalidade conforme mostra a figura:

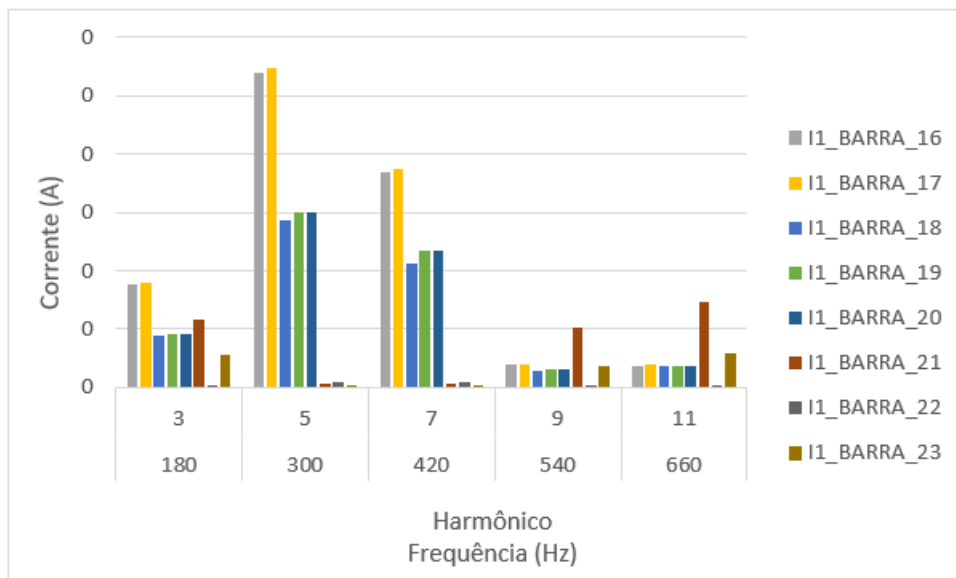
Figura 23: Grafico das tensões



Antes da inserção dos sistemas fotovoltaicos, observa-se amplificação significativa das correntes harmônicas, principalmente na 5ª ordem, em função do efeito de ressonância. Já nas

barras que contêm os sistemas fotovoltaicos 18 e 22, verifica-se forte atenuação dessas correntes rede, praticamente desaparecendo, caracterizando uma região crítica de interação entre os inversores e a rede. Esse comportamento se mantém após o sistema fotovoltaico do circuito de 105,5 kW, conforme ilustrado na Figura 24:

Figura 24: Gráfico das correntes



4.4.3. Análise comparativa da baixa e alta irradiação no cenário de 10% de penetração

Com base nos cenários, fica evidente que a presença de sistemas fotovoltaicos pode provocar efeitos significativos como ressonâncias harmônicas, especialmente no final da rede.

Mesmo em baixos níveis de penetração, observou-se um aumento expressivo na tensão harmônica e na distorção total (THD), evidenciando uma condição de instabilidade elétrica. Essa instabilidade pode ser visualizada nos gráficos de tensão apresentados nas Figuras 25 e 26:

Figura 25: Gráfico das tensões com 10% penetração na baixa irradiação

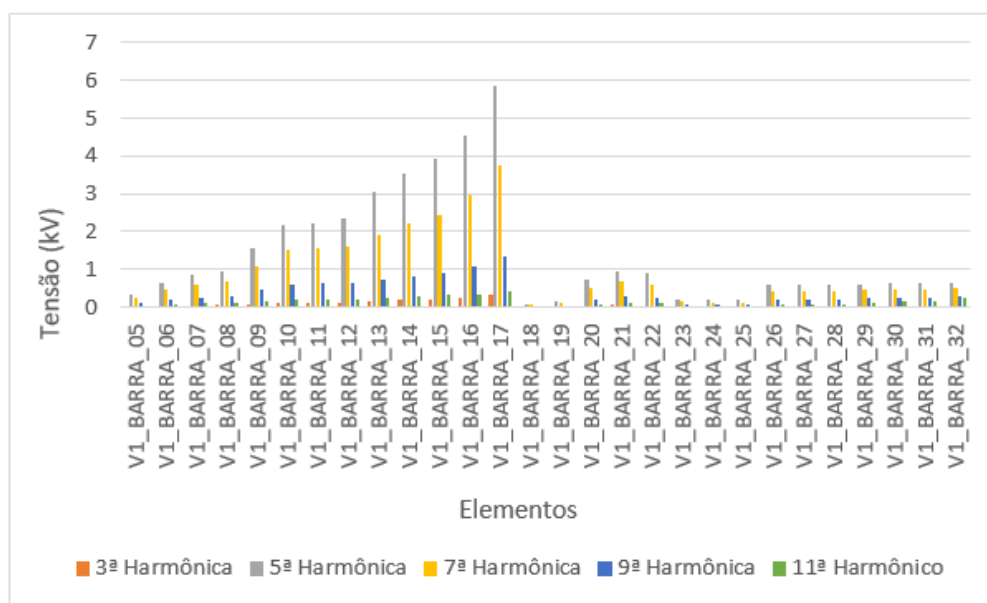
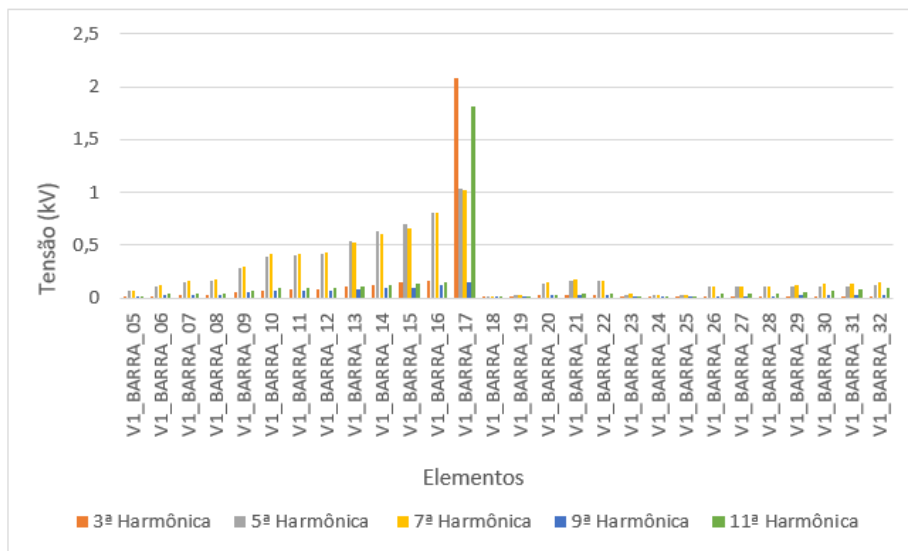


Figura 26: Gráfico das tensões com 10% penetração na alta irradiação



Em condições de baixa irradiação, as correntes apresentam uma queda brusca, independentemente do nível de penetração dos sistemas fotovoltaicos, conforme ilustrado nas Figuras 27 e 28:

