

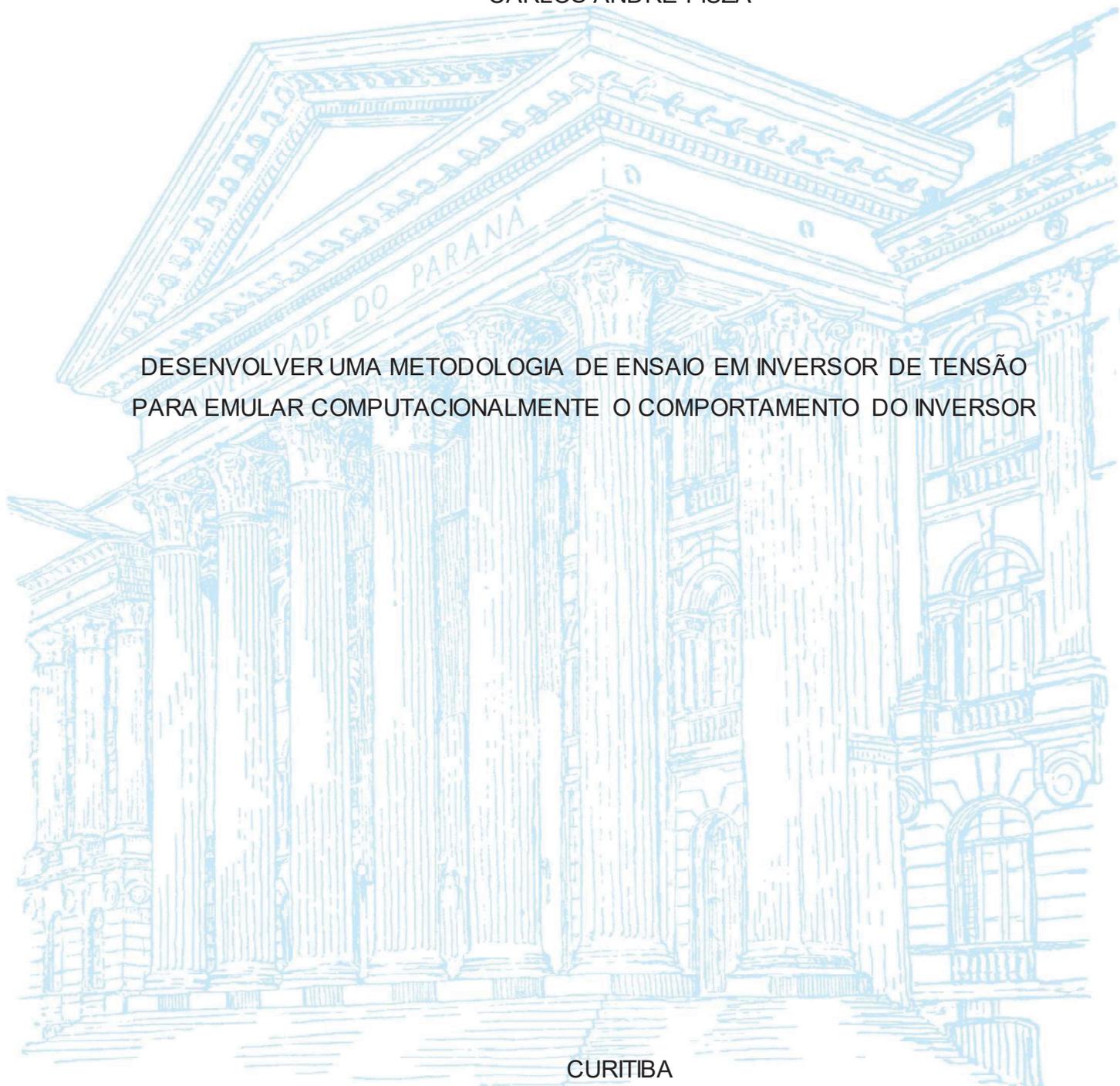
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CARLOS ANDRÉ FIUZA

DESENVOLVER UMA METODOLOGIA DE ENSAIO EM INVERSOR DE TENSÃO  
PARA EMULAR COMPUTACIONALMENTE O COMPORTAMENTO DO INVERSOR

CURITIBA

2020



CARLOS ANDRE FIUZA

DESENVOLVER UMA METODOLOGIA DE ENSAIO EM INVERSOR DE TENSÃO  
PARA EMULAR COMPUTACIONALMENTE O COMPORTAMENTO DO INVERSOR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. João Américo Vilela Júnior.

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

F565d Fiuza, Carlos André  
Desenvolver uma metodologia de ensaio em inversor de tensão para emular computacionalmente o comportamento do inversor [recurso eletrônico] / Carlos André Fiuza. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2020.

Orientador: João Américo Vilela Júnior.

1. Geração de energia fotovoltaica. 2. Inversores elétricos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Vilela Júnior, João Américo. IV. Título.

CDD: 621.31244

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **CARLOS ANDRÉ FIUZA** intitulada: **DESENVOLVER UMA METODOLOGIA DE ENSAIO EM INVERSOR DE TENSÃO PARA EMULAR COMPUTACIONALMENTE O COMPORTAMENTO DO INVERSOR**, sob orientação do Prof. Dr. JOÃO AMÉRICO VILELA JUNIOR, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 27 de Novembro de 2020.

Assinatura Eletrônica

01/12/2020 16:09:43.0

JOÃO AMÉRICO VILELA JUNIOR

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

03/12/2020 11:14:45.0

GUSTAVO HENRIQUE DA COSTA OLIVEIRA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

01/12/2020 08:52:44.0

ROMAN KUIAVA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

01/12/2020 15:37:48.0

JAIR URBANETZ JUNIOR

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus pelas bênçãos, proteção, sabedoria e por tudo que conquistei até agora, mas peço a ele para me dar saúde e sabedoria para conquistar muito mais.

Gostaria de agradecer ao meu filho Gustavo, que neste período sentiu minha ausência, cobrando a minha participação em todas as suas atividades e brincadeiras, e se alegra demais na minha presença. Ao meu filho Nicolas que chegou há pouco mais de oito meses e começa a descobrir este mundo maravilhoso e cheio de desafios. Também gostaria de agradecer especialmente a minha amada esposa Klecia, por aguentar as pontas, pelos adequados incentivos e compreensão ao longo deste período, por estar sempre presente como esposa e mãe, me ajudando a criar nossos filhos.

Aos meus pais e irmãos que sempre me incentivaram e me apoiaram.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal do Paraná que contribuíram para a minha formação. Especialmente ao professor Dr. João Américo Vilela Junior, por acreditar e me aceitar como seu orientando, por compartilhar seu conhecimento e pelo incentivo em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis.

A Federação das Indústrias do Estado do Paraná (FIEP) por meio do Sesi, do Senai e do IEL, pelo incentivo oferecido aos seus colaboradores inclusive para minha pessoa.

Aos meus colegas que me ajudaram com discussões relevantes e ideias pertinentes para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao apoio financeiro do Projeto PD 2866-0470/2017, projeto este regulamentado pela ANEEL e desenvolvido no âmbito do programa de P&D da Companhia Paranaense de Energia, COPEL DIS.

## RESUMO

Em 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu, por meio de resoluções normativas, os requisitos mínimos para conexão elétrica de micro e minigeração distribuída na rede de distribuição de energia do país. Desde então, vem ocorrendo um crescimento expressivo em conexões de geração fotovoltaica no sistema interligado nacional. Isso levou a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a desenvolver normas que estabelecessem os critérios e procedimentos para homologação de inversores utilizados em sistema de geração fotovoltaico conectado à rede de distribuição. Porém, os ensaios normativos são realizados de forma que apenas uma das grandezas elétricas seja alterada em cada ensaio, enquanto os demais parâmetros permanecem com seus valores nominais e constantes, não havendo interação simultânea entre as variações das grandezas elétricas entre um ensaio e outro. No entanto, em um sistema de geração fotovoltaica conectado ao sistema elétrico, sofre variações simultâneas de grandezas, como a irradiância, a qual é responsável pela variação da potência gerada, a tensão elétrica, a frequência e as distorções harmônicas de tensão. Apesar de não serem contempladas pelas normas, essas interações alteram o comportamento da corrente elétrica fornecida pelo inversor durante sua operação. O objetivo deste trabalho, portanto, é desenvolver e implementar uma técnica de ensaios considerando as variações simultâneas desses fatores, registrando as grandezas elétricas para a constituição de um banco de dados com os resultados desses ensaios. Com esses dados armazenados, foram implementados no *software* Matlab técnicas de interpolação que melhor representassem o comportamento de operação do inversor em vários pontos não ensaiados. Os resultados dos valores estimados por meio da interpolação, foram validados comparando esses resultados com valores reais obtidos do inversor ao submeter a novos ensaios com parâmetros ainda não ensaiados, por apresentar pequenos erros os resultados foram considerados aceitáveis. Dessa forma, a implementação das técnicas de ensaios e interpolação poderá ser utilizada para simular o comportamento da rede que contemple esse tipo de fonte de energia. Isso proporcionará ao usuário obter resultados com mais precisão, do que efetivamente irá acontecer quando o sistema for implantado, permitindo detectar problemas que não seriam identificados com simulações menos precisas e ainda na etapa de simulação realizar ações corretivas.

**Palavras-chave:** Qualidade de energia. Sistema fotovoltaico. Ensaio de inversores. Inversores para conexão à rede. Comportamento de sistema fotovoltaico. Simulação da operação de inversor fotovoltaico.

## ABSTRACT

In 2012, the National Electric Energy Agency (ANEEL) established, through normative resolutions, the minimum requirements for the electrical connection of micro and mini-generation distributed in the country's energy distribution network. Since then, there has been an expressive growth in photovoltaic generation connections in the national interconnected system. This led the Brazilian Technical Standards Association (ABNT) to develop standards that established the discretion and procedures for the approval of inverters used in a photovoltaic generation system connected to the distribution network. However, the normative tests are performed in such a way that only one of the electrical quantities is changed in each test, while the other parameters remain with their nominal and constant values, with no simultaneous interaction between the variations of the electrical quantities between one test and another. However, in a photovoltaic generation system connected to the electrical system, it undergoes simultaneous variations of quantities, such as irradiance, which is responsible for the variation of the generated power, the electrical voltage, the frequency and the harmonic distortions of voltage. Although not covered by the standards, these interactions change the behavior of the electrical current supplied by the inverter during its operation. The objective of this work, therefore, is to develop and implement a test technique considering the simultaneous variations of these factors, recording the electrical quantities for the constitution of a database with the results of these tests. With these data stored, interpolation techniques were implemented in the Matlab software that best represented the operating behavior of the inverter at various points not tested. The results of the estimated values through interpolation were validated by comparing these results with real values obtained from the inverter when submitting to new tests with parameters not yet tested, presenting errors within acceptable limits. In this way, the implementation of testing and interpolation techniques can be used to simulate the behavior of the network that includes this type of energy source. This will allow the user to obtain results with more precision, than will effectively happen when the system is implanted, allowing to detect problems that would not be identified with less accurate simulations and even in the simulation stage to take corrective actions.

**Keywords:** Power quality. Photovoltaic system. Inverter testing. Inverters for connection to the grid. Behavior of photovoltaic system. Simulation of photovoltaic inverter operation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Crescimento anual de unidades de geração fotovoltaica conectada à rede .....	4
Figura 2 – <i>Layout</i> simplificado dos principais equipamentos do laboratório .....	8
Figura 3 – Disposição dos principais equipamentos usados no referido trabalho .	9
Figura 4 – Forma visual de apresentar uma matriz multidimensional .....	18
Figura 5 – THDi (curva superior) e potência gerada (curva inferior) no inversor de 5 kW .....	24
Figura 6 – Correntes harmônicas do inversor fotovoltaico (potência nominal de 5 kW) para diferentes condições de potências medidas em campo, durante 4 dias .....	25
Figura 7 – Gráficos irradiação, potência ativa, fator de potência e potência reativa ao longo de um dia .....	26
Figura 8 – Tela de configuração de arranjo fotovoltaico – SAS Control .....	30
Figura 9 – Fluxograma de ensaios para levantamento do comportamento da corrente fundamental em função da variação da frequência.....	37
Figura 10 – Corrente fundamental do inversor operando em função da variação da frequência, potência máxima e tensão nominal constantes .....	38
Figura 11 – Comparação da corrente fundamental medida e interpolada em função da variação da frequência .....	39
Figura 12 – Comparação da corrente harmônica de 3ª ordem medida e interpolada em função da variação da frequência.....	39
Figura 13 – Correntes harmônicas medidas e interpoladas do inversor operando com frequência variável, potência máxima e tensão nominal constantes – harmônicas de 5ª até a 11ª ordem .....	40
Figura 14 – Fluxograma de ensaios para levantamento do comportamento da corrente fundamental em função da variação da tensão .....	43
Figura 15 – Gráfico das correntes fundamentais do inversor operando com tensão variável nas potências 75%, 83% e 100 % e com frequência de 60 Hz .....	44

Figura 16 – Corrente fundamental do inversor operando com tensão variável, com potência nominal e com frequência de 60 Hz .....	45
Figura 17 – Gráfico comparativo da corrente interpolada em 91,5% da potência nominal com as correntes saturada e extrapolada, operando com tensão variável e frequência de 60 Hz .....	46
Figura 18 – Comparação da corrente fundamental medida e interpolada em função da variação da tensão, com potência máxima e frequência de 60 Hz .....	47
Figura 19 – Comparação da corrente harmônica de 3ª ordem medida e interpolada em função da variação da tensão, com potência máxima e frequência de 60 Hz .....	48
Figura 20 – Gráfico das correntes harmônicas medidas e interpoladas do inversor operando com tensão variável, potência máxima e frequência de 60 Hz – harmônicas de 5ª até a 11ª ordem .....	48
Figura 21 – Fluxograma de ensaios para levantamento do comportamento da corrente fundamental em função da variação da potência .....	50
Figura 22 – Gráfico da corrente fundamental e do fator de potência com o inversor operando em função da variação da potência, tensão nominal e frequência de 60 Hz.....	50
Figura 23 – Gráfico da potência e da corrente fundamental com o inversor operando em função da variação da potência, tensão nominal e frequência de 60 Hz.....	51
Figura 24 – Comparação da corrente fundamental medida e interpolada em função da variação da potência, com tensão e frequência constantes .....	52
Figura 25 – Comparação da corrente harmônica de 3ª ordem medida e interpolada em função da variação da potência .....	53
Figura 26 – Correntes harmônicas medidas e interpoladas do inversor operando com potência variável, tensão nominal e frequência em 60 Hz – harmônicas de 5ª até a 11ª ordem .....	53

Figura 27 – Distorções harmônicas de corrente em função da variação da potência, tensão nominal e frequência em 60 Hz – harmônicas de 3ª até a 11ª ordem .....	54
Figura 28 – Gráfico da corrente fundamental com o inversor operando em função das variações das componentes harmônicas individuais de tensão, potência máxima, tensão nominal e frequência de 60 Hz .....	57
Figura 29 – Gráfico das correntes harmônicas ímpares, com o inversor operando com potência ativa máxima, tensão nominal e frequência de 60 Hz	58
Figura 30 – Gráfico da corrente fundamental com o inversor operando em função da variações das componentes harmônicas de tensão de 3ª e 5ª, 3ª e 7ª, 3ª e 9ª, 5ª e 9ª e 9ª e 11ª ordem, potência máxima, tensão nominal e frequência de 60 Hz .....	59
Figura 31 – Gráfico dos pares de correntes harmônicas ímpares de 3ª a 11ª ordem com o inversor operando em função da variação da componente harmônica de tensão, com potência ativa máxima, tensão nominal e frequência de 60 Hz.....	60
Figura 32 – Comparação da corrente fundamental medida e interpolada em função das variações de todas as componentes harmônicas ímpares de tensão, com potência máxima, tensão nominal e frequência de 60 Hz .....	62
Figura 33 – Gráfico das correntes harmônicas ímpares de 3ª a 11ª ordem com o inversor operando em função da variação de todas as componentes harmônicas ímpares de tensão de 3ª a 11ª ordem, com potência ativa máxima, tensão nominal e frequência de 60 Hz.....	63
Figura 34 – Distorções harmônicas em função da variação da tensão, potência máxima e frequência em 60 Hz – harmônicas de 3ª até a 11ª ordem .....	64
Figura 35 – Distorções harmônicas em função da variação da frequência, potência máxima e tensão nominal – harmônicas de 3ª até a 11ª ordem.....	64
Figura 36 – Comparação da corrente fundamental medida em função da variação da temperatura .....	66

Figura 37 – Gráfico das correntes harmônicas de 3 <sup>a</sup> até a 11 <sup>a</sup> ordem medidas em função da variação da temperatura .....	66
Figura 38 – Fluxograma do procedimento de ensaio com interação simultânea das grandezas elétricas .....	71
Figura 39 – Sugestão de implementação do inversor no software Matlab/ <i>Simulink</i> .....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)	13
Tabela 2 – Faixas aplicadas às tensões nominais inferiores a 1 kV	14
Tabela 3 – Limite de distorção harmônica de corrente injetada pelo inversor	15
Tabela 4 – Tolerâncias de trabalho do FP por faixa de potência nominal do inversor	16
Tabela 5 – Controle de potência em situações de sobrefrequência	17
Tabela 6 – Criação das matrizes bidimensional (X) e (Y) como parte da construção da matriz de quatro dimensões	19
Tabela 7 – Criação da matriz de quatro dimensões	20
Tabela 8 – Palavras-chave para a pesquisa de periódicos	23
Tabela 9 – Características elétricas da fonte ca e comparativo com a norma	31
Tabela 10 – Comparação entre os níveis de exatidão exigidos pela NBR 16149 e NBR 16150 e os valores do analisador de energia 435 série 1	32
Tabela 11 – Característica de entrada e saída do inversor monofásico ensaiado com a metodologia proposta	33
Tabela 12 – Parâmetros de ensaios utilizados na avaliação do comportamento da corrente do inversor em função da variação da frequência	36
Tabela 13 – Parâmetros de ensaios utilizados na avaliação do comportamento da corrente do inversor em função da variação da tensão	42
Tabela 14 – Parâmetros de ensaios utilizados na avaliação do comportamento da corrente do inversor em função da variação da potência	49
Tabela 15 – Parâmetros de ensaios utilizados na avaliação do comportamento da corrente do inversor em função da variação individual das componentes harmônicas de tensão	56
Tabela 16 – Parâmetros de ensaios utilizados na avaliação do comportamento da corrente do inversor em função da variação de todas as componentes harmônicas ímpares de tensão	61

Tabela 17 –Grandezas elétricas definidas para realização de ensaios do inversor .....	67
Tabela 18 – Resultado do ensaio de validação 01 .....	73
Tabela 19 – Resultado do ensaio de validação 02 e 03, sem a presença de harmônicas de tensão .....	75
Tabela 20 – Resultado do ensaio de validação 04 .....	76
Tabela 21 – Resultado do ensaio de validação 05 .....	78
Tabela 22 – Resultado do ensaio de validação 06 .....	80
Tabela 23 – Resultado do ensaio de validação 07 .....	81
Tabela 24 – Resultado do ensaio de validação 08 .....	82

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>3</b>
1.1	OBJETIVO .....	9
1.2	JUSTIFICATIVA .....	10
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	11
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>12</b>
2.1	QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA .....	12
2.2	DISTORÇÕES HARMÔNICAS .....	12
2.3	NÍVEIS DE TENSÃO EM REGIME PERMANENTE .....	13
2.4	PADROES NORMATIVOS PARA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA CONECTADO À REDE .....	14
2.5	ABNT NBR 16149/2013 .....	15
2.6	MATRIZES MULTIDIMENSIONAIS PARA APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO .....	17
2.7	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	21
<b>3</b>	<b>REVISAO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>22</b>
3.1	ESTRATÉGIA DE COLETA DE MATERIAIS .....	22
3.2	ANÁLISE DA LITERATURA .....	23
3.3	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	28
<b>4</b>	<b>ESTRUTURA E EQUIPAMENTOS PARA ENSAIOS</b> .....	<b>29</b>
4.1	SIMULADOR DE ARRANJOS FOTOVOLTAICOS .....	29
4.2	FONTE DE CORRENTE ALTERNADA REGENERATIVA .....	30
4.3	ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA .....	31
4.4	PROJETO DAS INSTALAÇÕES DO LABORATÓRIO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA .....	32
4.5	INVERSOR UTILIZADO NOS ENSAIOS .....	33

4.6	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	34
<b>5</b>	<b>DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ENSAIOS PARA LEVANTAMENTO DO COMPORTAMENTO DAS CORRENTES ELÉTRICAS DO INVERSOR .....</b>	<b>35</b>
5.1	DEFINIÇÃO DOS PONTOS A SEREM ENSAIADOS DO INVERSOR EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA .....	35
5.2	DEFINIÇÃO DOS PONTOS A SEREM ENSAIADOS DO INVERSOR EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA TENSÃO .....	41
5.3	DEFINIÇÃO DOS PONTOS A SEREM ENSAIADOS DO INVERSOR EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA POTÊNCIA .....	49
5.4	DEFINIÇÃO DOS PONTOS A SEREM ENSAIADOS DO INVERSOR EM FUNÇÃO DAS VARIAÇÕES DAS COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO .....	55
5.5	COMPORTAMENTO DA CORRENTE EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA .....	65
5.6	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	67
<b>6</b>	<b>VALIDAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>69</b>
6.1	LEVANTAMENTO DO BANCO DE DADOS .....	69
6.2	ENSAIOS DE VALIDAÇÃO SEM A PRESENÇA DE COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO .....	72
6.3	ENSAIOS DE VALIDAÇÃO COM A PRESENÇA DE COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO .....	79
6.4	SUGESTÃO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO .....	83
6.5	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	84
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>85</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>87</b>
	<b>APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DO PAINEL GERAL DO LABORATÓRIO .....</b>	<b>90</b>

<b>APÊNDICE B – SCRIPT PARA CRIAÇÃO DAS MATRIZES MULTIDIMENSIONAIS, INTERPOLAÇÃO UNIDIMENSIONAL E MULTIDIMENSIONAL.....</b>	<b>91</b>
---	-----------

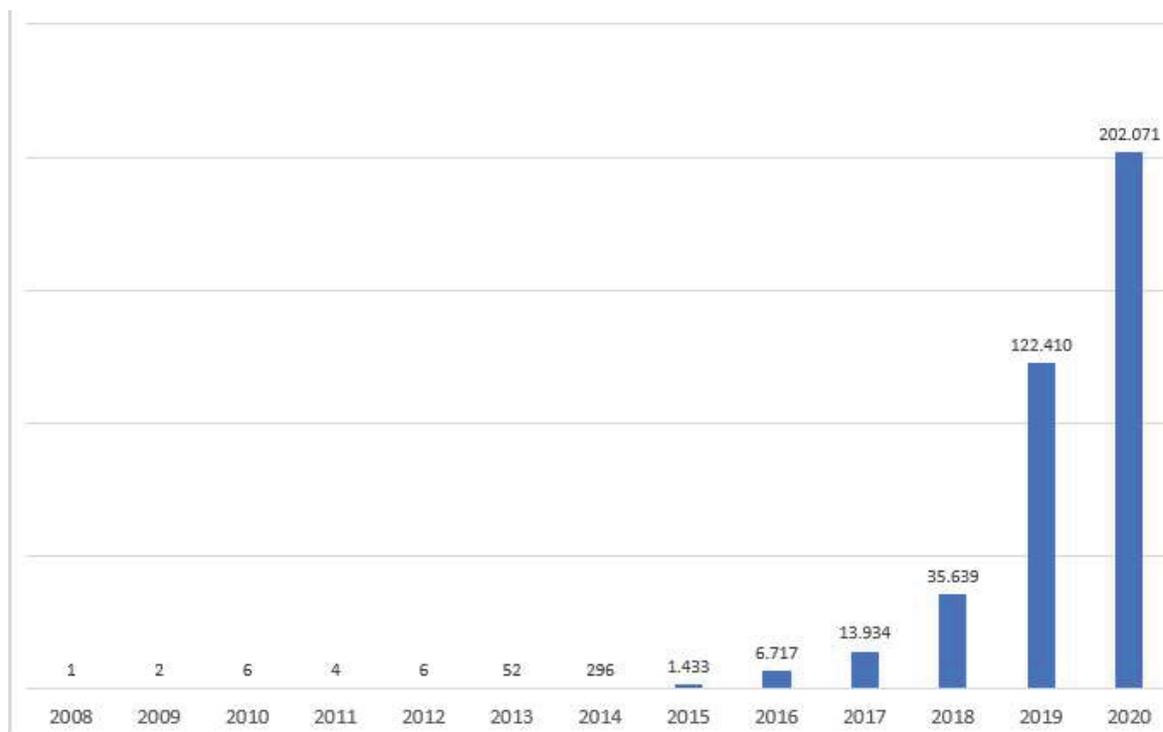
## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, há uma grande necessidade de diversificação da matriz energética nacional para atender os desafios impostos pelos longos períodos de estiagem que estão ocorrendo com maior frequência. Como também na tentativa de suprir o aumento da demanda energética do país e diminuir os custos da geração (ALMEIDA NETO, 2017). Entre as alternativas existentes, está a geração distribuída, regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) pelas Resoluções Normativas 482/2012 e 687/2015, estabelecendo requisitos mínimos para micro e minigeração distribuída.

Em 2016, o Brasil ratificou o acordo de Paris, comprometendo-se a reduzir os gases de efeito estufa (GEE), expandindo sua matriz energética renovável, aumentando a participação das energias eólica, biomassa e solar (KASSMAYER; FRAXE NETO, 2016). No período de 2007 a 2019, foram instaladas 163.588 unidades de geração distribuída, utilizando fonte fotovoltaica (FV), sendo que 70% dessas instalações foram realizadas em 2019, com 122.410 unidades (ANEEL, 2020). Em 2016, o país possuía potência instalada de 74,4 MWp de micro e minigeração distribuída por fonte FV (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017). Em 2020, a geração distribuída por essa fonte ultrapassou os 4,5 GWp de potência instalada com 382.611 unidades instaladas. A Figura 1 apresenta o gráfico da quantidade de geração fotovoltaica instalada desde 2007 até março de 2020 no sistema interligado nacional.

Segundo a ANEEL, as concessionárias de energia elétrica e os consumidores são responsáveis por manter a qualidade de energia dentro dos limites aceitáveis estabelecidos para distorção harmônica de tensão, tensão em regime permanente, fator de potência, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação da frequência, entre outros. Caso algum parâmetro esteja fora dos limites aceitáveis, a energia é considerada de baixa qualidade.

Figura 1 – Crescimento anual de unidades de geração fotovoltaica conectada à rede



FONTE: O autor (2020).

O crescimento expressivo da geração FV conectada na rede de distribuição de energia elétrica nos últimos anos está, também, impactando a qualidade de energia na rede de distribuição devido à intermitência, característica presente nesse tipo de fonte de energia. Tais intermitências são causadas pelas frequentes passagens de nuvens entre o sistema fotovoltaico e o sol, podendo provocar variações abruptas na potência gerada, causar flutuações e desequilíbrio de tensão e gerar distorções harmônicas de corrente acima dos limites normativos nos pontos de conexão entre o sistema fotovoltaico e a rede (URBANETZ JUNIOR, 2010); (WONG *et al.*, 2014); (DAL MOLIN *et al.*, 2016); (P. ALVES *et al.*, 2018).

Muitos outros trabalhos também apresentam os impactos que o sistema fotovoltaico pode provocar na rede elétrica de distribuição, como aumento da distorção harmônica de corrente para diferentes faixas de potência gerada, apresentado por (CHICCO; SCHLABBACH; SPERTINO, 2009). Elevação do nível de tensão podendo provocar redução da qualidade de energia, apresentado por (WONG *et al.*, 2014), (PINTO; MARIANO; CALADO, 2015) e (KARIMI *et al.*, 2016).

No entanto, outros autores destacam algumas melhorias obtidas na rede elétrica devido à instalação de inversores modernos, que são capazes de controlar a

potência reativa, mantendo o fator de potência dentro dos limites aceitáveis estabelecidos por norma. (ELKHOLY *et al.*, 2016) e (GRANJA *et al.*, 2018).

No setor industrial, foi percebida a redução das distorções harmônicas de corrente em acionamento de motores elétricos controlados por inversores de frequência, quando a alimentação é feita por energia proveniente de fonte fotovoltaica, apresentado por (ANWARI *et al.*, 2009).

Entretanto, esses estudos não mostram se a rede de distribuição apresentava uma baixa qualidade de energia antes da instalação fotovoltaica, como distorções harmônicas de tensão, níveis de tensão acima da nominal ou desequilíbrio de tensão pois isso, poderá interferir no seu comportamento, como aumentar as distorções harmônicas de corrente produzidas por ele, aumentar o desequilíbrio de tensão na rede, caso a fase para conexão não seja avaliada corretamente, e elevar ainda mais o nível de tensão. Contudo, há a necessidade de estudos que mostrem a interferência na operação do inversor fotovoltaico quando o ponto de conexão tem baixa qualidade de energia, a fim de identificar quais parâmetros de qualidade de energia da rede elétrica interferem e quanto interferem na qualidade de energia fornecida pelo inversor. Isso possibilitaria aos proprietários e integradores de sistema FV a implementação de medidas que reduzam ou eliminem as interferências identificadas, bem como evidenciaria e incentivaria os fabricantes desses inversores a desenvolverem equipamentos mais robustos, capazes de evitar interferências dos parâmetros da rede elétrica na operação do inversor.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabeleceu, por meio das NBR 16149:2013, NBR 16150:2013 e NBR IEC 62116:2012, os critérios e procedimentos para homologação de inversores a serem utilizados em sistema FV conectado na rede de distribuição de energia elétrica. A portaria 357/2014 do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) estabeleceu os critérios para testes e padrões de qualidade para desenvolvimento de sistemas e equipamentos FV com base nas normas da ABNT citadas anteriormente, como também para módulos FV, baterias, controladores de cargas e inversores FV de até 10 kW de potência conectados na rede (BRASIL, 2014; ALMEIDA NETO, 2017).

Para obter a certificação, o inversor utilizado em sistema fotovoltaico deve ser submetido a ensaios em laboratórios acreditados pelo Inmetro. Tais ensaios englobam medição de distorções harmônicas de corrente fornecida pelo inversor em várias faixas de potência. A desconexão do inversor deve ocorrer quando a frequência ou a

tensão estiver fora dos parâmetros considerados aceitáveis para a operação. No caso da frequência, ao atingir 62 Hz ou 57,5 Hz; e no caso da tensão da rede elétrica, quando seu nível estiver acima de 110% ou abaixo de 80% da tensão nominal, entre outros ensaios.

Porém, esses ensaios são realizados de forma isolada, ou seja, não há interação simultânea das variações dos parâmetros das grandezas elétricas entre um teste e outro, além de serem realizados em um ambiente controlado. Por exemplo, a tensão deve ser parametrizada com valor nominal do inversor para realizar os testes de variação da frequência, e para os ensaios de variação de tensão, a frequência deve ser fixada em 60 Hz. No entanto, em um sistema de geração fotovoltaica instalado em uma edificação qualquer, sofre variações simultâneas de grandezas, como a irradiância, que é responsável pela variação da potência gerada, a tensão elétrica, a frequência e as distorções harmônicas de tensão. Apesar de não serem contempladas pelas normas, essas interações alteram o comportamento da corrente elétrica fornecida pelo inversor durante sua operação.

Diante disso, foi aplicada uma técnica de ensaio em que as variações dos parâmetros de rede como tensão, frequência e potência disponibilizadas pelo arranjo fotovoltaico por meio da giga de testes sejam realizadas simultaneamente durante os ensaios. Os ensaios foram realizados em regime permanente com a tensão da rede distorcida devido à presença de harmônicas de tensão de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> ordens. Com os resultados foi criado um banco de dados para a implementação de métodos de interpolação em ambiente computacional, capaz de representar o comportamento das correntes fundamental e harmônicas produzidas pelo inversor nos pontos de operação do inversor que não foram ensaiados como potência ativa, tensão e frequência da rede.

Como existem diversos parâmetros interagindo simultaneamente para obter a corrente de saída do inversor, a qual sofre interferência de acordo com a qualidade de energia no ponto de conexão comum (PCC) entre o equipamento e a rede elétrica, houve também o desafio de encontrar a melhor técnica de interpolação que permitisse trabalhar com todas essas variáveis concatenadamente e que o resultado representasse com maior exatidão a corrente de saída do inversor.

Como as características de operação do inversor não são discretas, mas contínuas, as possibilidades de combinações tendem a ser infinitas, o que tornariam os testes muito exaustivos, logo, com o uso da técnica proposta, foram realizados

ensaios em apenas alguns pontos de operação do inversor para tensão, frequência, componentes harmônicas de tensão e potência fornecida pelo arranjo FV. Assim, foi possível identificar o comportamento das correntes fundamental e harmônicas produzidas pelo inversor em qualquer condição de operação em regime permanente mesmo com poucos ensaios.

Para cada parâmetro foram definidos os valores para cada ensaio (passos) apresentados no capítulo 5, ou seja, devendo ser o maior possível para reduzir o número de ensaios, ao mesmo tempo não pode ser tão grande que não represente o comportamento da corrente de saída do inversor, devido ao erro no cálculo de interpolação. A seleção dos pontos de operação também foi escolhida com o objetivo de abranger os parâmetros de qualidade de energia da rede elétrica no PCC como tensão da rede, frequência, presença de harmônicas de tensão, afim de replicar o método utilizado neste trabalho em outros modelos de inversores fotovoltaicos conectados à rede.