Figura 27: Gráfico das correntes com 10% penetração na baixa irradiação

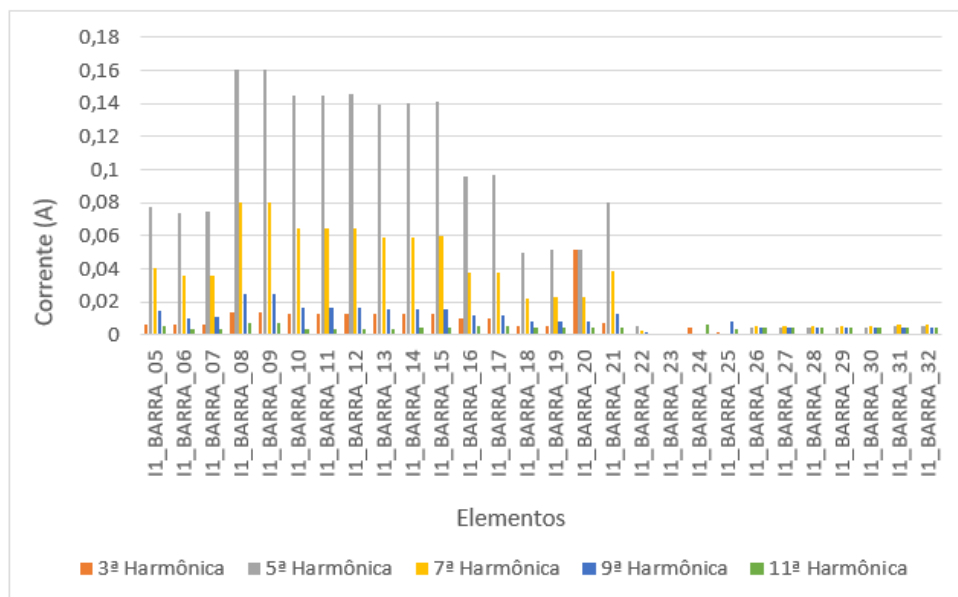
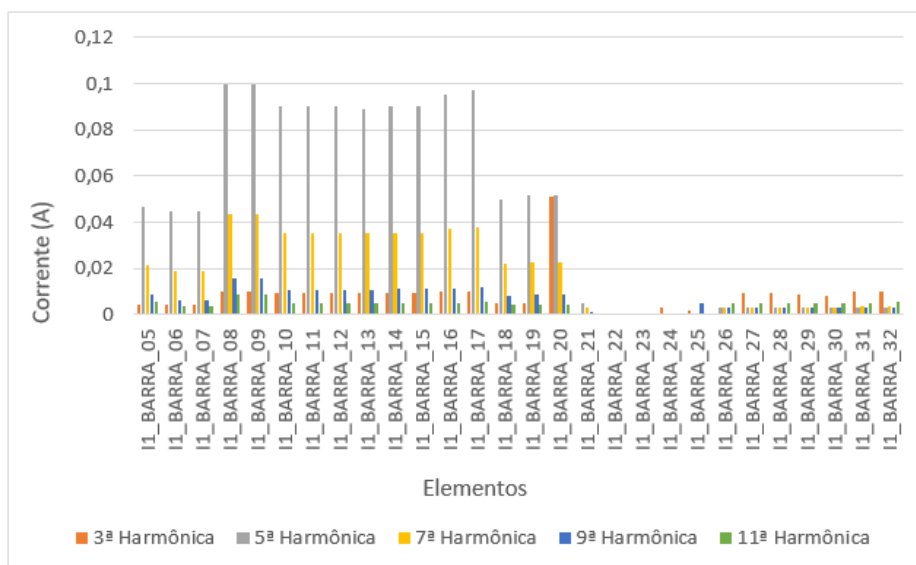


Figura 28: Gráfico das correntes com 60% penetração na baixa irradiação



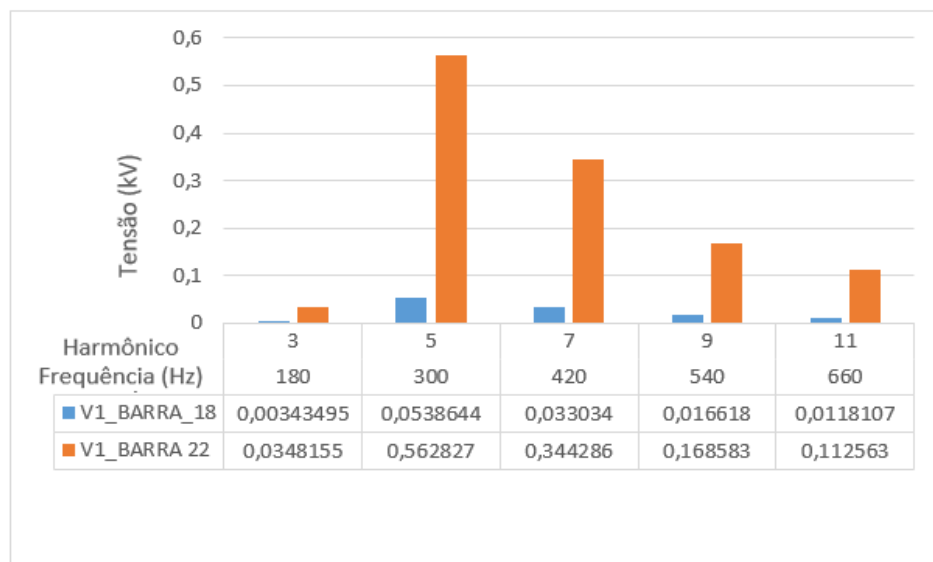
4.5. Segundo Caso: 60% de penetração no sistema elétrico

4.5.1. Primeiro cenário: Baixa Irradiação

Para o segundo estudo, foram selecionadas as barras onde estão instalados os sistemas fotovoltaicos, devido à presença de ressonâncias. No cenário de 60% de penetração na baixa irradiação no horário das 07h da manhã, a geração distribuída foi dividida entre duas unidades: 1728 kW conectados à barra 18 e 705 kW à barra 22.

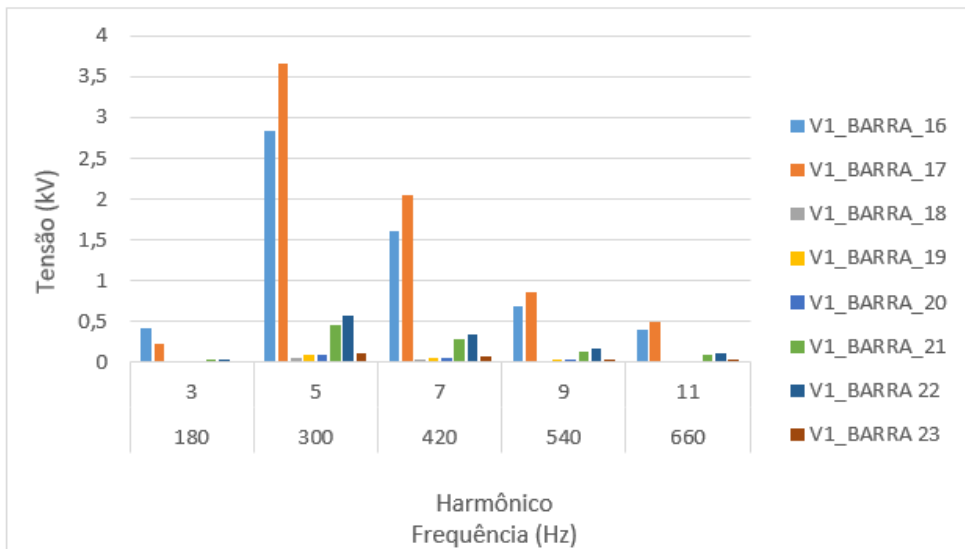
A análise mostrou que, ao final da rede, ocorre novamente uma aumento na tensão harmônica de aproximadamente 10 vezes maior na barra 22 em relação à barra 18, indicando um pico de impedância característico de uma ressonância harmônica. O gráfico em colunas (Figura 29) apresenta a variação das tensões harmônicas nas barras 18 e 22 na baixa irradiação.

Figura 29: Gráfico das tensões nas barras 18 e 22



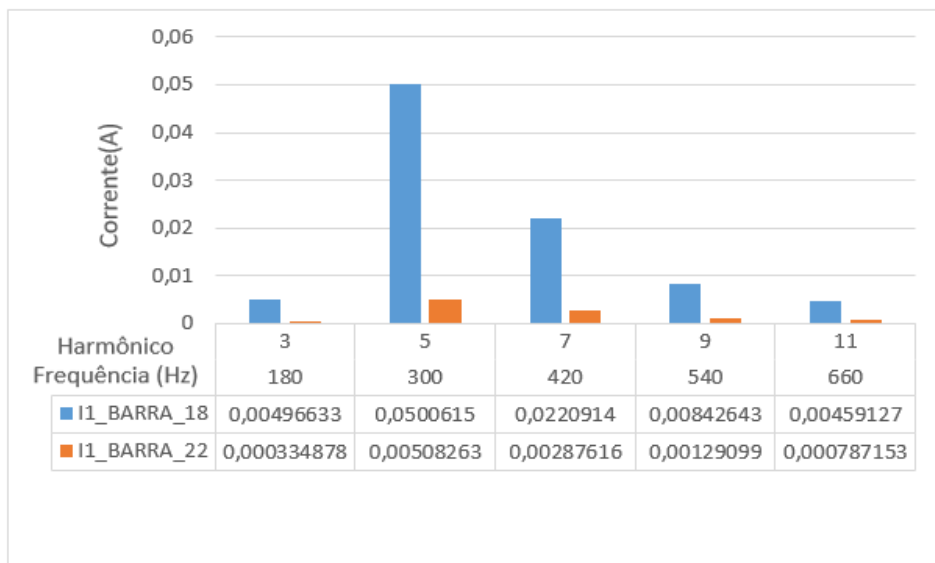
Em relação as barras próximas ao ponto de ressonância, percebe-se que as tensões harmônicas das barras 16 e 17 apresentam forte amplificação. As barras entre os sistemas fotovoltaicos sofrem uma atenuação relativa das tensões e correntes harmônicas, sendo uma região crítica do perfil harmônico. Na barra 30, os níveis se estabilizam em patamar moderado, indicando redistribuição do espectro após a zona ressonante, conforme mostra a figura:

Figura 30: Gráfico das tensões



Apesar da amplificação nos harmônicos de 5^a, 7^a e 9^a na barra 22 mostrado na figura 30, a distorção na tensão é aproximadamente 0,012%, e na corrente uma distorção de 0,021%. Na barra 18, apresenta THD de corrente 0,108% devido a presença do maior sistema fotovoltaico da rede. Além disso, as correntes harmônicas estão mais elevadas do que na barra 22 como mostra o gráfico de coluna:

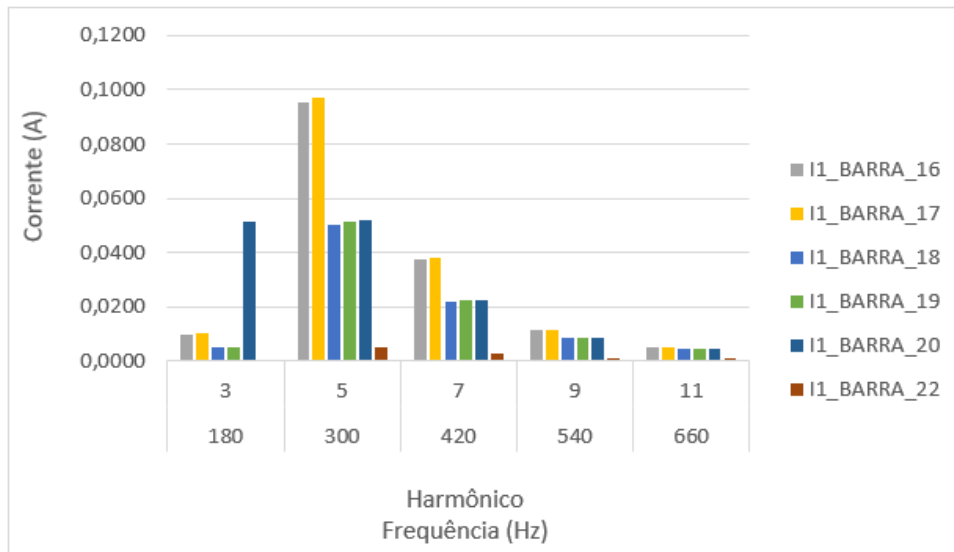
Figura 31: Gráfico das correntes na barra 18 e 22



Isso mostra que a ressonância consegue amplificar as tensões harmônicas mesmo com baixa corrente, comprometendo a qualidade da rede.

Observando as barras próximas da região de ressonância, as correntes sofrem uma amplificação antes do maior sistema fotovoltaico do circuito, enquanto nas barras 19 e 20 as correntes permanecem em nível intermediário, e na barra de saída 23, as correntes sofrem queda acentuada, praticamente desaparecendo. Isso evidencia que, diferentemente das tensões, a ressonância impacta as correntes de forma localizada e não se propaga com a mesma intensidade ao longo do sistema.

Figura 32: Gráfico das correntes

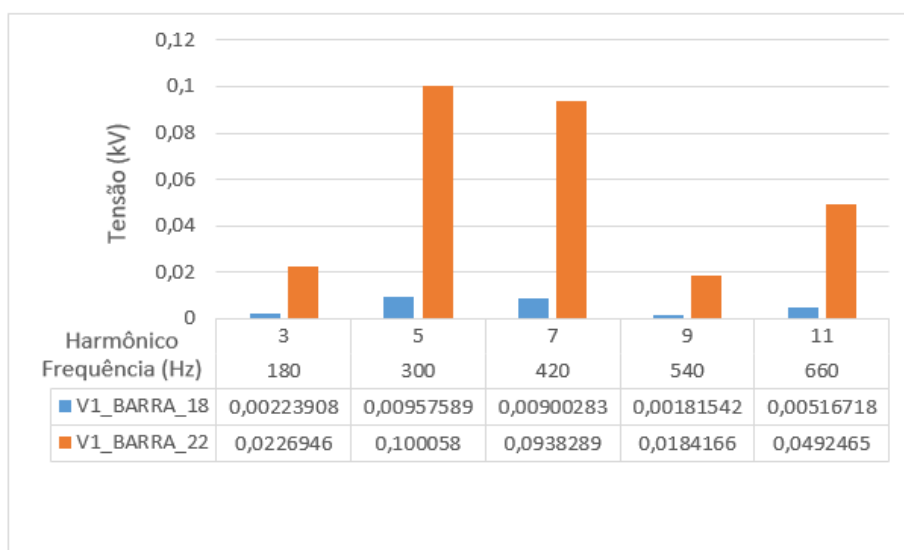


4.5.2. Segundo cenário: Alta Irradiação

No cenário de 60% de penetração com alta irradiação no horário de 12h, a geração distribuída também foi dividida entre duas unidades: 1728 kW conectados à barra 18 e 705 kW à barra 22.

A análise mostrou que, ao final da rede, tensão nas harmônicas 5, 7 e 11 está significativamente maior na barra 22, o que sugere proximidade de um ponto de ressonância nessa barra. E, também, com uma penetração de 60% na alta irradiação tem um aumento de tensão nas barras. O gráfico em colunas (Figura 29) apresenta a variação das tensões harmônicas nas barras 18 e 22 na alta irradiação.

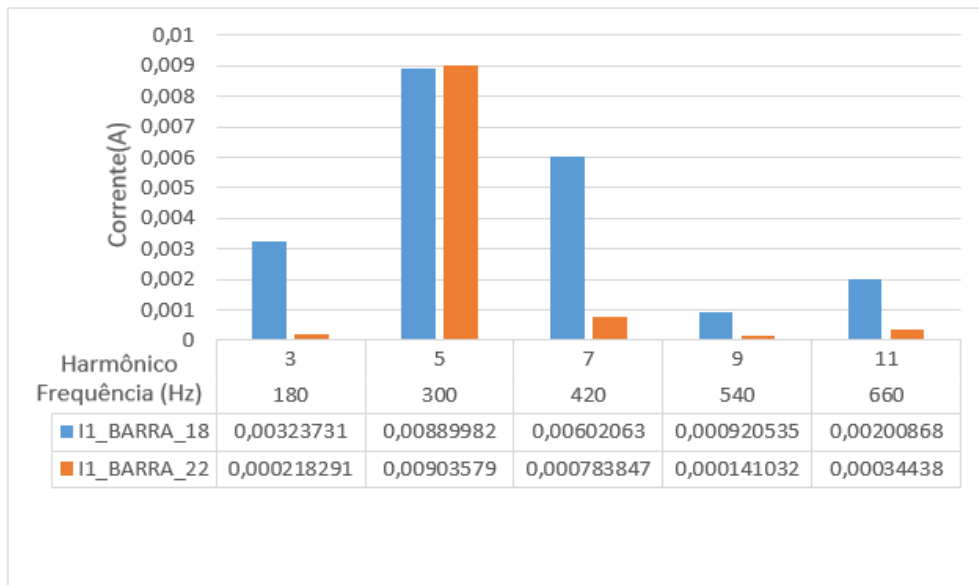
Figura 33: Gráfico das tensões na barra 18 e 22



Os valores extremamente baixos de corrente observados na barra 22 indicam a ocorrência de uma ressonância paralela, especialmente nos harmônicos de ordem 5 e 7, onde as tensões são mais elevadas. Na barra 18, destaca uma corrente significativamente elevada no 5º

harmônico em relação às demais, caracterizando uma ressonância em série. A Figura 23, em formato de gráfico de colunas, apresenta a variação das correntes harmônicas nas barras 18 e 22 na alta irradiação.