Outra avaliação que também foi analisada é a influência da temperatura do inversor na operação do equipamento, esperando-se uma fraca influência da temperatura na corrente de saída do inversor.

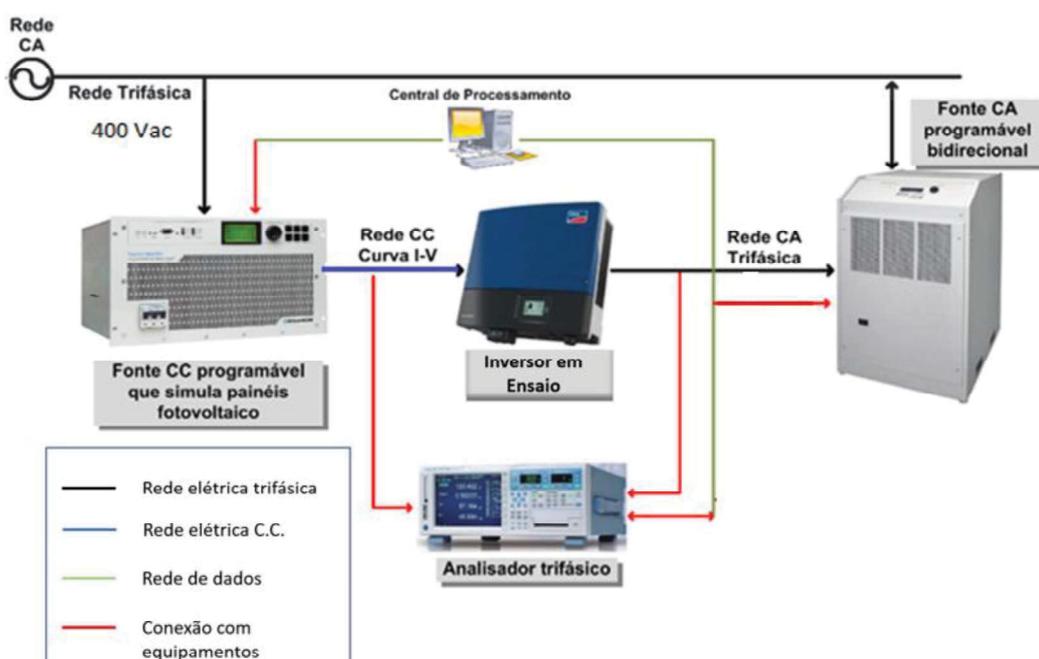
A validação das interpolações foi realizada submetendo o inversor novamente a teste, em condições da qualidade de energia no PCC, diferente das ensaiadas, observando o comportamento da corrente elétrica do inversor sob as novas condições, comparando os valores estimados da interpolação na mesma condição do ensaio de validação. A diferença entre os valores ensaiados e estimados deveria ser pequena para ser considerada aceitável.

Para que este estudo fosse realizado, era necessária a existência de uma estrutura apropriada para ensaios em inversores fotovoltaicos, existente em laboratórios de certificação e homologação de inversores e em algumas instituições de ensino. A UFPR é uma das poucas instituições que possuem um laboratório com estrutura moderna e específica para ensaios em inversores utilizados em sistema fotovoltaico. Além disso, o laboratório possibilita o desenvolvimento de pesquisas na área de inversores, apoiando desenvolvedores e fabricantes na solução de problemas, propondo possíveis melhorias, desenvolvimentos de novos produtos e equipamentos.

O laboratório de geração distribuída da UFPR foi desenvolvido e implantado entre os anos de 2019 e 2020, sendo que o projeto das instalações elétricas foi uma

das atividades desenvolvidas pelo proponente deste trabalho paralelamente à dissertação. A Figura 2 mostra o *layout* simplificado dos equipamentos existentes no laboratório.

Figura 2 – *Layout* simplificado dos principais equipamentos do laboratório



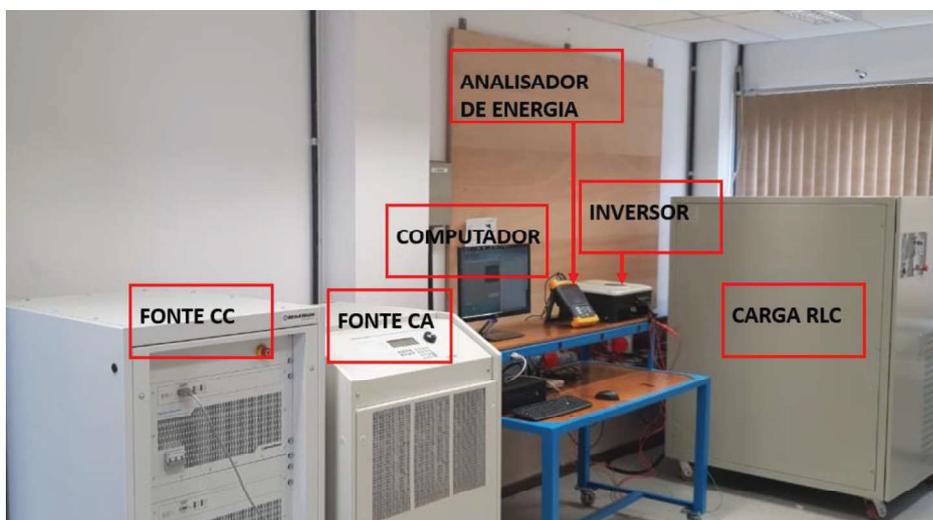
FONTE: O autor (2020).

A Figura 3 mostra a disposição dos principais equipamentos usados neste trabalho e instalados no laboratório de geração distribuída da UFPR, composto basicamente por uma fonte de corrente contínua, um analisador de qualidade de energia, uma fonte de corrente alternada e uma carga RLC.

A fonte de corrente alternada é bidirecional e faz o papel de uma rede elétrica monofásica ou trifásica de acordo com a característica de conexão com o inversor. Todos os parâmetros de entrada como tensão eficaz, harmônicas individuais de tensão e frequência da rede elétrica são configuráveis e permitem a realização dos ensaios normativos para certificação e homologação do inversor usado em sistema fotovoltaico.

A fonte de corrente contínua é capaz de emular os módulos fotovoltaicos, traçando a curva I-V de acordo com a tecnologia e o arranjo fotovoltaico. Essa fonte também permite parametrizar as variações de temperatura e irradiância para emular o funcionamento dos módulos fotovoltaicos nessas condições de operação.

Figura 3 – Disposição dos principais equipamentos usados no referido trabalho



FONTE: O autor (2020).

Após a configuração do arranjo fotovoltaico, é possível enviar comandos para a fonte com alterações de temperatura e irradiância de forma a simular o funcionamento e o comportamento da curva configurada do painel, atendendo os requisitos necessários para ensaiar inversores fotovoltaicos.

Os registros dos ensaios foram efetuados pelo analisador de qualidade de energia, esse equipamento tem memória de massa, ou seja, é capaz de registrar os parâmetros da rede, como tensão eficaz, corrente eficaz, frequência, distorções harmônicas de tensão e corrente individual e total, assim como outros parâmetros não mencionados neste trabalho. Com a estrutura existente, foi possível ensaiar o inversor nas diversas condições de operação propostas no referido trabalho.

## 1.1 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma metodologia de ensaios dos inversores utilizados na geração fotovoltaica, de forma que os resultados obtidos nos ensaios permitam emular computacionalmente o comportamento do inversor, usando métodos de interpolação dos dados coletados.

Os objetivos específicos são:

- Analisar o comportamento das correntes elétricas do inversor, submetendo-o a vários ensaios elétricos com variações dos parâmetros de tensão eficaz, potência ativa, frequência e componentes harmônicas ímpares de tensão,

sendo que apenas um desses parâmetros é alterado em cada ensaio e os demais permanecem constantes;

- Realizar a análise e identificação da correlação entre os parâmetros de entrada, como potência, tensão, componentes harmônicas de tensão e frequência, fornecidos pelas fontes cc e ca, com a corrente fundamental e suas componentes harmônicas na saída do inversor no ponto de conexão entre os equipamentos;
- Desenvolver uma técnica de ensaios em que as variações da potência disponibilizada pelo arranjo fotovoltaico e as variações das grandezas elétricas da rede como a tensão, frequência e harmônicas de tensão de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> ordens, sejam contempladas pelos ensaios;
- Submeter inversor comercial aos ensaios utilizando a técnica desenvolvida, registrando as grandezas elétricas do ponto de conexão comum (PCC) entre o inversor e a rede elétrica, para criar o banco de dados a ser utilizado no processo de interpolação;
- Implementar técnicas de interpolação multidimensional em ambiente computacional que melhor represente o comportamento de operação do inversor em vários pontos não ensaiados; e
- Realizar ensaios de validação com parâmetros elétricos aleatórios não ensaiados anteriormente e comparar com os resultados da interpolação.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Muitos estudos que abordam o comportamento dos inversores usados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede são realizados em campo devido à falta de uma estrutura de laboratório apropriada, capaz de emular as mais diversas condições de operação de uma rede elétrica, como também dos arranjos fotovoltaicos.

Outros estudos usam modelos matemáticos desenvolvidos com resultados de ensaios realizados durante a homologação dos inversores. Consequentemente, acabam não contemplando as interações das diversas grandezas, por exemplo, distorções harmônicas de tensão existentes na rede elétrica.

Diante disso, a contribuição do referido trabalho é a apresentação de uma técnica de ensaios em inversores contemplando as interações simultâneas das diversas grandezas, utilizando os resultados desses testes para compor um banco de dados para criar um sistema computacional capaz de representar o comportamento

de inversores fotovoltaicos com base no comportamento real do equipamento operando em diversas situações.

Dessa forma, esse sistema pode ser utilizado para simular o comportamento da rede que contemple esse tipo de geração, proporcionando ao usuário obter resultados com precisão, mais próximos do que efetivamente irá acontecer quando o sistema for implantado, permitindo detectar problemas que não seriam identificados com simulações menos precisas e ainda na etapa de simulação realizar ações corretivas.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi elaborada em sete capítulos organizados da seguinte forma:

No capítulo 1 são apresentados a introdução, os objetivos do trabalho e a justificativa. Contextualizando brevemente o assunto que envolve o tema como o aumento expressivo da geração fotovoltaica no Brasil, a existência das normas de homologação do inversor usado neste tipo de geração.

No capítulo 2 é apresentada a base teórica referente a procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional pertinentes ao referido trabalho. Os padrões normativos e de ensaios de homologação de inversores usados para geração de energia fotovoltaica conectada à rede. Neste capítulo também é apresentada uma das formas de constituir matrizes multidimensionais para aplicação de métodos de interpolação usados neste trabalho.

O capítulo 3 apresenta a revisão da literatura que abrange desde o processo de seleção de portfólio bibliográfico até a análise da literatura.

O capítulo 4 apresenta a estrutura e equipamentos necessários para a elaboração deste trabalho.

No capítulo 5 são apresentados os ensaios realizados para levantamento do comportamento das correntes elétricas do inversor em função da variação da frequência, da tensão, da potência e na presença de harmônicas de tensão.

No capítulo 6 são apresentados os ensaios de validação e a análise dos resultados.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentadas as bases teóricas dos critérios e limites da qualidade de energia elétrica da rede de distribuição onde o inversor de tensão é conectado. Também são apresentados os critérios estabelecidos e as recomendações específicas para a interface de conexão entre os sistemas fotovoltaicos e a rede de distribuição. Por fim, é apresentada uma maneira de criar matrizes multidimensionais para adoção de métodos de interpolação em sistema multidimensional, usado no referido trabalho.

### 2.1 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

A qualidade de energia elétrica (QEE) é considerada ideal quando a tensão possui forma perfeitamente senoidal, com amplitude e frequência constantes. Ao apresentar desvios acima dos limites aceitos por norma é considerado como uma perda de qualidade de energia, podendo resultar em falha ou prejudicar a operação de equipamentos.

A ANEEL é o órgão responsável por regular o setor elétrico brasileiro, dentre suas funções está a elaboração de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST). Seus documentos são de caráter normativo e têm como objetivo principal a padronização das atividades técnicas relacionadas ao sistema elétrico nacional para geradores, transmissoras, distribuidoras, consumidores, importadores e exportadores de energia elétrica entre países.

O PRODIST possui nove módulos, sendo que o módulo 8 estabelece os procedimentos que abordam a qualidade da energia elétrica. Apresentando limites para tensão tanto para regime permanente quanto para regime transitório, como harmônicos de tensão, tensão em regime permanente, fator de potência, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação da frequência e Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD).

### 2.2 DISTORÇÕES HARMÔNICAS

As distorções harmônicas são associadas à deformação na forma de onda das tensões e correntes em relação à forma de onda senoidal, podendo prejudicar a

operação das cargas, principalmente as mais sensíveis, como equipamentos e dispositivos eletrônicos e inversores de tensão utilizados em sistema de geração fotovoltaica.

No Brasil, a ANEEL é responsável por estabelecer os indicadores de qualidade de energia, os quais determinam se o sistema elétrico está funcionando dentro dos limites considerados satisfatórios. Assim, tanto as concessionárias de energia elétrica quanto os consumidores são responsáveis por manter a qualidade de energia dentro dos limites estabelecidos. A Tabela 1 mostra os limites das distorções harmônicas individuais e totais (em porcentagem da tensão fundamental), apresentando como limite de 10% para baixa tensão.

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

Harmônica individual e total de tensão	Tensão Nominal
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$
3 <sup>a</sup>	6,5%
5 <sup>a</sup>	7,5%
7 <sup>a</sup>	7,5%
9 <sup>a</sup>	6,5%
11 <sup>a</sup>	7,5%
Distorção Harmônica Total de Tensão (THDv)	10%

FONTE: Adaptado de PRODIST, ANEEL (2017).

### 2.3 NÍVEIS DE TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

O nível de tensão em regime permanente é caracterizado de acordo com a faixa da tensão medida (TM), os valores devem ser comparados com a tensão contratada pelo consumidor e classificada como adequada, precária e crítica. A Tabela 2 apresenta a classificação para tensão de até 1 kV. As medições devem ser realizadas no ponto de conexão entre a rede de distribuição e a unidade consumidora.

No caso de ensaios em inversores de tensão utilizados em sistema de geração de energia fotovoltaica, a NBR 16149 estabelece que os testes sejam feitos utilizando valores na faixa de 80% a 110% da tensão nominal, ou seja, em alguns momentos deve superar a faixa crítica definida pela ANEEL, mencionada na Tabela 2.

Tabela 2 – Faixas aplicadas às tensões nominais inferiores a 1 kV

Classificação da tensão	Faixa de variação da tensão medida (TM) em relação à tensão nominal contratada (TN)
Adequada	$0,92TN \leq TM \leq 1,05TN$
Precária	$0,87TN \leq TM \leq 0,92 TN$ ou $1,05TN < TM \leq 1,06TN$
Crítica	$TM < 0,87TN$ ou $TM > 1,06TN$

FONTE: Adaptado de PRODIST, ANEEL (2020).

## 2.4 PADROES NORMATIVOS PARA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA CONECTADO À REDE

À medida que aumenta a penetração de geração distribuída na rede elétrica, certos aspectos técnicos de integração devem ser considerados. Como essas fontes são intermitentes, sua penetração em larga escala pode influenciar a operação do sistema de distribuição de energia. Algumas normas e diretrizes internacionais abordam a integração da geração fotovoltaica, outras abordam a geração distribuída de uma forma mais ampla, incluindo a fotovoltaica. De maneira geral, as normas estabelecem os requisitos para qualidade de energia, regulação de tensão, resposta do sistema em condições anormais de funcionamento, segurança e proteção.

Dos padrões internacionais, os mais reconhecidos e usados são o IEEE 1547 e o IEC 61727. O padrão IEEE 1547 inclui especificações técnicas e testes para interconexão de geração distribuída abaixo de 10 MVA, enquanto o IEC 61727 se aplica especificamente a sistemas fotovoltaicos com capacidade nominal de até 10 kW conectados à rede.

No Brasil, a ABNT elaborou a NBR 16149, estabelecendo as recomendações de conexão entre o inversor e a rede elétrica para aplicações de sistemas fotovoltaicos, usando como padrão de referência o IEC 61727, VDE-AR-N 4105, entre outros padrões internacionais. No tocante a procedimentos de ensaios de anti-ilhamento e conformidades de conexão com a rede elétrica, a ABNT adotou como referência os padrões IEC 62116 e IEEE 1547.1, respectivamente.