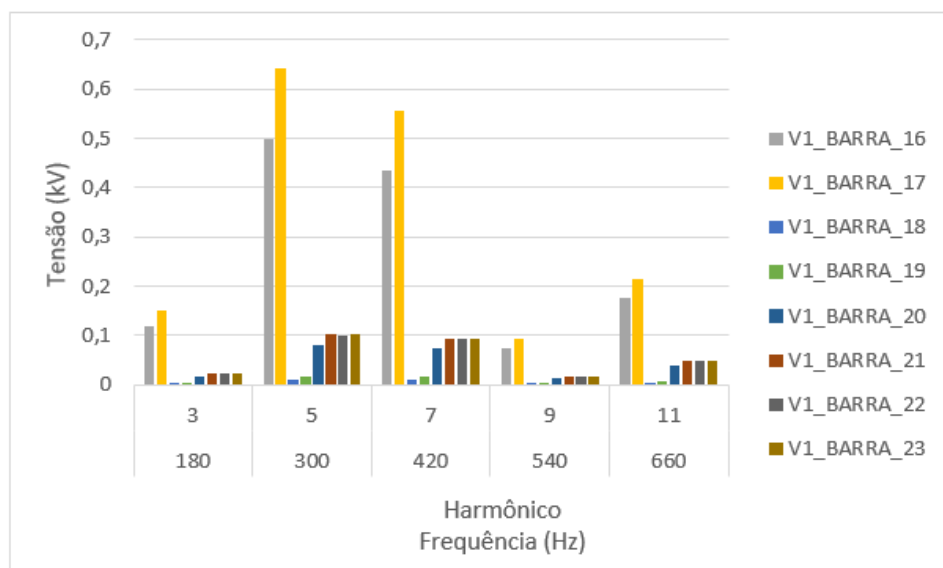
Figura 34: Gráfico das correntes na barra 18 e 22



Apesar da presença de pontos de ressonância nas barras, os valores de Distorção Harmônica Total (THD) de tensão e corrente permanecem extremamente baixos. No entanto, esse cenário favorece comportamentos atípicos na região, como leituras incorretas de medição e possíveis falhas em equipamentos sensíveis.

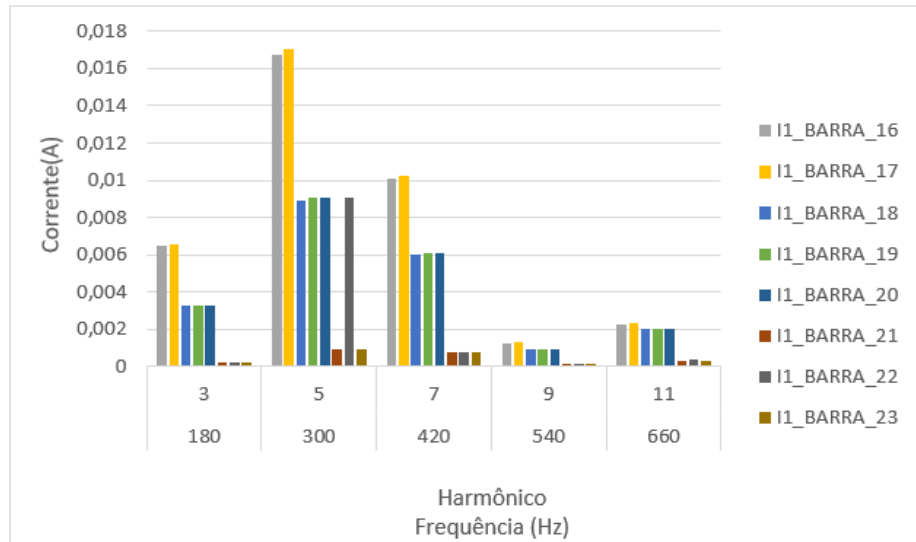
Sobre a análise das barras próximas ao ponto de ressonância, percebe-se que as tensões harmônicas de 5ª e 7ª ordem apresentam forte amplificação. As barras entre os sistemas fotovoltaicos sofrem uma atenuação relativa das tensões e correntes harmônicas, sendo uma região crítica do perfil harmônico. E após a região, os níveis de tensão permanecem baixos, como mostrado na figura 30:

Figura 35: Gráfico das tensões



Observando as correntes sofrem, uma amplificação antes do maior sistema fotovoltaico do circuito, enquanto nas barras 19 e 20 as correntes permanecem em nível intermediário, e na barra de saída 23, as correntes sofrem queda acentuada, praticamente desaparecendo.

Figura 36: Gráfico das correntes



Por fim, no cenário de 60% de penetração fotovoltaica sob alta irradiância, a rede opera em um ponto de maior energia, o que intensifica os efeitos ressonantes e eleva a sensibilidade do sistema a pequenas distorções harmônicas.

4.5.3. Análise comparativa da baixa e alta irradiação no cenário de 60% de penetração

Os efeitos das ressonâncias nas tensões e correntes harmônicas são intensificados com o aumento da irradiação solar e da injeção de potência ativa no circuito inteiro, conforme observado no cenário de 60%

Figura 37: Gráfico das tensões com 60% penetração na baixa irradiação

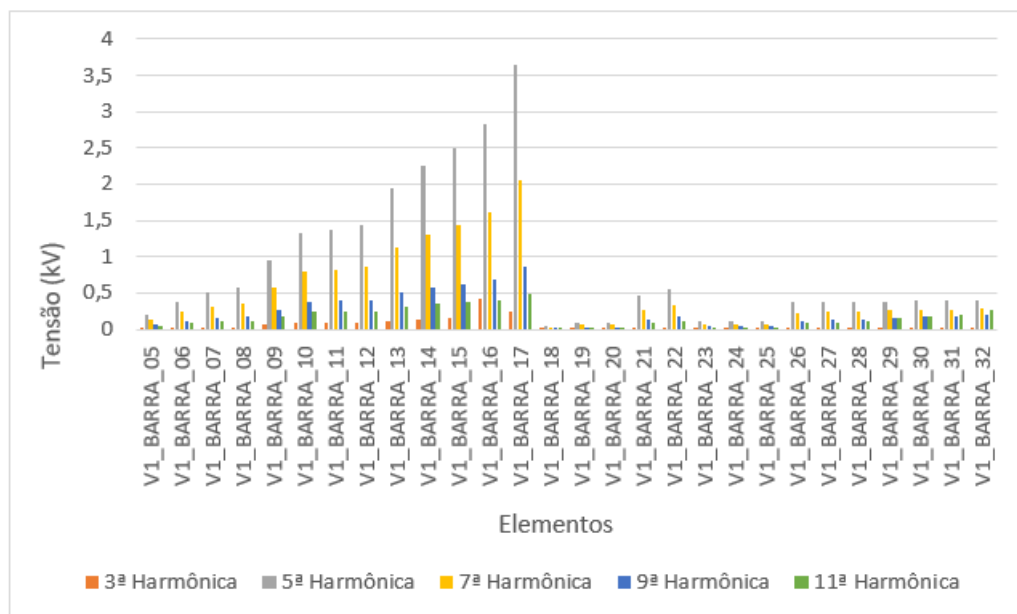
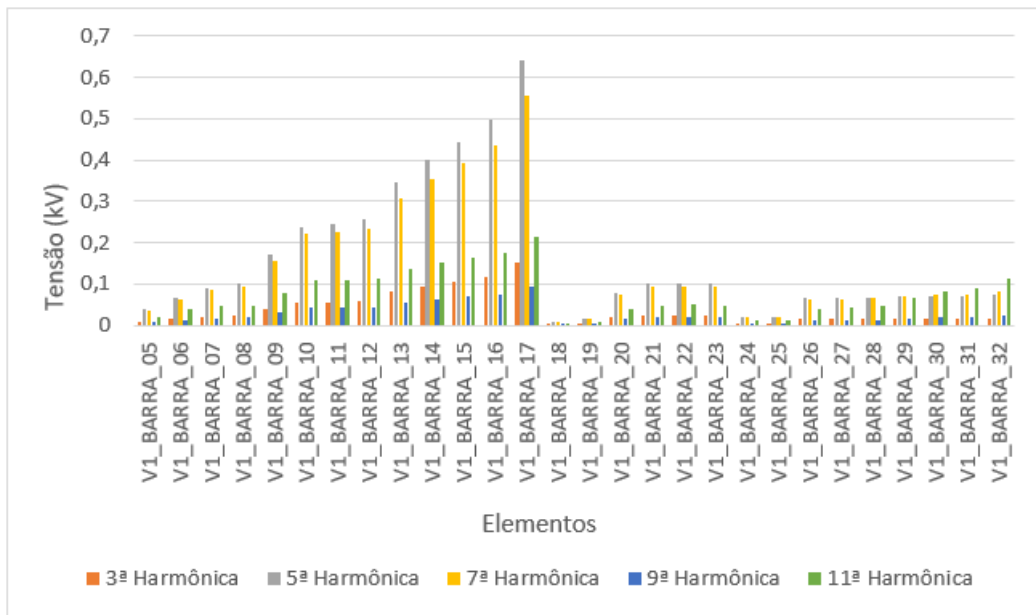


Figura 38: Gráfico das tensões com 60% penetração na alta irradiação



Em condições de alta penetração, observa-se uma amplificação da corrente antes da região dos sistemas fotovoltaicos, seguida de uma atenuação na própria região dos fotovoltaicos. Após essa área, as correntes tendem a retornar à normalidade.