## 2.5 ABNT NBR 16149/2013

Segundo a NBR 16149 (ABNT, 2013), os inversores devem ser avaliados sob os parâmetros de qualidade de energia (oscilações de tensão, cintilação, frequência, distorção harmônica e fator de potência) descritos no módulo 8 do PRODIST, devendo ser medidos no ponto de conexão comum, entre o sistema FV e a rede.

As distorções harmônicas de correntes são consequências dos acionamentos de cargas não lineares que, por sua vez, distorcem a tensão, provocando uma “bola de neve”. Apesar de o PRODIST módulo 8 abordar e estabelecer limites referente à distorção harmônica para a tensão, ele não estabelece limites para distorções de correntes. Segundo a NBR 16149 (2013, p. 4), a distorção harmônica total (THDi) e individual de corrente injetada pelo inversor na rede deve ser limitada aos valores apresentados na Tabela 3, quando o inversor estiver operando com sua potência nominal.

Tabela 3 – Limite de distorção harmônica de corrente injetada pelo inversor

Harmônicos ímpares	Limite de distorção
3° a 9°	< 4,0 %
11° a 15°	< 2,0 %
17° a 21°	< 1,5 %
23° a 33°	< 0,6 %
Harmônicos pares	Limite de distorção
2° a 8°	< 1,0 %
10° a 32°	< 0,5 %
THD	Limite de distorção
-	5%

FONTE: ABNT NBR 16149/2013 – adaptada (2020).

Quanto ao Fator de Potência (FP), os inversores utilizados nos sistemas fotovoltaicos devem sair de fábrica com o fator de potência unitário, com tolerância de 0,98 indutivo a 0,98 capacitivo quando a potência injetada for superior a 20% da nominal. Dependendo da potência nominal do inversor, o inversor poderá realizar o ajuste interno do fator de potência através do automonitoramento da tensão, permitindo que o fator de potência opere com valor indutivo ou capacitivo menor que 0,98, a fim de manter a tensão dentro dos limites aceitáveis pela NBR 16149, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Tolerâncias de trabalho do FP por faixa de potência nominal do inversor

Potência nominal do inversor [kWp]	FP ajustado de fábrica	Tolerância de trabalho para FP (Capacitivo e Indutivo)	Opcionais	Tensão de ativação do ajuste	Tensão de desativação do ajuste
$P_{inv} \leq 3 \text{ kWp}$	1	0,98	-	-	-
$3 \text{ kWp} < P_{inv} \leq 6 \text{ kWp}$			Pode operar com FP de 0,95 quando a injeção de potência for maior que 50% da potência nominal do inversor e a tensão da rede ultrapassar a tensão de ativação do ajuste.	*Entre 100% e 110%	**Entre 90% e 100%
$6 \text{ kWp} \leq P_{inv}$			Pode operar com FP de 0,90 quando a injeção de potência for maior que 50% da potência nominal do inversor e a tensão da rede ultrapassar a tensão de ativação do ajuste. Realizar controle de potência reativa.	*Entre 100% e 110% Ou definidos pelo operador da rede	**Entre 90% e 100% ou definidos pelo operador da rede

\* Valor ajustado em fábrica deve ser de 104% da tensão nominal do inversor.

\*\* Valor ajustado em fábrica deve ser de 100% da tensão nominal do inversor.

FONTE: adaptada de ABNT NBR 16149/2013 (2020).

No tocante à tensão, a NBR 16149 estabelece que o inversor deve operar normalmente sob uma tensão de rede entre 80% a 110% da tensão nominal do inversor. Isso significa que o inversor deverá operar normalmente nas faixas consideradas precária ou crítica definidas pelo PRODIST.

Quanto à frequência, todo inversor conectado à rede deverá manter a potência injetada constante entre 58 Hz e 60.5 Hz. Entre 60.5 Hz e 61.9 Hz a potência injetada na rede deverá reduzir linearmente com uma taxa de 40% por Hz. Essa redução da potência com o aumento da frequência tem como finalidade aumentar a estabilidade do sistema elétrico no qual esses equipamentos estão conectados. A Tabela 5 mostra as etapas de ensaios que devem ser realizadas no inversor operando com potência nominal e com 50% da sua capacidade para verificar a atuação do controle de potência ativa em função da frequência.

Tabela 5 – Controle de potência em situações de sobrefrequência

Passo do ensaio	Frequência [Hz]	Redução da potência de saída do inversor [%]	Potência de saída do inversor [%]. Operando com potência nominal	Potência de saída do inversor [%]. Operando com 50% da potência nominal	Tempo mínimo [s] para elevar a potência após a frequência retornar a 60 Hz $\pm$ 0,05 Hz
1	60	0	100	50	-
2	60,2	0	100	50	-
3	60,5	0	100	50	-
4	61	20	80	40	-
5	<b>61,5</b>	<b>40</b>	60	30	-
6	61,9	56	44	22	-
7	60,2	56	44	22	-
8	60	0	100	50	570

FONTE: O autor (2020).

## 2.6 MATRIZES MULTIDIMENSIONAIS PARA APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO

As técnicas de interpolação são muito úteis na engenharia e na ciência em geral para estimar um valor específico dentro de um intervalo de dados discretos conhecidos, obtidos por amostragem ou por experimentação, e quando se deseja conhecer valores intermediários (BERTOLANI, 2010). No entanto, ainda não existe um método de interpolação específico que possa ser aplicado em qualquer situação sem levar em consideração a dimensão espacial, o tipo de dados amostrados e as propriedades do fenômeno em estudo (CAMPOS, 1994).

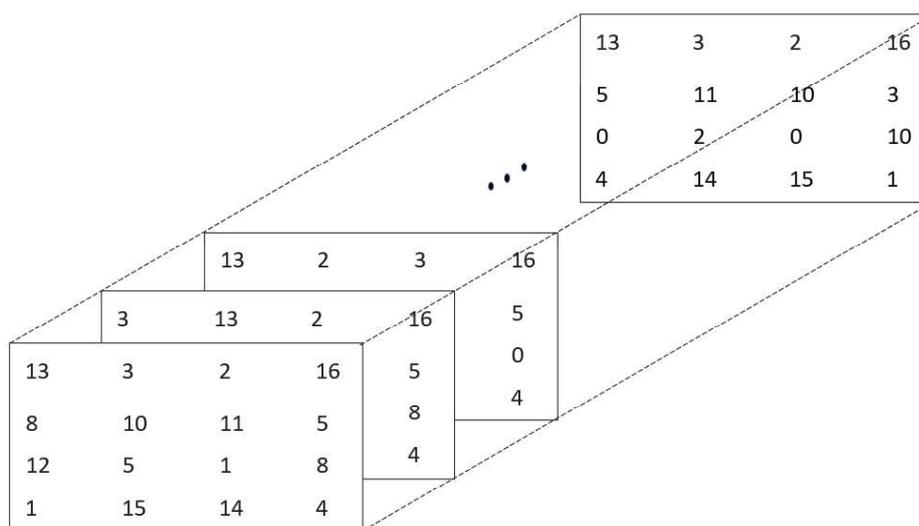
Atualmente existem várias ferramentas computacionais que auxiliam na implementação de métodos de interpolação, encontrando o resultado em um intervalo de tempo bem reduzido, como o *software* Matlab, permitindo a interpolação unidimensional, bidimensional, tridimensional e inclusive a interpolação com variáveis multidimensionais (mais de três variáveis).

Nesse tipo de aplicação, os dados devem ser organizados em forma de matrizes multidimensionais. No entanto, muitas vezes os dados existentes são oriundos de resultados experimentais e não possuem inicialmente as dimensões adequadas para montar as matrizes, necessitando resgatar os conceitos de construção de matriz bidimensional para construir as matrizes multidimensionais.

As matrizes bidimensionais são acessadas usando apenas dois índices (linha e coluna). No caso de matrizes tridimensionais são necessários três índices. Dessa forma, uma matriz com  $n$  dimensões, o número de índices necessários para localizar um elemento específico na matriz deverá ser igual a  $n$  (FARINA; POSSER, 1999).

A Figura 4 mostra uma forma organizada de representar matrizes multidimensionais.

Figura 4 – Forma visual de apresentar uma matriz multidimensional



FONTE: FARINA; POSSER (1999, p.11).

A fim de explicar uma das maneiras de construir matrizes multidimensionais, serão usados como exemplo quatro vetores linha ( $x$ ), ( $y$ ), ( $z$ ) e ( $p$ ) de tamanhos diferentes, os dados devem estar de forma crescente ou decrescente em cada um dos vetores. A dimensão da matriz é dada pela quantidade de argumentos (vetores) conhecidos, neste caso será criada uma matriz de quatro dimensões.

Supondo que os valores dos vetores sejam  $x=[1, 2, 3]$ ,  $y=[4, 5]$ ,  $z=[7]$ ,  $p=[10, 20, 30, 40]$ , então para criar as matrizes contendo os dados nas quatro dimensões é usada a função existente no Matlab chamada de “*ndgrid*”. Essa função recebe os argumentos de entrada, no caso ( $x$ ), ( $y$ ), ( $z$ ), ( $p$ ), convertendo o vetor linha ( $x$ ) em coluna e replicando seus valores até atingir o número de colunas do vetor ( $y$ ), criando assim a matriz bidimensional ( $X$ ). Para o vetor linha ( $y$ ), são replicados seus valores até atingir o número de linhas da matriz ( $X$ ), conseqüentemente criando a matriz bidimensional ( $Y$ ) com o mesmo tamanho da matriz ( $X$ ). A Tabela 6 mostra as duas

matrizes bidimensional (X) e (Y) como parte da construção da matriz de quadro dimensões.

Tabela 6 – Criação das matrizes bidimensional (X) e (Y) como parte da construção da matriz de quatro dimensões

Variáveis (vetores)	$x=[1, 2, 3]$	$y=[4, 5]$												
	Matriz: X	Matriz: Y												
Valores	<table> <tr><td><b>1</b></td><td>1</td></tr> <tr><td><b>2</b></td><td>2</td></tr> <tr><td><b>3</b></td><td>3</td></tr> </table>	<b>1</b>	1	<b>2</b>	2	<b>3</b>	3	<table> <tr><td><b>4</b></td><td><b>5</b></td></tr> <tr><td>4</td><td>5</td></tr> <tr><td>4</td><td>5</td></tr> </table>	<b>4</b>	<b>5</b>	4	5	4	5
<b>1</b>	1													
<b>2</b>	2													
<b>3</b>	3													
<b>4</b>	<b>5</b>													
4	5													
4	5													

FONTE: O autor (2020).

Para representar as matrizes (X) e (Y) nas demais dimensões, são necessárias a contribuições dos vetores (z) e (p), os quais definem a quantidade de vezes que cada matriz deve ser repetida (criar os índices) para conter todas as informações necessárias em cada uma das quatro dimensões. Para isso, ao calcular o produto escalar entre os argumentos que ocupam a posição da terceira ( $z=1$ ) e quarta dimensão ( $p=4$ ), obtém-se como resultado o número de vezes que as matrizes (X) e (Y) serão repetidas para cada dimensão, ou seja, quatro vezes. Além disso, os valores dos vetores (z) e (p) também serão replicados para criar as matrizes (Z) e (P) com as mesmas dimensões que as matrizes (X) e (Y). Assim, constituindo quatro matrizes com quatro dimensões (X), (Y), (Z) e (P), como pode ser visto na Tabela 7 a organização das matrizes contendo todos os dados nas quatro dimensões.

Com as matrizes multidimensionais criadas, a manipulação é equivalente às matrizes bidimensionais, porém deve-se utilizar um número de índices compatível com as dimensões das matrizes para poder acessá-las ao aplicar os métodos de interpolação. No entanto, existem alguns requisitos adicionais para alguns métodos, como é o caso do método de interpolação cúbica “*cubic*” e “*spline*”, que deve possuir pelo menos três pontos de referência em cada dimensão. Além disso, a interpolação cúbica “*cubic*” ainda requer que os dados sejam uniformemente espaçados. Entretanto, existem métodos de interpolação que apresentam como requisito a

existência de apenas dois pontos conhecidos em cada dimensão, como é o caso do método de interpolação linear.

Tabela 7 – Criação da matriz de quatro dimensões

Variáveis (vetores)	x=[1, 2, 3]	y= [4, 5]	z= [7]	p= [10, 20, 30, 40]
	Matriz: X	Matriz: Y	Matriz: Z	Matriz: P
Índice	X(:, :, 1, 1)	Y(:, :, 1, 1)	Z(:, :, 1, 1)	P(:, :, 1, 1)
Valores	1 1 2 2 3 3	4 5 4 5 4 5	7 7 7 7 7 7	10 10 10 10 10 10
Índice	X(:, :, 1, 2)	Y(:, :, 1, 2)	Z(:, :, 1, 2)	P(:, :, 1, 2)
Valores	1 1 2 2 3 3	4 5 4 5 4 5	7 7 7 7 7 7	20 20 20 20 20 20
Índice	X(:, :, 1, 3)	Y(:, :, 1, 3)	Z(:, :, 1, 3)	P(:, :, 1, 3)
Valores	1 1 2 2 3 3	4 5 4 5 4 5	7 7 7 7 7 7	30 30 30 30 30 30
Índice	X(:, :, 1, 4)	Y(:, :, 1, 4)	Z(:, :, 1, 4)	P(:, :, 1, 4)
Valores	1 1 2 2 3 3	4 5 4 5 4 5	7 7 7 7 7 7	40 40 40 40 40 40

FONTE: O autor (2020).

## 2.7 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram apresentados os requisitos normativos para a homologação de inversores usados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede exibidos na NBR 16149. Além disso, foram expostos alguns procedimentos normativos para garantir a qualidade de energia da rede elétrica mostrados pelo PRODIST módulo 8. Também foi apresentado o processo de construção de matrizes para a aplicação da interpolação de variáveis multidimensionais no *software* Matlab.

### 3 REVISAO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 ESTRATÉGIA DE COLETA DE MATERIAIS

Esta etapa teve início com o levantamento de artigos com assuntos relacionados a sistemas fotovoltaicos e qualidade de energia. Em seguida, iniciou-se a coleta de artigos na maior biblioteca virtual de informação científica do mundo, chamada Portal de Periódicos CAPES, concentrando diversos outros portais, como a IEEE.

O Portal de Periódicos CAPES disponibiliza mais de 37.000 títulos de revistas acadêmicas, 126 bases de dados de referência e resumos para levantamento bibliográfico, documentos como capítulos de livros eletrônicos, relatórios, entre outros, disponibilizados pelo Ministério da Educação (MEC). Na pesquisa, o portal de periódicos leva em consideração a ordem do termo de busca, o recurso de relevância, considerando medidas de utilização do texto da citação por usuário em bases de pesquisas em todo o mundo. A metodologia de busca utilizada como referência para a realização do levantamento bibliográfico deste trabalho foi a de seleção de portfólio sugerida por Ensslin, Ensslin e Pinto (2013).

Nas primeiras consultas ao Portal de Periódicos CAPES, foram selecionados artigos que tinham aderência ao tema da referida pesquisa. Em seguida, foram realizadas leituras completas de quatro artigos, com o objetivo de selecionar as palavras-chave condizentes com o tema em questão. Foram obtidas nove palavras-chave, as quais são apresentadas combinadas, como pode ser visto na Tabela 8.

Assim, chegou-se a um total de 26.399 artigos no idioma inglês, revisados por pares nos últimos dez anos. Nesse momento, foi realizada a leitura dos 150 primeiros títulos buscados em cada uma das combinações realizadas, com a exclusão dos que não estavam relacionados ao eixo de pesquisa. Ao final desta etapa, foram selecionados 267 artigos e após a exclusão de artigos repetidos, sobraram 144. Ao realizar a leitura dos resumos, restaram 60 trabalhos, dos quais foram lidas as introduções e conclusões, sendo selecionados 11 artigos para leitura completa.

Tabela 8 – Palavras-chave para a pesquisa de periódicos

PESQUISA	PALAVRAS-CHAVE	ARTIGOS POR PALAVRA-CHAVE
I	Grid-connected photovoltaic + inverter quality	2161
II	Grid-connected photovoltaic + Power quality	4020
III	Grid-connected photovoltaic + Harmonic	1423
IV	Grid-connected photovoltaic + Voltage fluctuation	1167
V	Grid-connected photovoltaic + Voltage Sag	315
VI	Grid-connected photovoltaic + Reactive energy	1795
VII	Grid-connected photovoltaic + Reactive power	1879
VIII	Grid-connected photovoltaic + Inverter behavior	1707
IX	quality photovoltaic inverter + Power quality	3966
X	quality photovoltaic inverter + Harmonic	1243
XI	quality photovoltaic inverter + Voltage fluctuation	848
XII	quality photovoltaic inverter + Voltage Sag	299
XIII	quality photovoltaic inverter + Reactive energy	1371
XIV	quality photovoltaic inverter + Reactive power	1415
XV	quality photovoltaic inverter + Inverter behavior	1997
XVI	quality photovoltaic inverter + Grid tie photovoltaic	212
XVII	grid tie photovoltaic + Power quality	458
XVIII	grid tie photovoltaic + Harmonic	123

FONTE: O autor (2020).