Figura 39: Gráfico das correntes com 10% penetração na alta irradiação

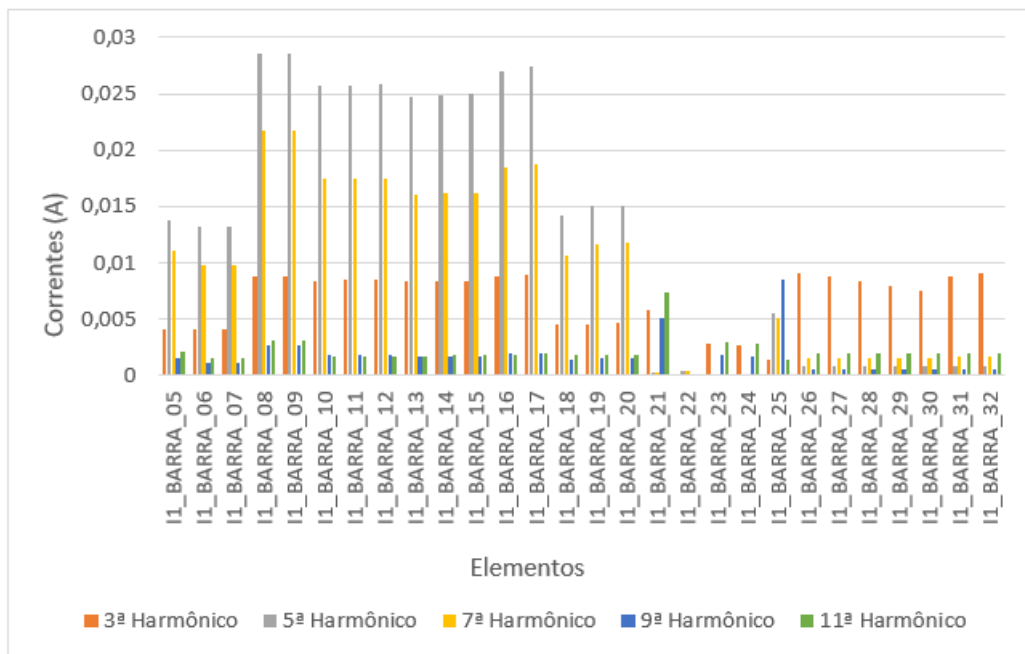
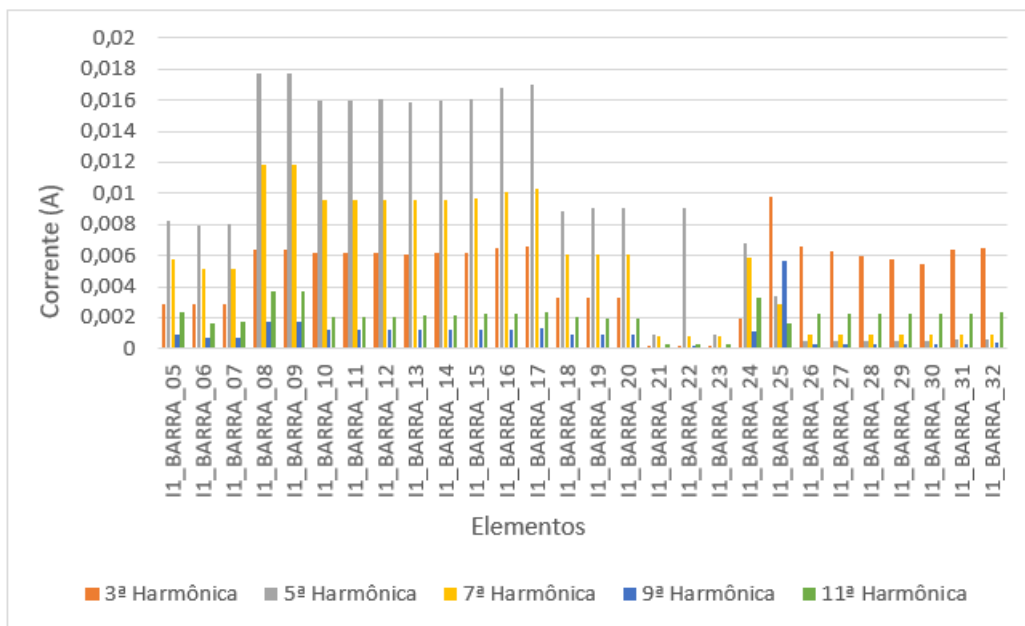


Figura 40: Gráfico das correntes com 60% penetração na alta irradiação



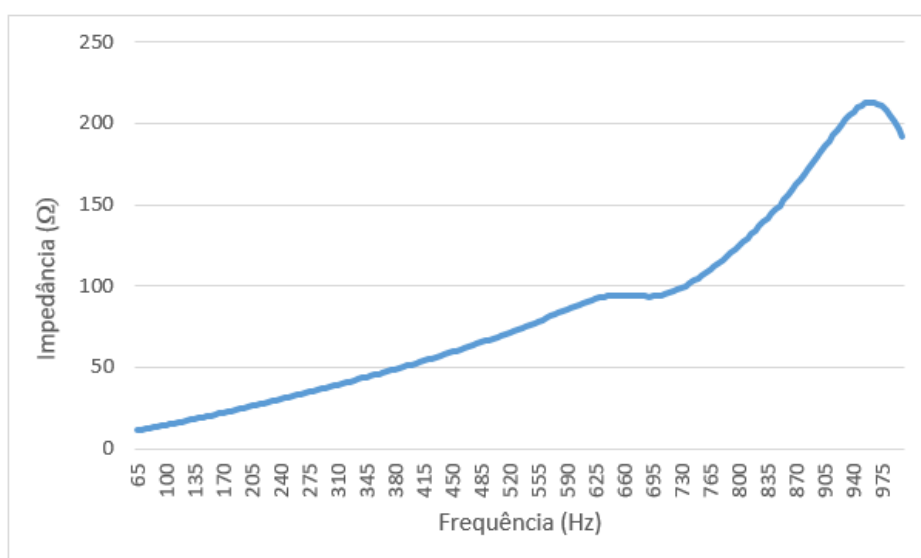
4.6. Impedância nas barras

Para realizar o estudo, foi necessário utilizar o método de varredura de frequência para identificar as ressonâncias no sistema e, assim, analisar a variação de tensão e corrente. Essa técnica é frequentemente aplicada para avaliar os impactos potenciais de novos TEA ou de outras cargas produtoras de harmônicos, sendo bastante útil para identificar ressonâncias em série e em paralelo.

As ressonâncias paralelas, associadas a altas impedâncias aos fluxos de corrente, aparecem como "picos" em gráficos. Já as ressonâncias em série, associadas a baixas impedâncias para fluxos de corrente harmônica, aparecem como "vales".

A análise realizada permitiu identificar que a impedância nos barramentos 18 e 22 apresenta comportamento semelhante, sendo esses locais prováveis para ocorrência do efeito de ressonância, com presença de um pico em altas harmônicas e atenuação na região do 5° e 7° harmônicos, como apresenta a imagem:

Figura 41: Curva de impedância



4.7. Conclusão

Neste capítulo, são apresentados dois casos: o primeiro com uma penetração de 10%, considerando condições de baixa e alta irradiação, e o segundo com uma penetração de 60%, também sob baixa e alta irradiação. Com base nos cenários, fica evidente que a presença de sistemas fotovoltaicos pode provocar efeitos significativos como ressonâncias harmônicas, especialmente no final da rede. Mesmo em baixos níveis de penetração, observou-se um aumento expressivo na tensão harmônica e na distorção total (THD), evidenciando uma condição de instabilidade elétrica.