Antes da leitura completa dos artigos, foi realizada a consulta na plataforma Sucupira, em Qualis Periódicos, a fim de conhecer a classificação das revistas nas quais os artigos foram publicados. A classificação pode facilmente ser encontrada no *website* Webqualis, constatando que as revistas têm classificação entre B1, A2 e A1 na área de engenharias IV e III, um não avaliado pelo Qualis/CAPES e um artigo apresentado em uma conferência da IEEE.

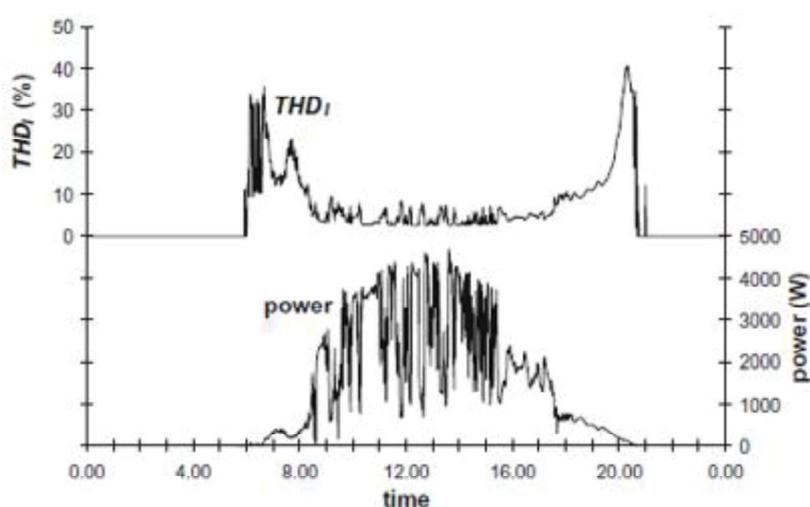
### 3.2 ANÁLISE DA LITERATURA

Esta seção apresenta uma análise dos artigos que mencionam experimentos com aplicações de sistemas fotovoltaicos comerciais conectados à rede elétrica pública, na qual se destacam alguns indicadores de qualidade de energia, como distorções harmônicas de tensão e corrente, flutuações de tensão, variação de frequência e fator de potência. Nesses artigos, são apresentados os padrões normativos locais e internacionais, alguns comparam os resultados de laboratório e em campo, outros somente avaliam os resultados do comportamento dos inversores

e demais componentes utilizados em sistemas fotovoltaicos em campo, comparando os resultados com os valores normativos.

Em trabalho realizado por Chicco, Schlabbach e Spertino (2009), eles analisaram os dados coletados em campo de um sistema fotovoltaico conectado à rede, com potência nominal de 5 kWp, com o intuito de mapear o comportamento do sistema fotovoltaico. As medições em campo mostraram que a distorção harmônica de corrente (THDi) foi cinco vezes maior no início da manhã e final de tarde, momento este em que o inversor está gerando entre 18% e 20% de sua potência nominal, como mostra a Figura 5. Também foi elaborada uma análise estatística para diferentes potências medidas em campo durante quatro dias, a qual deixa clara a relação da distorção harmônica de corrente com a potência gerada pelo sistema fotovoltaico, conforme mostra a Figura 6.

Figura 5 – THDi (curva superior) e potência gerada (curva inferior) no inversor de 5 kW

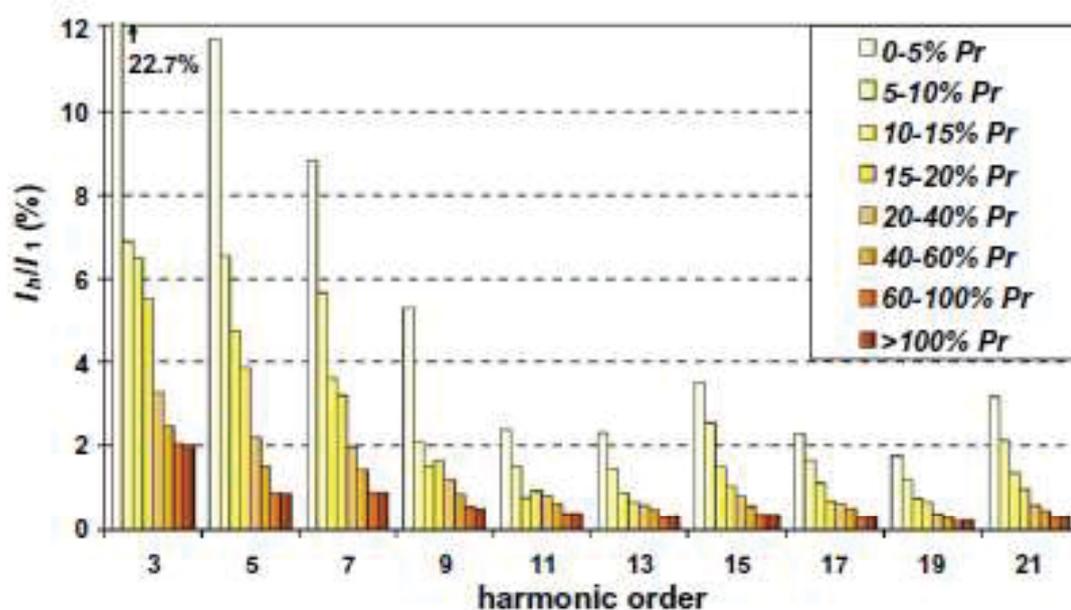


FONTE: CHICCO, SCHLABBACH e SPERTINO (2009).

Em laboratório, Chicco, Schlabbach e Spertino (2009), analisaram o comportamento da THDi do inversor inserindo distorções harmônicas de tensão programada, dentro dos limites normativos. Como resultado, notou-se que as especificações fornecidas pelos fabricantes de inversores fotovoltaicos informam apenas os índices harmônicos de corrente com o inversor operando em condições de potência nominal. No entanto, nos casos observados em campo, o sistema fotovoltaico opera na maior parte do tempo em nível baixo de produção de energia e as correntes harmônicas, em termos percentuais, são 10 vezes maiores em

comparação com o sistema operando em potência nominal, mas em termos absolutos, as correntes harmônicas reduzem com a redução da potência gerada.

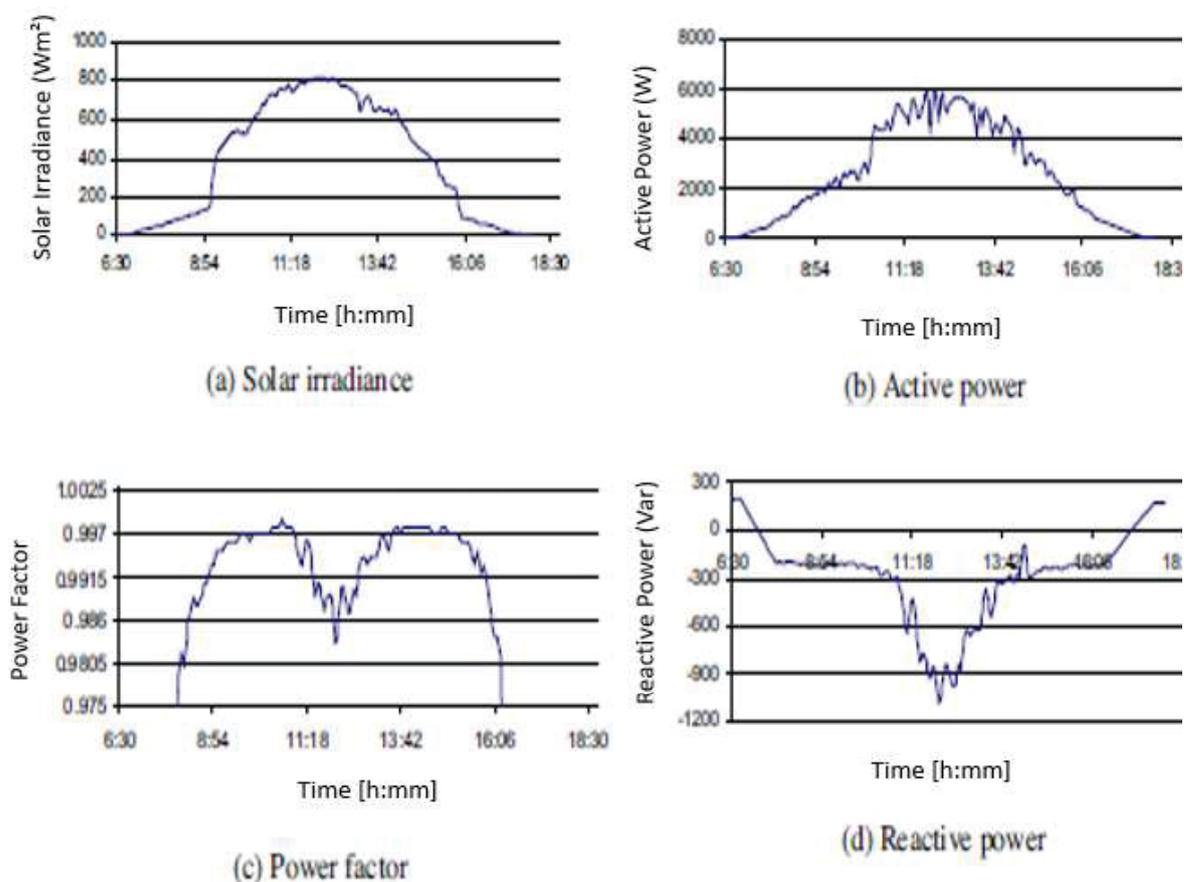
Figura 6 – Correntes harmônicas do inversor fotovoltaico (potência nominal de 5 kW) para diferentes condições de potências medidas em campo, durante 4 dias



FONTE: CHICCO, SCHLABBACH e SPERTINO (2009).

Elkholly *et al.* (2016) fizeram um estudo em campo durante uma semana em um sistema fotovoltaico conectado à rede com o objetivo de observar o efeito da radiação solar e avaliar os parâmetros de qualidade de energia. Segundo os autores, quando a potência ativa injetada na rede é superior a 50% da potência nominal, o inversor consome altos valores de energia reativa para manter o fator de potência dentro dos limites aceitáveis estabelecidos por norma. Isso acontece porque os inversores modernos são capazes de controlar a potência reativa, fornecendo uma melhor compensação nos parâmetros internos do sistema para atender as necessidades da rede de distribuição, indicando que há uma forte relação entre a qualidade de energia injetada na rede e a irradiação solar.

Figura 7 – Gráficos irradiação, potência ativa, fator de potência e potência reativa ao longo de um dia



FONTE: ELKHOLY *et al.* (2016).

Görbe *et al.* (2014) analisaram o funcionamento de uma pequena instalação fotovoltaica de 4 kWp monofásica. Identificaram que o inversor fornece valores elevados de correntes harmônicas, sendo que as correntes de 3<sup>a</sup> e 9<sup>a</sup> ordem são as que mais se destacam, pois, essas componentes se somam no condutor de neutro, podendo fornecer corrente de sequência zero, causando perdas de potência no condutor de fase e neutro. Segundo Görbe *et al.* (2014), o aumento de instalações fotovoltaicas monofásicas requer uma distribuição cuidadosa na rede de distribuição, principalmente dentro da pequena extensão abrangida pelo mesmo transformador de baixa tensão, evitando acionamento irregular dos circuitos de proteção do sistema de distribuição.

Para Görbe *et al.* (2014) e Nemes, Munteanu e Astanei (2016) o fator de potência teve muitas oscilações devido à variação da potência relativa injetada pelo inversor, mas em grande parte do tempo dentro dos limites aceitáveis por norma. Apesar de a distorção harmônica total de tensão (THDv) permanecer sempre abaixo

de 5%, a THDi apresentou alterações frequentes nos períodos de início da manhã e final da tarde, ultrapassando 30%. Nos demais horários do dia oscilou muito devido ao dia nublado com baixa irradiação solar. Com isso, não foi identificada uma relação entre THDv e a irradiação solar. Por outro lado, a THDi apresentou uma forte interferência com a baixa irradiação. No entanto, observa-se que nos momentos de baixa produção de energia, a corrente fundamental é reduzida, conseqüentemente, a proporção da THDi fica em destaque, à medida que a irradiação aumenta, a corrente fundamental aumenta e a THDi diminui.

Anwari *et al.* (2009), realizaram um ensaio em laboratório com dois motores elétricos acionados por um inversor de frequência e com cargas mecânicas variáveis, alimentados por um sistema fotovoltaico conectado à rede da concessionária, com o objetivo de avaliar as distorções harmônicas de corrente. Anwari *et al.* (2009), concluíram que a THDi reduz conforme há um aumento simultâneo da carga mecânica nos motores e o fornecimento de energia proveniente do sistema fotovoltaico.

Em 2015, Pinto, Mariano e Calado (2015), avaliaram o comportamento da tensão em dois sistemas fotovoltaicos conectados à rede em uma zona rural de Portugal ao longo de uma semana de medições. Eles observaram que na primeira instalação apresentou-se valores de tensão dentro dos limites estabelecidos por norma. A segunda instalação, porém, apresentou valores acima de 253 V durante mais de um quarto do dia, sendo considerada inadequada segundo a norma EN 50160.

Para Pinto, Mariano e Calado (2015) e Karimi *et al.* (2016), a presença de sistemas fotovoltaicos ligados em rede pode causar sobretensão com o aumento da penetração de geração distribuída. Além disso, a severidade das flutuações de tensão impostas à rede, perto do ponto de conexão do sistema fotovoltaico, resulta em diminuição na qualidade da energia de tensão. Em trabalho semelhante, Wong *et al.* (2014) realizaram um estudo em um sistema fotovoltaico monofásico com o objetivo de monitorar a qualidade da tensão, identificando que entre o ponto de conexão do inversor e a rede de distribuição ocorreram diversas oscilações de tensão, ultrapassando os limites legais do país, como cintilação (*flickers*) e limite superior da tensão.

Seme *et al.* (2017) realizaram medições de qualidade de energia durante sete dias consecutivos em quatro sistemas fotovoltaicos conectados à rede, produzindo energia em torno de 50% da potência nominal, verificando que as tensões RMS, o

fator de potência e as distorções harmônicas de corrente permaneceram dentro dos limites estabelecidos pelas normas EN 50160 e IEC 61727.

Granja *et al.* (2018) compararam a qualidade da tensão elétrica, do fator de potência e das distorções harmônicas de tensão e corrente antes e depois de instalar um sistema fotovoltaico de 7,8 kWp trifásico conectado à rede. Ao concluir o trabalho, destacaram que houve uma melhora nos níveis de tensão, mas não houve alterações nas distorções harmônicas de tensão e corrente no ponto de conexão entre o inversor e a rede elétrica. Destacaram também que o fator de potência do inversor aumenta proporcionalmente com o aumento da potência relativa, aproximando do valor unitário quando está trabalhando com a potência nominal.

Em trabalho executado por Rampinelli *et al.* (2015), foram realizados testes em laboratório em dez inversores fotovoltaicos conectados à rede, com potências entre 700 W e 3.800 W. Nesse estudo, os autores desenvolveram um modelo matemático que representa o fator de potência e distorção harmônica de corrente em relação à potência de entrada e saída do inversor. As curvas apresentadas pelo modelo matemático mostraram um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) maior que 0,9, indicando uma excelente correlação entre os valores teóricos e os medidos nos inversores.

### 3.3 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, observou-se que muitos trabalhos realizados visam identificar os impactos na qualidade de energia na rede de distribuição elétrica, mas não o comportamento e os impactos provocados no inversor fotovoltaico em condições fora dos padrões determinados nas normas.

Alguns autores alegam que o aumento da penetração de geração distribuída, a maioria com geração intermitente, pode impactar negativamente na qualidade de energia do lado da rede de distribuição de energia elétrica, proporcionando o mal funcionamento e a redução da vida útil das cargas.

Nesse contexto, é de grande importância conhecer o comportamento desses inversores operando em condições distintas das operações ideais da rede elétrica.