Apesar de ter uma redução na distorção(THD), a rede apresenta ressonância com comportamento atípico de corrente e tensão. O fim da rede, é a região mais sensível e as condições registra tanto ressonância em série e paralelo, comprometendo o funcionamento de equipamentos sensíveis e a qualidade da energia fornecida. Enquanto no meio da rede, por concentrar maior geração fotovoltaica, demonstrou comportamento mais de atenuação das tensões e correntes. Além disso, o efeito de ressonância influencia as áreas próximas aos sistemas fotovoltaicos, provocando um aumento das tensões e correntes antes da região e uma redução desses valores após a mesma.

Os harmônicos presentes na rede podem se somar, intensificando essas variações, ou até mesmo se anular, dependendo da soma fasorial no alimentador. Além disso, a baixa penetração contribui para potencializar esses efeitos na tensão eficaz, como apresenta os gráficos 42 e 43:

Figura 42: Gráfico da tensão eficaz com 10% penetração na baixa irradiação

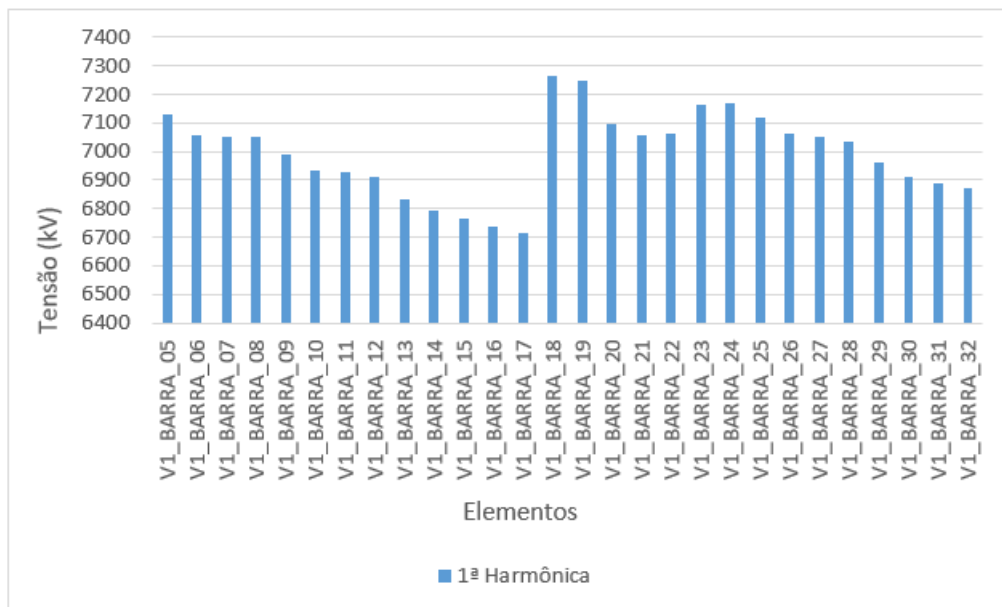
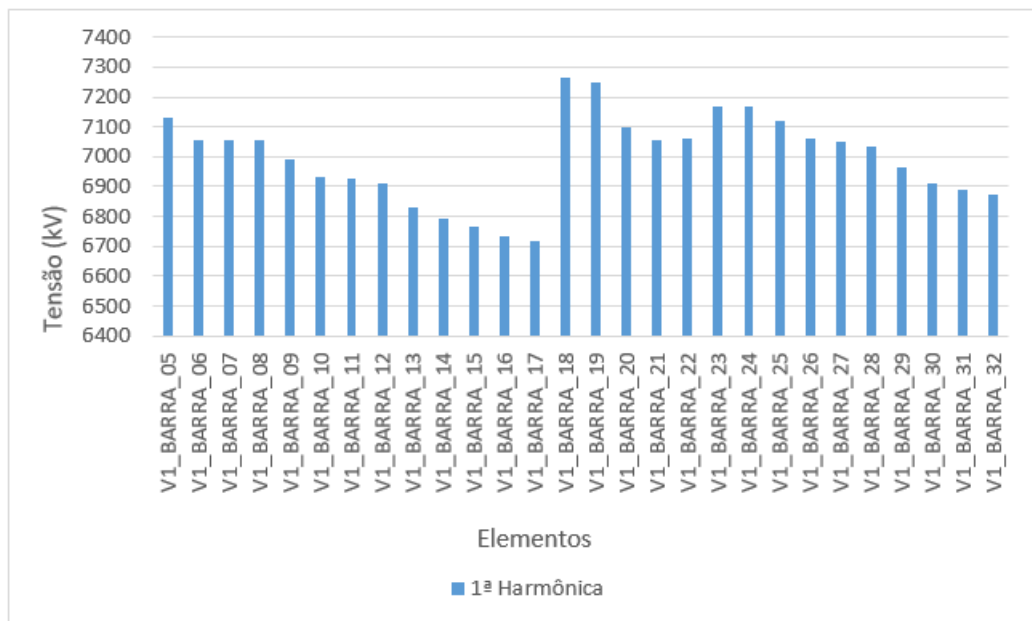


Figura 43: Gráfico da tensão eficaz com 10% penetração na alta irradiação



Além da tensão, a corrente também apresenta variações em função da baixa penetração no sistema, principalmente na região final, conforme ilustrado nas Figuras 44 e 45:

Figura 44: Gráfico da corrente eficaz com 10% penetração na baixa irradiação

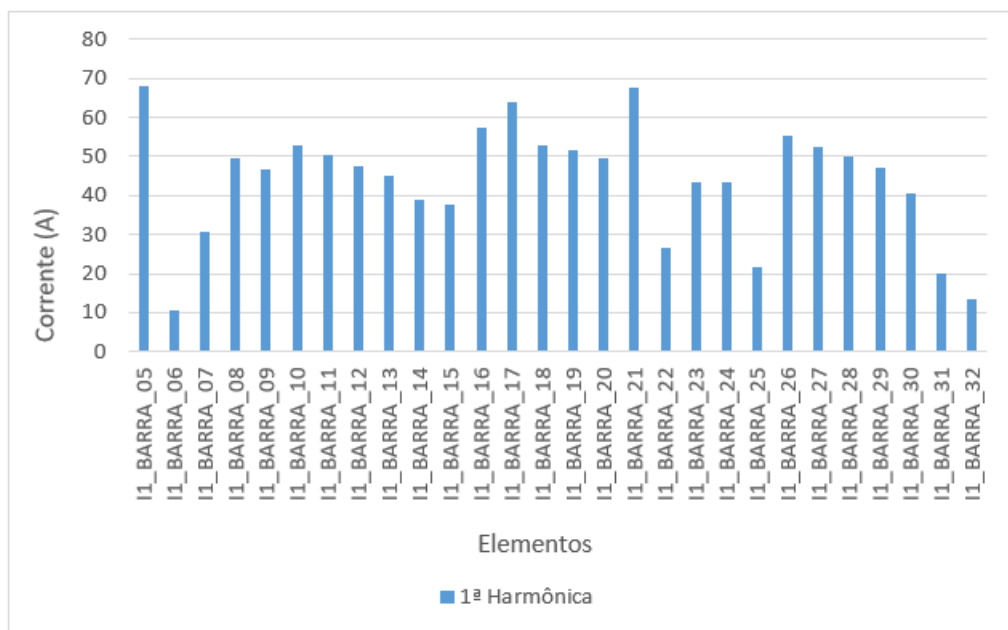
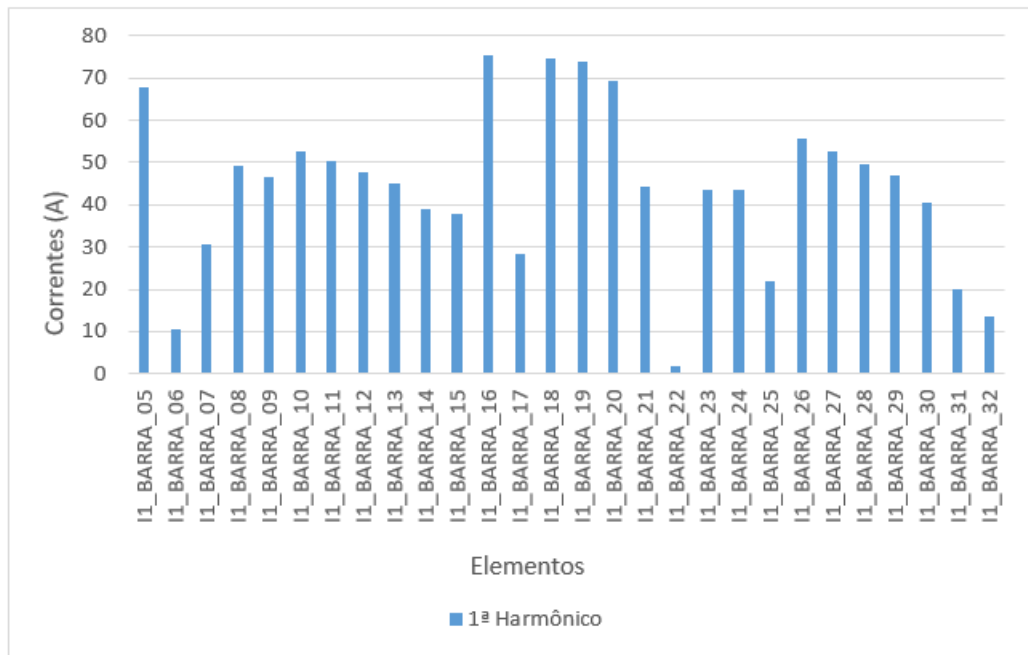


Figura 45: Gráfico da corrente eficaz com 10% penetração na alta irradiação



Em condições de alta penetração, a tensão apresenta maior estabilidade, independentemente do nível de irradiação, conforme demonstrado nas Figuras 46 e 47.

Figura 46: Gráfico da tensão eficaz com 60% penetração na baixa irradiação

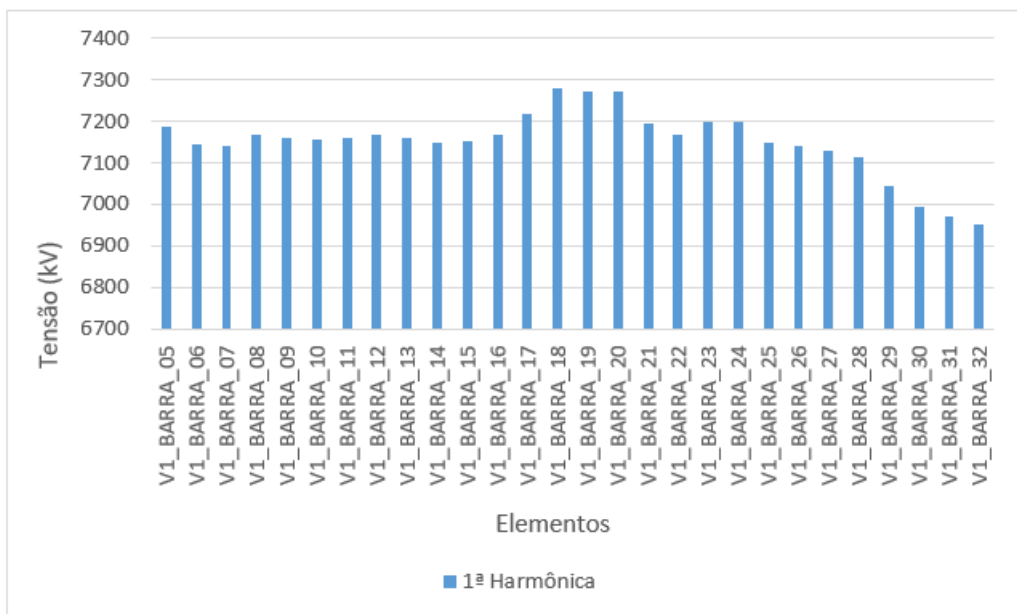
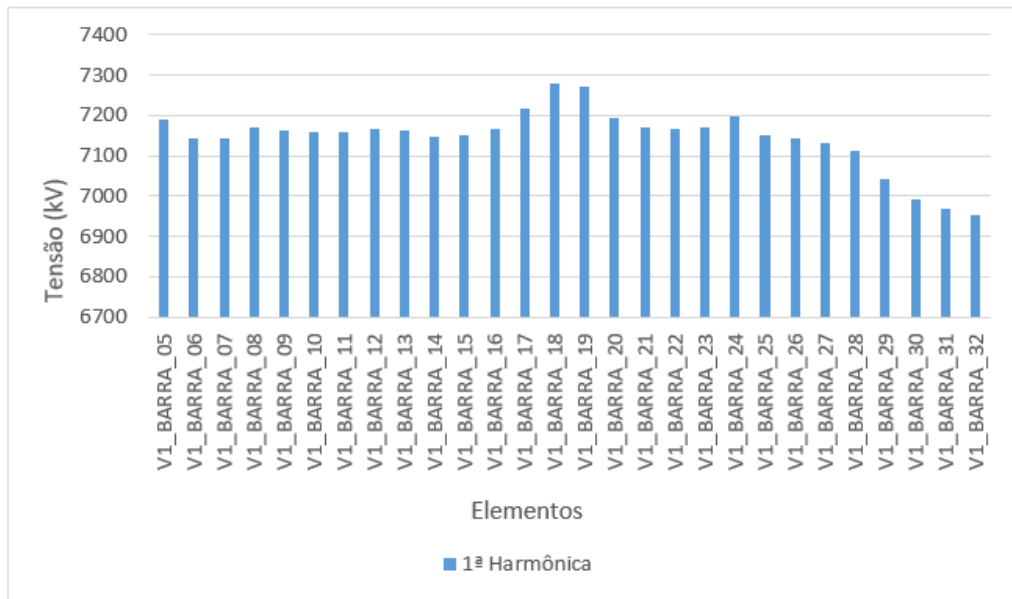


Figura 47: Gráfico da tensão eficaz com 60% penetração na alta irradiação



Sobre a corrente eficaz nas barras, ela apresenta uma amplificação em relação sobre a baixa penetração que apresentou mais instável.

Figura 48: Gráfico da corrente eficaz com 60% penetração na baixa irradiação

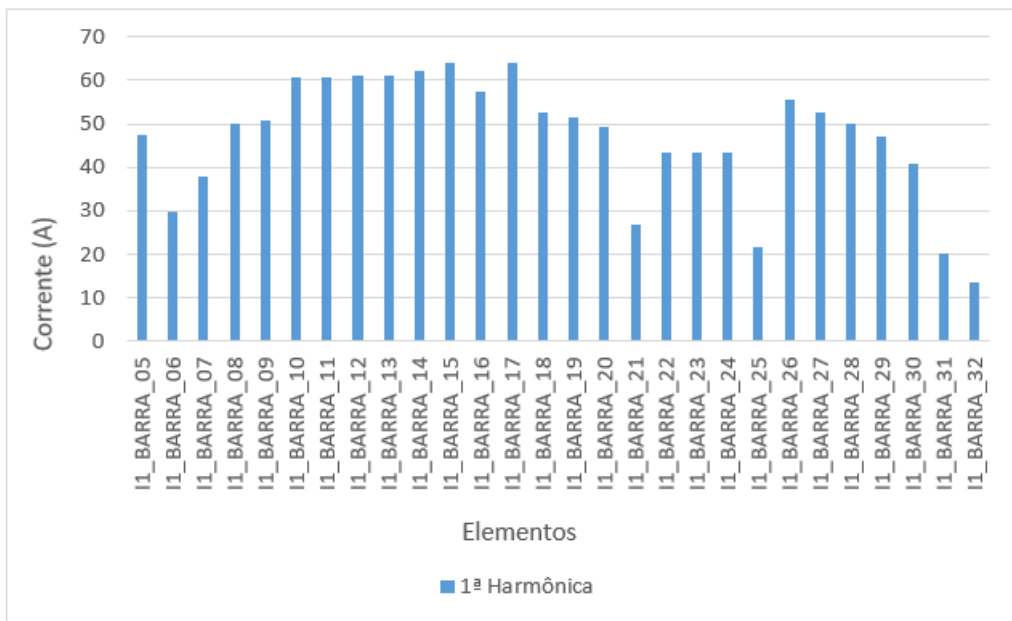
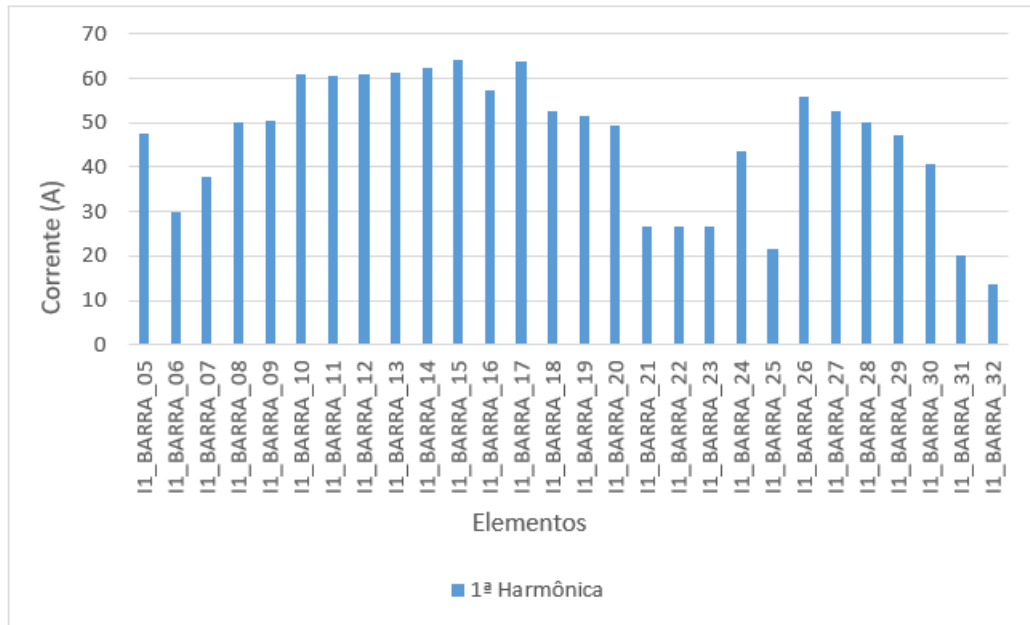