## 4 ESTRUTURA E EQUIPAMENTOS PARA ENSAIOS

A seguir, são apresentados alguns detalhes do projeto elétrico do laboratório que será denominado de laboratório de geração distribuída, como também os principais equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

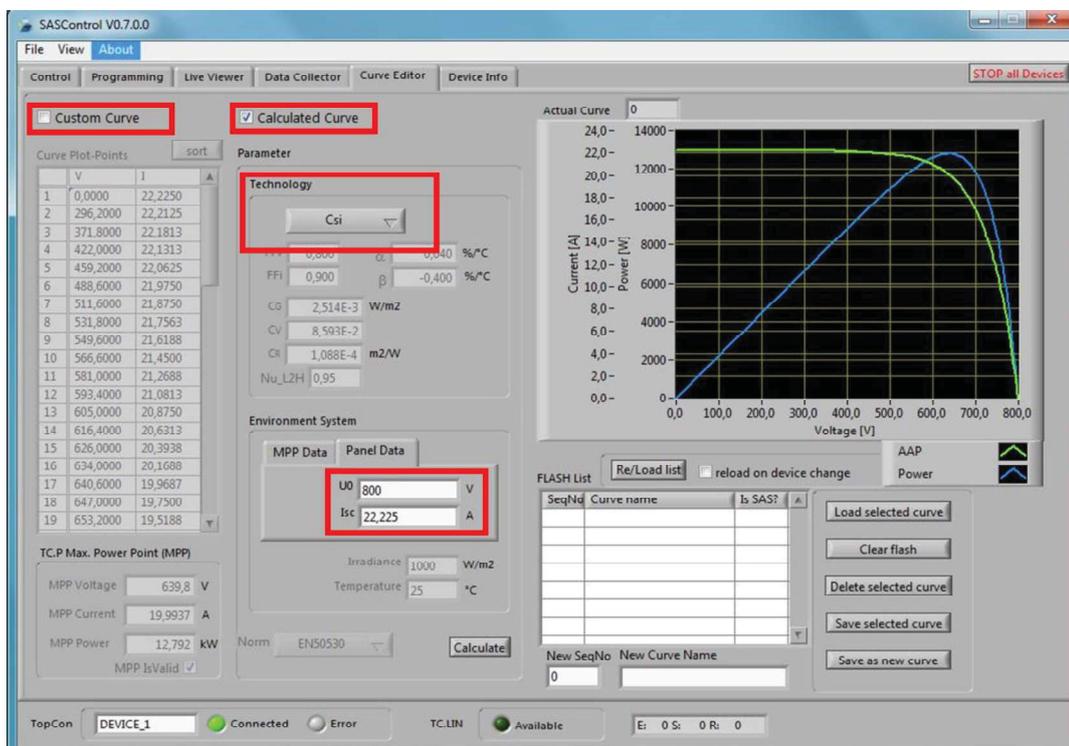
### 4.1 SIMULADOR DE ARRANJOS FOTOVOLTAICOS

Para substituir a função do conjunto de painel fotovoltaico e do sol no sistema de geração fotovoltaica, são utilizadas duas fontes cc do fabricante Regatron no laboratório de geração distribuída. Dependendo do arranjo físico interno entre as fontes, elas podem disponibilizar até 800 Vcc, operando de forma independente ou paralela, e até 1500 Vcc, operando em série. Essas fontes são capazes de simular o funcionamento de arranjos fotovoltaicos para inversores monofásicos e trifásicos de até 32 kWp.

A tela mostrada na Figura 8 permite que o usuário configure o arranjo de módulos de duas maneiras. Na primeira, inserindo valores de tensão e corrente a ser simulada pela fonte. Na segunda, fornecendo as especificações, como tipo de tecnologia do painel, tensão de circuito aberto, corrente de curto circuito, parâmetro de máxima potência (MPPT) e tensão. Com essas informações, o *software* realiza automaticamente o cálculo da curva de relação tensão e corrente para a emulação do arranjo fotovoltaico.

Na emulação de operação do arranjo fotovoltaico, é possível inserir algumas interferências no funcionamento, como alteração de irradiância e aumento ou redução da temperatura para verificar o comportamento na operação do inversor com essas variações de parâmetros.

Figura 8 – Tela de configuração de arranjo fotovoltaico – SAS Control



FONTE: REGATRON (2020).

## 4.2 FONTE DE CORRENTE ALTERNADA REGENERATIVA

Essa fonte é capaz de emular uma rede elétrica alternada monofásica e trifásica de até 30 kVA, permitindo as diversas variações de qualidade de energia, como tensão em regime permanente, regime transitório, harmônicos de tensão, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e variação da frequência, além de injetar e absorver potência de acordo com a necessidade do ensaio. A Tabela 9 apresenta algumas especificações da fonte ca em comparação com os requisitos normativos apresentados pela NBR 16150.

Tabela 9 – Características elétricas da fonte ca e comparativo com a norma

Itens	Especificações e limites requeridos por norma	Especificação da fonte MX 30-3Pi
Tensão (passo mínimo)	0,4% da tensão de ensaio	0,1 V
Tensão de saída	$\pm 2,0\%$	0 @ 300 Vac por fase
Resolução frequência de saída	$\pm 0,1$ Hz	Resolução de 0,01 para freq. de 16 até 81,91 Hz
Erro de defasagem	Máx. permitido $\pm 1,5^\circ$	$< 1,5^\circ$
THD	$< 2,5\%$	$< 0,50\%$ @ 16 – 66 Hz

FONTE: O autor (2020).

Nessa tabela, é possível observar que a norma apresenta o requisito mínimo para variação da tensão em porcentagem da tensão de ensaio. Nesse caso, a fonte existente no laboratório é mais precisa do que especificado por norma. Por exemplo, a norma estabelece que a fonte deve variar a tensão a um passo de 0,4% da tensão de ensaio, então, ao ensaiar um inversor com tensão nominal de 220 volts, a menor tensão de ensaio será de 176 volts (80% da tensão nominal), conseqüentemente, a menor tensão de passo que a fonte deve possuir para atender uma das especificações da norma é de 0,70 volts.

#### 4.3 ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA

O instrumento responsável por medir e registrar os parâmetros de qualidade de energia durante os testes em inversores fotovoltaicos é o analisador Fluke 435 série 1. A Tabela 10 faz a comparação entre os níveis de exatidão exigidos pela NBR 16149, NBR 16150 e os valores disponibilizados pelo manual do fabricante Fluke.

O analisador utilizado atende os métodos de medições estabelecidos pela norma IEC 61000-4-30, com desempenho de medição classe A, ou seja, em virtude dessa classificação, esse equipamento atende as especificações exigidas por norma, apresentando maior precisão. Além disso, o instrumento possui certificado de calibração válido até novembro de 2020, garantindo que os dados medidos estão dentro dos erros e das incertezas toleráveis.

Tabela 10 – Comparação entre os níveis de exatidão exigidos pela NBR 16149 e NBR 16150 e os valores do analisador de energia 435 série 1

Descrição	Exatidão pela norma	Resolução do analisador	Precisão do analisador
Tensão	0,2% da tensão nominal do inversor	0,01 Vrms	±0,1% da tensão nominal
Corrente	1% da corrente nominal do inversor	0,01 Arms	± 1%
Frequência	0,01 Hz	± 0,001 Hz	± 0,01 Hz
Potência	0,5% da potência nominal do inversor	0,1	±1% ± 10 pontos
Fator de potência	0,5%	0,01	±0,03
Componente cc	0,5% da corrente nominal do inversor	0,1%	± 0,1%
Harmônicos de corrente	5% da corrente fundamental	0,1%	± 2,5%
Ângulo de fase da tensão	1°	1°	

FONTE: O autor (2020).

#### 4.4 PROJETO DAS INSTALAÇÕES DO LABORATÓRIO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Para que fosse possível o desenvolvimento deste trabalho, foram especificadas, projetadas e implementadas as instalações elétricas do laboratório de geração distribuída nas dependências da UFPR, *campus* Centro Politécnico, possibilitando, assim, a instalação dos equipamentos adequados na emulação de arranjos fotovoltaicos e da rede elétrica. Nesse contexto, foi necessário conhecer e aplicar os requisitos das normas técnicas e dos equipamentos a serem instalados nesse local, com base nas capacidades, características, classe de isolamento elétrica dos componentes, recomendações dos fabricantes das fontes de corrente alternada e de corrente contínua.

O uso dos equipamentos desse laboratório é possível de três maneiras, as duas primeiras são destinadas para equipamentos acabados, como protótipos ou produtos comerciais. No entanto, ao selecionar a primeira opção a estrutura laboratorial é habilitada para ensaiar os inversores monofásicos, e a segunda para inversores trifásicos, ambas em uma área afastada das bancadas de desenvolvimento. Ao selecionar a terceira opção, essa estrutura é habilitada para realizar testes iniciais na bancada em equipamentos ainda em desenvolvimento, desabilitando os demais pontos de conexão existente no laboratório.

Essas habilitações são feitas de forma automatizada e intuitiva, comandadas por controlador lógico programável (CLP), por meio de interface homem-máquina (IHM), proporcionando maior segurança às pessoas presentes no local. No apêndice A é apresentado o diagrama esquemático do painel elétrico dos equipamentos.

#### 4.5 INVERSOR UTILIZADO NOS ENSAIOS

Para a realização deste trabalho, foi escolhido um inversor comercial usado em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, com tensão nominal de 220 volts, monofásico, fabricado em julho de 2016 com as características apresentadas na Tabela 11. Com essa premissa, garante-se que o inversor já passou pelos ensaios de certificação e homologação, atendendo os requisitos e as tolerâncias estabelecidas por norma e legislação vigentes.

Tabela 11 – Característica de entrada e saída do inversor monofásico ensaiado com a metodologia proposta

<b>Descrição de entrada do inversor</b>	
Potência máxima de arranjo fotovoltaico (cc)	1850 W
Potência máxima cc para cada MPPT	1850 W
Quantidade MPPT	1
Tensão máxima cc	500 V
Faixa de tensão MPPT	120 @ 500V
Tensão nominal	360 V
Tensão de desligamento do inversor	100 V
Topologia	Sem transformador
<b>Descrição de saída do inversor</b>	
Potência nominal (ca)	1600 W
Corrente máxima de saída (ca)	7,8 A
Tensão nominal (ca)	220 V
Frequência da rede	60 Hz
Fator de potência (cos $\phi$ )	> 0,99
Harmônicas de corrente	< 3%

FONTE: Adaptado do manual do fabricante (2016).

Ao observar a ficha técnica do fabricante, mostrada na Tabela 11, o inversor permite que seja instalado um arranjo fotovoltaico de até 1850 Wp. Assim, foi configurado um arranjo fotovoltaico (fonte cc) para fornecer a capacidade máxima de potência que o inversor suporta (1850 Wp) e a fonte ca regenerativa emulando uma

rede elétrica, configurada na tensão de 220 volts e 60 Hz. Foi observado que nessas configurações o inversor injetou 1673 W na rede, o equivalente a 4,56% acima da potência ativa nominal.

A escolha do uso da potência máxima cc que o inversor suporta para realizar os ensaios ocorreu por ser uma prática comum usada por projetistas e integradores de sistemas fotovoltaicos, que dimensionam os arranjos fotovoltaicos no limite superior da capacidade do inversor, otimizando a geração de energia nos períodos de menor incidência solar, como início das manhãs e finais de tardes. Portanto, para os demais ensaios serão usados como referência o valor da potência máxima que o inversor suporta, ou seja, 1850 Wp.

#### 4.6 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram apresentados os principais equipamentos utilizados para a realização dos ensaios em inversores usados em sistema de geração de energia fotovoltaica. Foram abordadas as três opções de uso dos equipamentos existentes no laboratório de geração distribuída e como selecionar cada uma dessas opções. Finalmente, foram apresentadas a escolha do inversor para os demais ensaios deste projeto e a definição de usar a potência máxima (Wp) que o inversor suporta, por ser uma prática comum entre projetistas de sistema fotovoltaico conectado à rede.

A seguir, são apresentados o desenvolvimento e os resultados dos três ensaios realizados para levantamento do perfil das correntes elétricas do inversor, com variação da frequência, tensão e potência e os métodos de interpolação escolhidos para as demais atividades do presente trabalho.

## 5 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ENSAIOS PARA LEVANTAMENTO DO COMPORTAMENTO DAS CORRENTES ELÉTRICAS DO INVERSOR

O levantamento do comportamento das correntes fundamental e harmônicas do inversor tem como objetivo identificar com menor número de ensaios, quais e quantos pontos são necessários para representar bem o comportamento da corrente do inversor em qualquer condição de operação, utilizando métodos de interpolação.

Para levantar o comportamento das correntes elétricas do inversor, foi necessário submetê-lo a vários ensaios elétricos com variações dos parâmetros de tensão eficaz, potência ativa, frequência e distorções harmônicas de tensão, sendo que apenas um desses parâmetros é alterado em cada ensaio e os demais permanecem constantes, respeitando os limites estabelecidos por norma para que o inversor não se desconecte da rede elétrica.

Com o resultado de cada ensaio, foi possível aplicar os métodos de interpolação unidimensional identificando o menor número possível de pontos e quais são esses pontos, capazes de apresentar um erro aceitável para representar o comportamento do inversor ao aplicar o método de interpolação. Tal procedimento possibilitou identificar, também, qual o melhor método de interpolação recomendado para cada situação.

### 5.1 DEFINIÇÃO DOS PONTOS A SEREM ENSAIADOS DO INVERSOR EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA

Para definir os pontos necessários de ensaios que representem o comportamento da corrente do inversor em função da variação da frequência por meio de interpolação, foi necessário realizar 22 ensaios com frequências diferentes para a potência de 100% da capacidade do inversor, e posteriormente repetir estes ensaios para a potência de 50%, conforme determina a NBR 16149.

A Tabela 12 mostra os valores de frequência ensaiados e o fluxograma apresentado na Figura 9, mostra as etapas dos ensaios. Na primeira etapa de ensaios, o inversor foi configurado para operar com potência máxima de entrada, conforme apresentado no capítulo 4.5, e tensão nominal; na segunda etapa de ensaios, o inversor foi configurado para operar com 50% da potência máxima e com tensão nominal. Com o resultado desses ensaios, foi possível verificar como as correntes

fundamental e harmônicas do inversor se comportam em relação à variação da frequência.

Foi constatado que a corrente fundamental varia de forma proporcional a potência, conforme apresentado no capítulo 2.5 deste trabalho ao descrever alguns requisitos da NBR 16149. Considerando que o arranjo fotovoltaico esteja fornecendo uma potência (cc) constante, o inversor deve manter a potência ativa (ca) constante enquanto estiver operando com frequência entre 58 Hz e 60.5 Hz e reduzir a potência ativa linearmente a uma taxa de redução de 40% por Hz entre 60.5 Hz e 61.9 Hz.

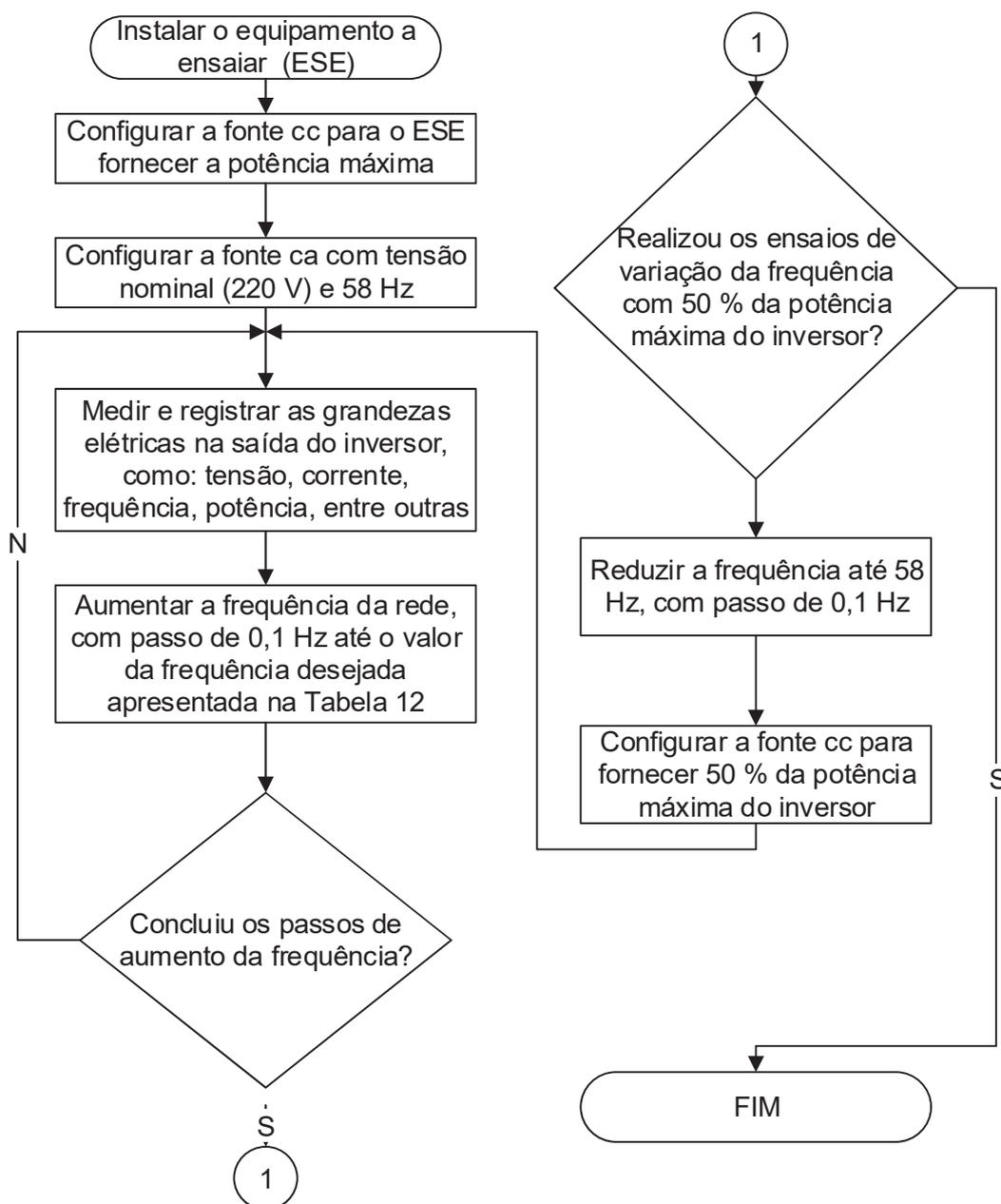
Tabela 12 – Parâmetros de ensaios utilizados na avaliação do comportamento da corrente do inversor em função da variação da frequência

Ensaio	Frequência [Hz]	Potência [Wp]	Tensão [V]
1	58,0	1850  e  925	220
2	59,0		
3	60,0		
4	60,4		
5	60,45		
6	60,5		
7	60,51		
8	60,55		
9	60,6		
10	60,7		
11	60,8		
12	60,9		
13	61,0		
14	61,1		
15	61,2		
16	61,3		
17	61,4		
18	61,5		
19	61,6		
20	61,7		
21	61,8		
22	61,9		

FONTE: O autor (2020).