Figura 49: Gráfico da corrente eficaz com 60% penetração na alta irradiação



Conclui-se, que o posicionamento e a potência dos sistemas fotovoltaicos, aliados às características da rede, são fatores determinantes para a ocorrência de ressonâncias, sendo essencial considerar a alta penetração de sistemas fotovoltaicos.

CAPÍTULO 5 : CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema fotovoltaico é constituído por diversos dispositivos que auxiliam na conversão da energia proveniente da radiação solar em eletricidade, como os inversores. Por serem responsáveis pela geração de harmônicas que podem provocar ressonâncias, torna-se necessária a análise do comportamento desse fenômeno na rede.

Neste trabalho, foi apresentada a modelagem necessária para a realização de estudos em regime permanente e harmônico em redes de distribuição com inserção de sistemas fotovoltaicos. A partir dessa base, foram investigados os efeitos da penetração fotovoltaica em diferentes cenários, considerando-se tanto condições de baixa quanto de alta irradiação solar.

Com o aumento da penetração fotovoltaica, cresce também a injeção de potência ativa na rede, tornando indispensável o estudo das harmônicas e ressonâncias para assegurar a qualidade da energia elétrica. As simulações com 10% e 60% de penetração mostraram que, mesmo em baixos níveis, ocorre aumento expressivo da tensão harmônica e da distorção total (THD), sobretudo nas extremidades da rede, mais vulneráveis a ressonâncias em série e em paralelo, capazes de comprometer equipamentos e a estabilidade do sistema.

Embora em alguns pontos tenha sido observada redução da distorção, o comportamento geral revelou características atípicas de corrente e tensão devido às ressonâncias. A região central, por concentrar maior geração fotovoltaica, apresentou tendência de atenuação, enquanto áreas próximas aos sistemas registraram aumento antes da injeção e redução após.

Conclui-se que o posicionamento e a potência dos sistemas fotovoltaicos, aliados às características da rede, são determinantes para a ocorrência de ressonâncias, que podem gerar variações de tensão e corrente, falhas em medições e até danos a equipamentos. Dessa forma, os resultados confirmam a importância de considerar os impactos da penetração fotovoltaica no planejamento e na operação de redes de distribuição, a fim de garantir qualidade e confiabilidade no fornecimento de energia.

O objetivo proposto neste trabalho foi alcançado, uma vez que foi possível identificar os efeitos da ressonância sobre os harmônicos gerados por inversores em sistemas fotovoltaicos e compreender como esses fenômenos afetam a rede de distribuição. Assim, confirma-se a relevância da análise apresentada para os estudos relacionados à qualidade da energia elétrica, especialmente diante do crescimento contínuo da geração solar fotovoltaica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRILAGA, J.; WATSON, N. R. **Power System Harmonics**. 2. ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2004.

BRITO, M. A. G. **Inversores integrados monofásicos e trifásicos para aplicações fotovoltaicas: técnicas para obtenção de mppt, detecção e proteção de ilha, sincronização e paralelismo com a rede de distribuição de energia elétrica**. 2013. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista (UNESP).

CARNEIRO, Joaquim A. O. **Módulos fotovoltaicos: características e associações**. São Paulo, 2010.

DAS, J. C. **Power System Harmonics and Passive Filter Designs**. 1. ed. Nashville, TN, USA: John Wiley & Sons, 2015.

FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade Técnico-Econômica**. São Paulo, 2012.

FUCHS, E. F.; MASOUM, M. A. S. **Power Quality In Electrical Machines And Power Systems**. Boulder, CO: [s.n.].

HART, D. W. **Eletrônica de Potência: Análise e projetos de circuitos**. New York: [s.n.].

KJAER, S. B.; PEDERSEN, J. K.; BLAABJERG, F. **A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules**. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 41, n. 5, p. [sem página], Sept.-Oct. 2005.

MELO, F. C. **Projeto e desenvolvimento de um novo inversor solar de estágio único sem transformador adequado para aplicações de baixa potência**. 2017. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2017.

MENESES, D. et al. **Review and Comparison of Step-Up Transformerless Topologies for Photovoltaic AC-Module Application**. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 28, n. 6, p. 2649–2663, June 2013.

MESSENGER, R. A.; ABTAHI, A. **Photovoltaic Systems Engineering**. 4. ed. EUA: CRC Press, 2017.

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A. **Circuitos elétricos**. Tradução: Ronaldo Sérgio de Biasi. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

PACHECO, Á. C. P.; SANTOS, I. N. **Programação do Microcontrolador TMS320F28379D via MatLab/Simulink para Aplicações em Estudos de Qualidade da Energia Elétrica**. In: Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica - CBQEE 2021, Uberlândia, 2021.

PERES PACHECO, Á. C.; NUNES SANTOS, I. **Arranjo Laboratorial para Estudos de Qualidade da Energia Vinculados a Sistemas Fotovoltaicos**. Galoá Events Proceedings, 27 ago. 2021.

PEREIRA, F.; OLIVEIRA, M. **Curso técnico instalador de energia solar fotovoltaica**. Porto: Publindústria, 2011.

PINHO, J. T. et al. **Sistemas híbridos**. 22. ed. [S.l.]: Ministério das Minas e Energia, 2008.

PINHO, J.; GALDINO, M. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb, 2014.

RAUSCHENBACH, H. S. **Solar Cell Array Design Handbook**. 1. ed. EUA: Caltech, 1976. v. I.

TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRÍGUEZ, P. **Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons - IEEE, 2011.

VILLALVA, M.; GAZOLI, J. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Erica, 2012.

ZILLES, R. et al. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

AGÊNCIA BRASIL. Brasil alcança marca de 2 milhões de sistemas de energia solar. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2023-06/brasil-alcanca-marca-de-2-milhoes-de-sistemas-de-energia-solar>. Acesso em: 16 abr. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica, 2008. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>. Acesso em: 5 nov. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica – Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Disponível em: <https://bit.ly/3q3h2he>. Acesso em: 25 nov. 2020.

CELULA ENERGIA. Qualidade de energia: as distorções harmônicas nas instalações com inversores fotovoltaicos. Disponível em: <https://celulaenergia.com/qualidade-de-energia-as-distorcoes-harmonic-nas-instalacoes-com-inversores-fotovoltaicos/>. Acesso em: 16 abr. 2025.

EMBRASUL. Qualidade de energia – PRODIST Módulo 8. Disponível em: <https://embrasul.com.br/qualidade-de-energia-prodist-modulo8/>. Acesso em: 16 abr. 2025.

INSP-THERM. Qualidade de energia elétrica. Disponível em: <https://insp-therm.com.br/qualidade-de-energia-eletrica/>. Acesso em: 16 abr. 2025.

MEMT. O que é qualidade de energia elétrica (QEE)? Disponível em: <https://memt.com.br/o-que-e-qualidade-de-energia-eletrica-qee/#:~:text=A%20qualidade%20de%20energia%20el%C3%A9trica>. Acesso em: 16 abr. 2025.

NÚCLEO DO CONHECIMENTO. Qualidade de energia. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/qualidade-de-energia>. Acesso em: 16 abr. 2025.