Durante os primeiros testes no inversor em estudo, foi constatado que ao realizar a redução ou o aumento da frequência com passos superiores a 0,1 Hz, atuava a proteção do inversor fazendo-o se desconectar da rede elétrica. Para evitar que o acionamento indesejado desta proteção, foi estabelecido que o passo de incremento e decremento da frequência seria de 0,1 Hz, como mostra o fluxograma da Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma de ensaios para levantamento do comportamento da corrente fundamental em função da variação da frequência



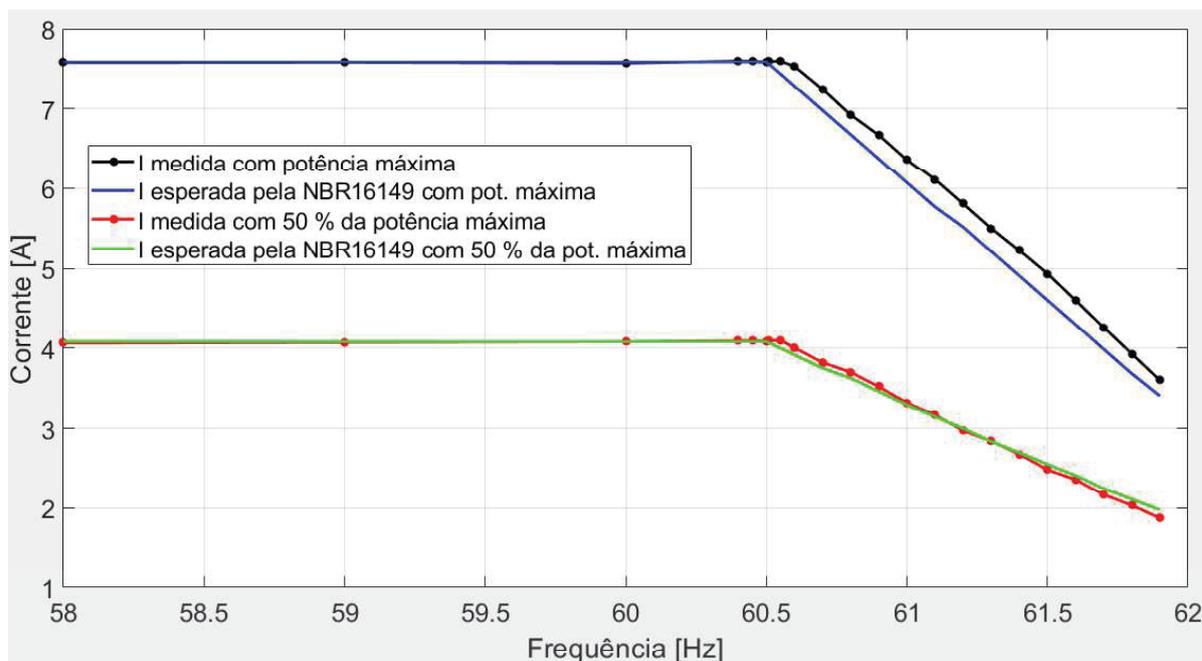
FONTE: O autor (2020).

Para confirmar essa semelhança do comportamento da potência definida por norma com a corrente medida nos ensaios, foi calculada a corrente com base na potência esperada para cada frequência ensaiada, com tensão nominal e fator de potência medida no inversor, que variou entre 0,98 e 1.

O gráfico da Figura 10 mostra a comparação das correntes medidas e esperadas para cada frequência com 50% e 100% da potência máxima fornecida no lado cc do inversor, onde foi constatado que no inversor em estudo a corrente começa

a reduzir a partir de 60,55 Hz, apresentando uma pequena diferença do valor esperado por norma.

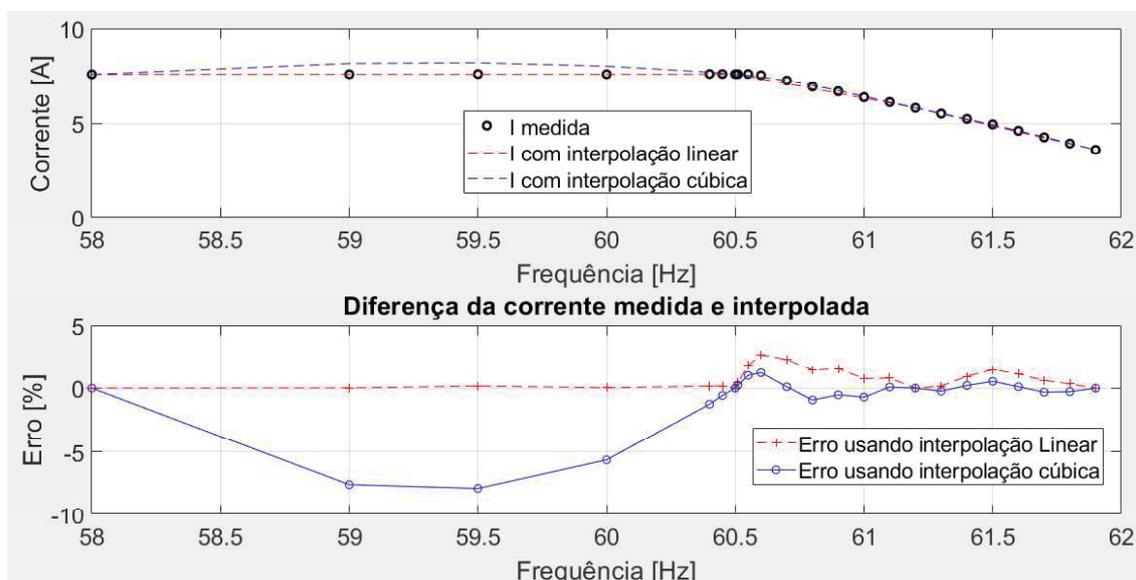
Figura 10 – Corrente fundamental do inversor operando em função da variação da frequência, potência máxima e tensão nominal constantes



FONTE: O autor (2020).

A seguir, foram escolhidos os ensaios nas frequências de 58 Hz, 60,50 Hz, 61,2 Hz e 61,9 Hz para aplicar os métodos de interpolação unidimensional linear e cúbica, comparando com os valores das correntes fundamental e harmônicas medidas nas demais frequências. O método de interpolação que melhor apresentou resultados de aproximação foi o linear. Foi constatado que nas correntes fundamental e harmônica de 3ª ordem os maiores erros apresentados são de 2,65% e 2,98%, respectivamente, como pode ser visto na Figura 11 e Figura 12. Os traços em vermelho e azul mostrados nessas duas figuras são os valores obtidos com a aplicação dos quatro pontos (58, 60,5, 61,2 e 61,9 Hz) escolhidos para a aplicação do método de interpolação, enquanto os pontos na cor preta são os valores obtidos com os resultados dos ensaios feitos.

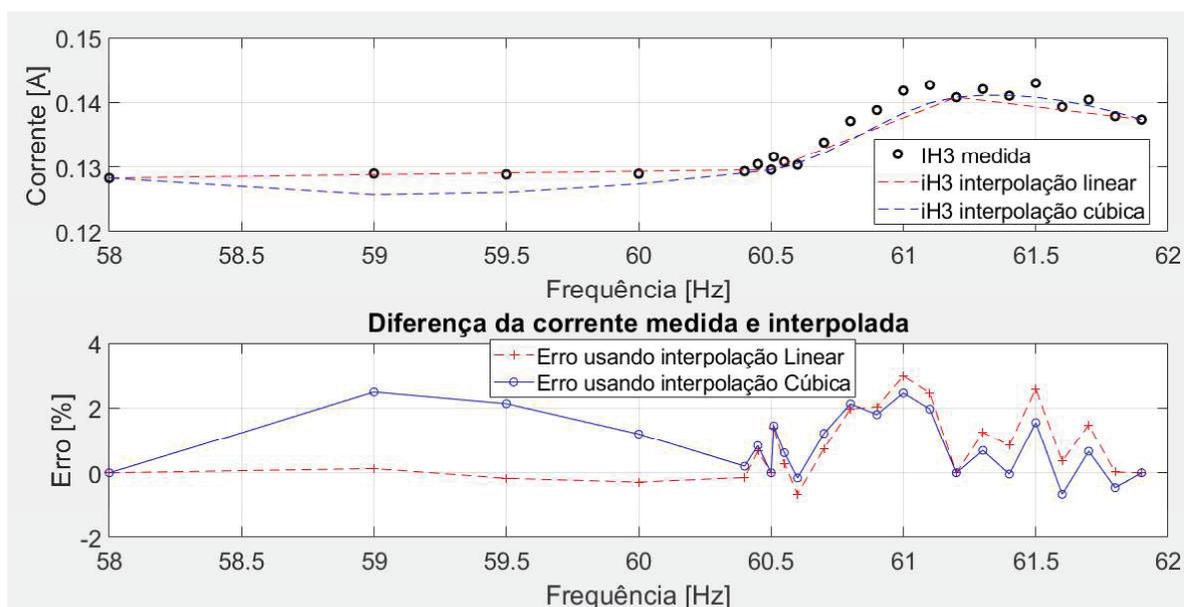
Figura 11 – Comparação da corrente fundamental medida e interpolada em função da variação da frequência



FONTE: O autor (2020).

Nota-se que a partir de 60,5 Hz a harmônica de 3ª ordem começa a aumentar à medida que a potência ativa começa a reduzir em decorrência do controle de potência por sobrefrequência. Apresentando os maiores erros entre os valores medidos e interpolados foram nas frequências de 61 Hz e 61,5 Hz, respectivamente.

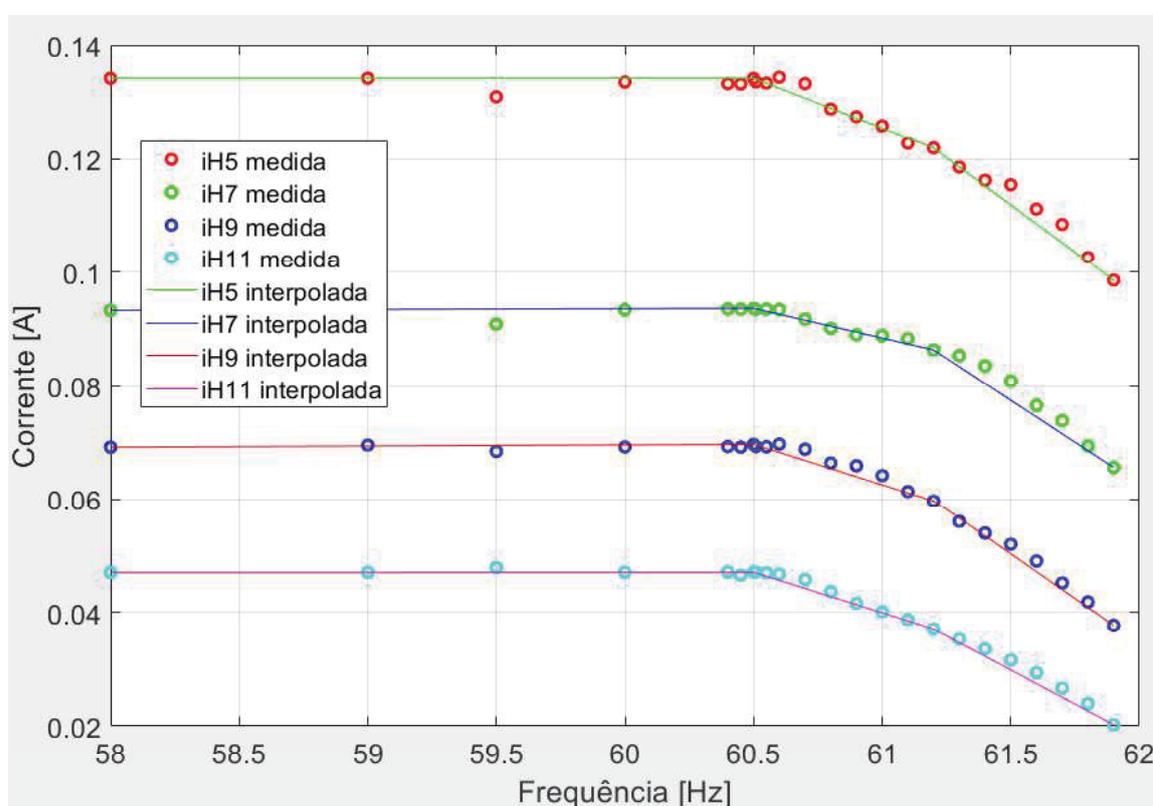
Figura 12 – Comparação da corrente harmônica de 3ª ordem medida e interpolada em função da variação da frequência



FONTE: O autor (2020).

Para correntes harmônicas de 5ª até a 11ª ordem, o método de interpolação linear foi a que obteve, em termos gerais, a melhor aproximação com as correntes medidas, apresentando erros inferiores a 6,54% na harmônica de 11ª ordem. A Figura 13 mostra os pontos medidos das harmônicas de 5ª até a 11ª ordem e a curva da interpolação dessas correntes usando os pontos de 58 Hz, 60,5 Hz, 61,2 Hz e 61,9 Hz. Como pode ser visto nessa figura, as correntes diminuem a partir da frequência 60,5 Hz, tendo comportamento semelhante ao da corrente fundamental.

Figura 13 – Correntes harmônicas medidas e interpoladas do inversor operando com frequência variável, potência máxima e tensão nominal constantes – harmônicas de 5ª até a 11ª ordem



FONTE: O autor (2020).

Outra observação realizada foi referente ao que cada harmônica representa em relação a corrente fundamental na mesma frequência, onde foi identificado que as harmônicas reduzem em números absolutos à medida que a frequência ultrapassa 60,5 Hz, mas percentualmente as harmônicas aumentam. A partir de 60,5 Hz a corrente fundamental começa a reduzir para que o inversor reduza a potência, conseqüentemente as harmônicas de 3ª e 5ª ordem ficam em evidência apresentando distorções de 3,8% e 2,7%, respectivamente, na frequência de 61,9 Hz. Enquanto as demais harmônicas apresentaram distorções inferiores a 1,9% em comparação com

a corrente fundamental, ou seja, as harmônicas praticamente permaneceram constantes.

Com os resultados obtidos, buscou-se definir os pontos de ensaio para reduzir o erro, diversas possibilidades foram testadas e os pontos propostos que apresentaram um erro aceitável com apenas quatro pontos de frequências ensaiadas foram, 58 Hz, 60,5 Hz, 61,2 Hz e 61,9 Hz. Foi definido também o uso da interpolação linear para estimar o comportamento da corrente fundamental e das harmônicas de 3ª a 11ª ordem, pois apresentaram em termos gerais, a menor taxa de erro usando estes quatro pontos de interpolação.

## 5.2 DEFINIÇÃO DOS PONTOS A SEREM ENSAIADOS DO INVERSOR EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA TENSÃO

Para definir os pontos necessários de ensaios que representem o comportamento da corrente do inversor em função da variação da tensão por meio de interpolação, foram realizados inicialmente 14 ensaios de diferentes tensões para três valores distintos de potência, com o objetivo de identificar se há saturação da corrente quando o inversor está operando em alta potência e com baixa tensão.

A Tabela 13 mostra os valores de tensão, potência e frequência em que esses ensaios foram realizados, seguindo o fluxograma apresentado na Figura 14. Os limites inferior e superior da tensão foram definidos por critério estabelecido pela NBR 16149 e descrito no capítulo 2.5 do referido trabalho.

Na 1ª etapa, o inversor foi configurado para operar com potência máxima de entrada e frequência de 60 Hz; na 2ª etapa, o inversor foi configurado para operar com 83% da potência máxima e frequência de 60 Hz e na 3ª etapa o inversor foi configurado para operar com 75% da potência máxima e frequência de 60 Hz. Com o resultado desses ensaios, foi possível verificar como as correntes fundamental e harmônicas do inversor se comportam com a variação da tensão.

Tabela 13 – Parâmetros de ensaios utilizados na avaliação do comportamento da corrente do inversor em função da variação da tensão

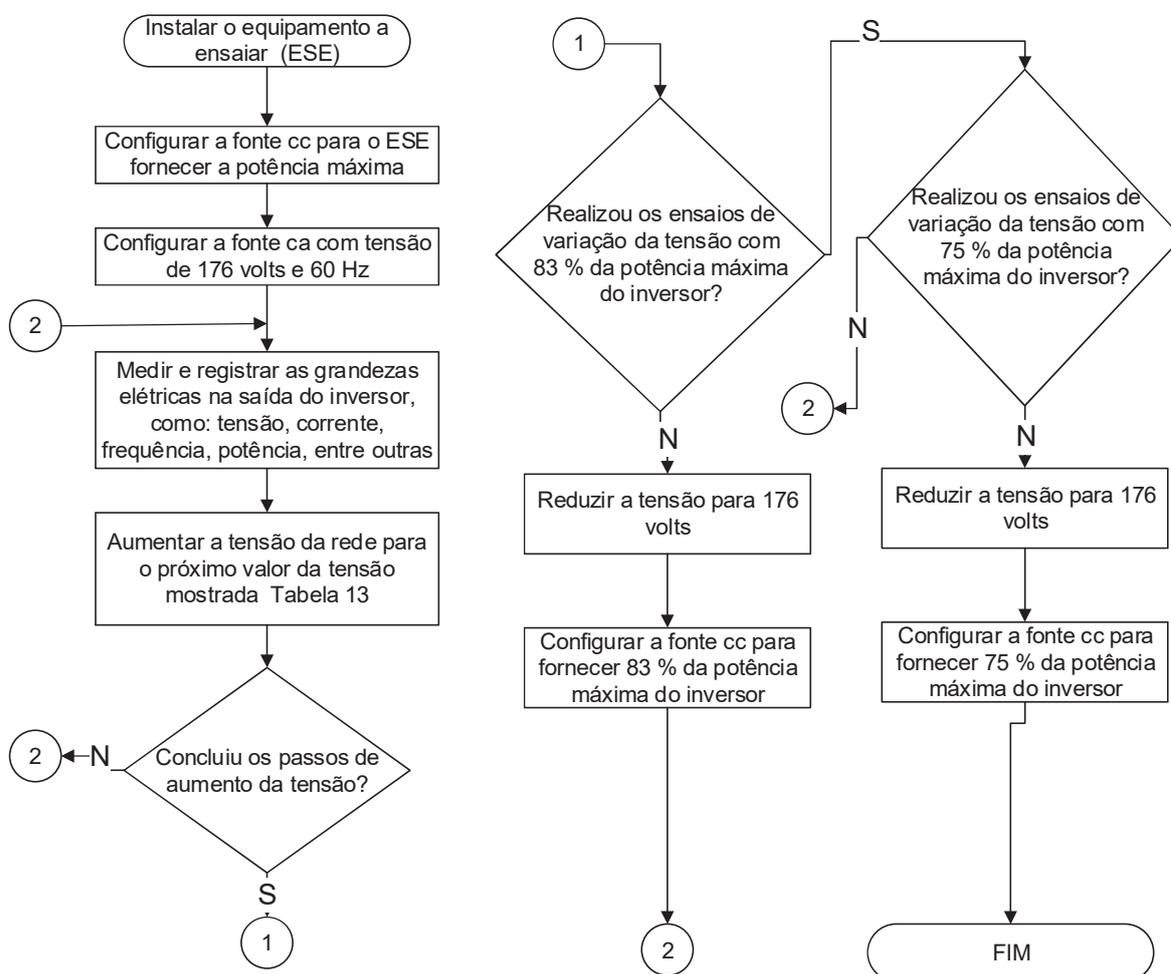
Ensaio	Tensão [V]	Porcentagem da tensão nominal [%]	Potência [Wp]	Porcentagem da potência máxima [%]	Frequência [Hz]
1	176	80	1850	100	60
2	180	81,82			
3	185	84,09			
4	190	86,36			
5	195	88,63	1535,5	83	
6	200	90,91			
7	205	93,18			
8	210	95,45	e	e	
9	215	97,72			
10	220	100	1387,5	75	
11	225	102,27			
12	230	104,54			
13	235	106,82			
14	240	109,1			

FONTE: O autor (2020).

Ao final desses ensaios, foi constatado que quando o inversor opera com as configurações de 75% e 83% da potência máxima, a corrente fundamental reduz linearmente à medida que a tensão aumenta. No entanto, quando os ensaios foram feitos com 100 % da potência máxima, a corrente fundamental permaneceu saturada em aproximadamente 8,4 amperes (8,29% acima da corrente máxima estabelecida pelo fabricante do inversor) até realizar o ensaio com a tensão de 200 volts.

A corrente fundamental começou a reduzir e apresentar um comportamento linear somente quando iniciaram os ensaios com tensões acima de 200 volts, como pode ser visto na Figura 15 o comportamento da corrente fundamental em função da variação da tensão com 75%, 83% e 100% da potência máxima que o inversor suporta. Também é possível observar no ensaio com 83% da potência que a corrente ficou bem próxima do valor de saturação, com tensão de 176 volts, ou seja, para potências superiores a 83 % da sua capacidade máxima e com tensões entre 176 e 199 volts poderá ocorrer a saturação da corrente fundamental deste inversor.

Figura 14 – Fluxograma de ensaios para levantamento do comportamento da corrente fundamental em função da variação da tensão



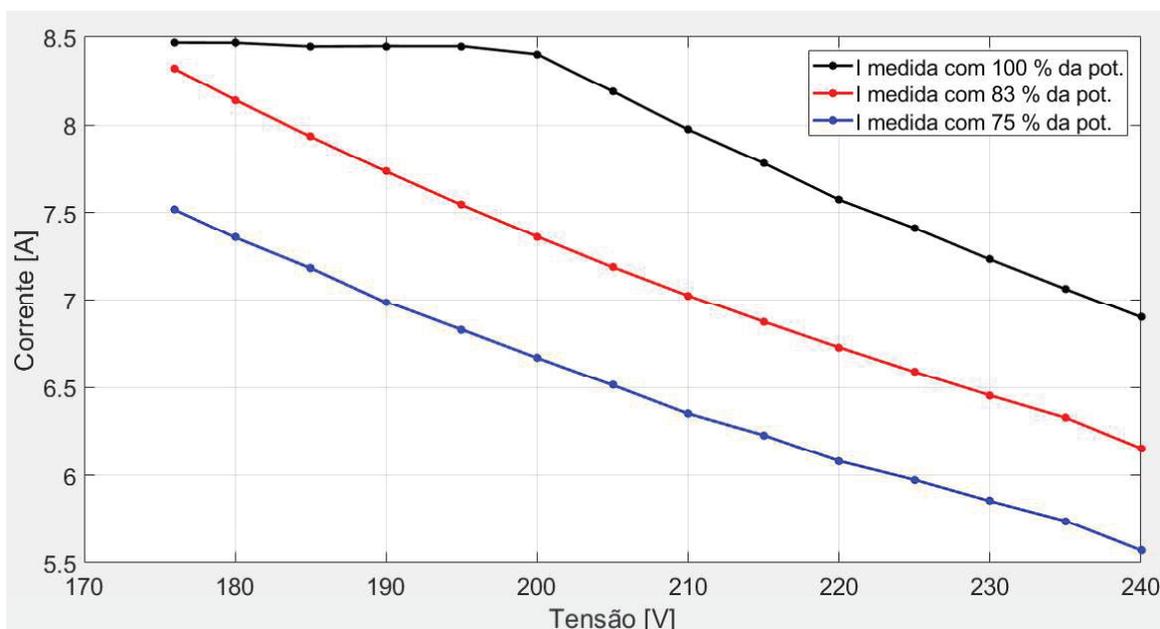
FONTE: O autor (2020).

Essa saturação da corrente ocorre devido ao inversor estar operando com potência máxima na entrada (cc). A cada decremento na tensão da rede, o inversor tenta manter a potência na saída (ca) constante, aumentando a corrente até atingir o ponto de saturação. À medida que a tensão continua reduzindo, o fator de potência se mantém unitário e a corrente permanece saturada, o inversor não consegue manter na saída a potência constante devido à limitação da corrente e consequentemente o inversor deixa de aproveitar toda a potência que poderia ser fornecida, deixando de operar no ponto de máxima potência.

Os gráficos da Figura 16 mostram o comportamento da corrente e da potência ativa em função da variação da tensão, tanto na região em que a corrente está saturada quanto nas demais regiões. Nessa figura também é possível observar que nas tensões acima de 200 volts a corrente teve uma leve redução de 32 W, mas em

comparação ao nível de potência, pode-se dizer que ela se manteve praticamente constante.

Figura 15 – Gráfico das correntes fundamentais do inversor operando com tensão variável nas potências 75%, 83% e 100 % e com frequência de 60 Hz



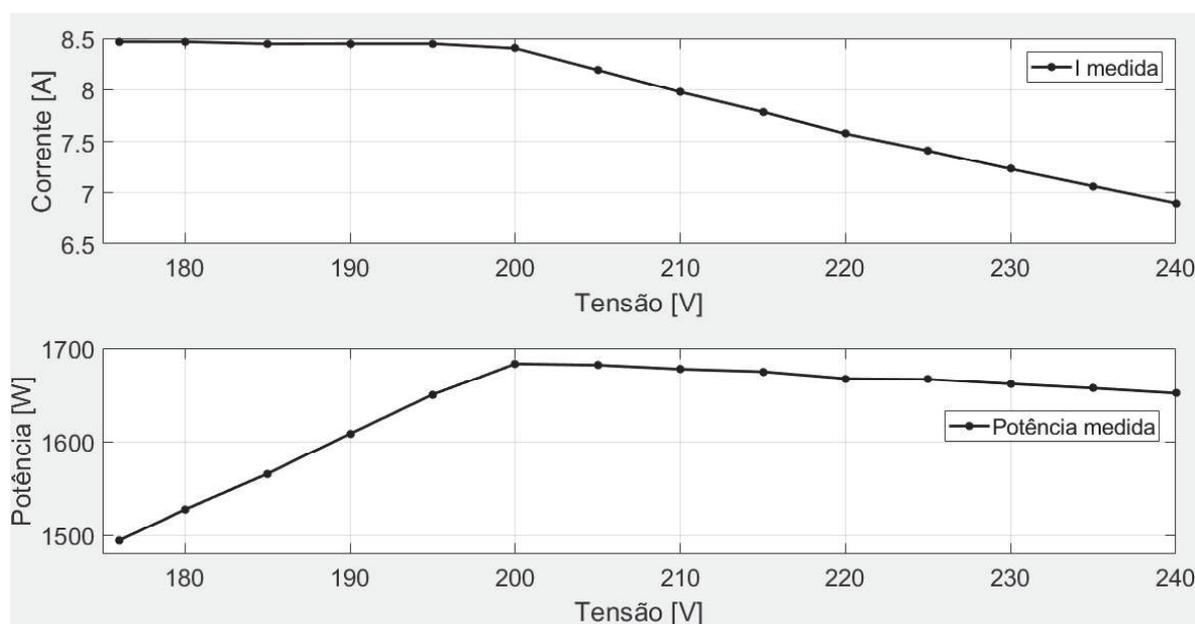
FONTE: O autor (2020).

Para identificar em qual tensão o inversor limita a corrente, foram realizados novos ensaios com a potência máxima, incluindo aos ensaios outros níveis de tensão, totalizando 47 pontos diferentes de níveis de tensão, onde foi constatado que a corrente satura em 8,447 amperes na tensão de 199 volts.

Para contornar a limitação do inversor devido à saturação da corrente, fez-se necessária a realização de uma extrapolação linear. O objetivo dessa extrapolação é garantir que a interpolação represente a corrente mais próxima do valor real nas tensões que a corrente satura e com potências acima de 83% da nominal. Caso o valor apresentado na interpolação seja superior ao valor saturado, a corrente assumirá o valor saturado como resultado.

Caso não fosse utilizada a corrente extrapolada ao aplicar o método de interpolação, a corrente interpolada não representaria os valores corretos, pois a corrente saturada provocaria um erro muito grande quando o inversor fosse operar nessa região.

Figura 16 – Corrente fundamental do inversor operando com tensão variável, com potência nominal e com frequência de 60 Hz



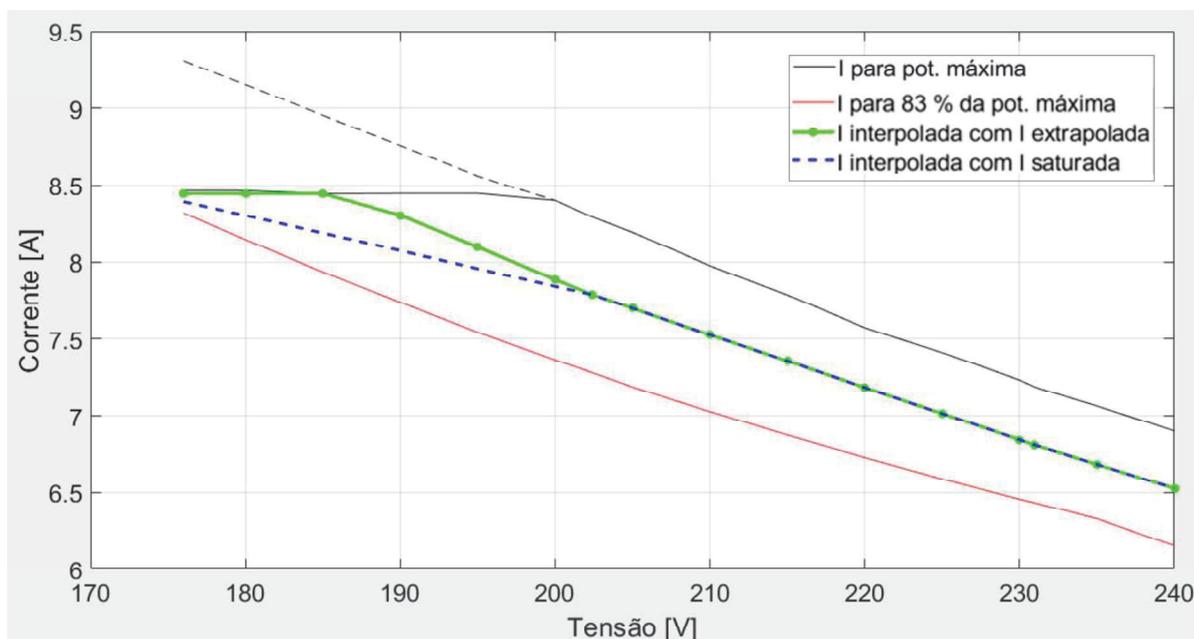
FONTE: O Autor (2020).

A Figura 17 mostra um exemplo da necessidade de usar a extrapolação ao realizar a interpolação da corrente com o inversor operando com 91,5% da potência máxima, com tensão entre 176 e 240 volts, evidenciando a diferença dos valores de corrente interpolada ao usar a corrente saturada e extrapolada na estimativa do comportamento da corrente.

Após encontrar uma solução para realizar a interpolação quando há a saturação da corrente para quando o inversor operar com potência próxima de sua capacidade máxima com tensão baixa, foram escolhidos os ensaios nas tensões 176 volts, 202,4 volts, 220 volts, 239 volts e 240 volts para aplicar os métodos de interpolação linear e cúbica e comparar com os valores de corrente fundamental e harmônicas medidas na demais tensões.

O método de interpolação que melhor apresentou resultados de aproximação foi o linear para a corrente fundamental, apresentando erro médio de 0,7%, enquanto a interpolação cúbica o erro médio obtido foi de 0,87%. Para a harmônica de 3ª ordem a melhor aproximação obtida foi com a interpolação cúbica, apresentando erro médio de 1,79%, enquanto a interpolação linear o erro médio foi de 1,88%, como pode ser visto na Figura 18 e Figura 19.

Figura 17 – Gráfico comparativo da corrente interpolada em 91,5% da potência nominal com as correntes saturada e extrapolada, operando com tensão variável e frequência de 60 Hz



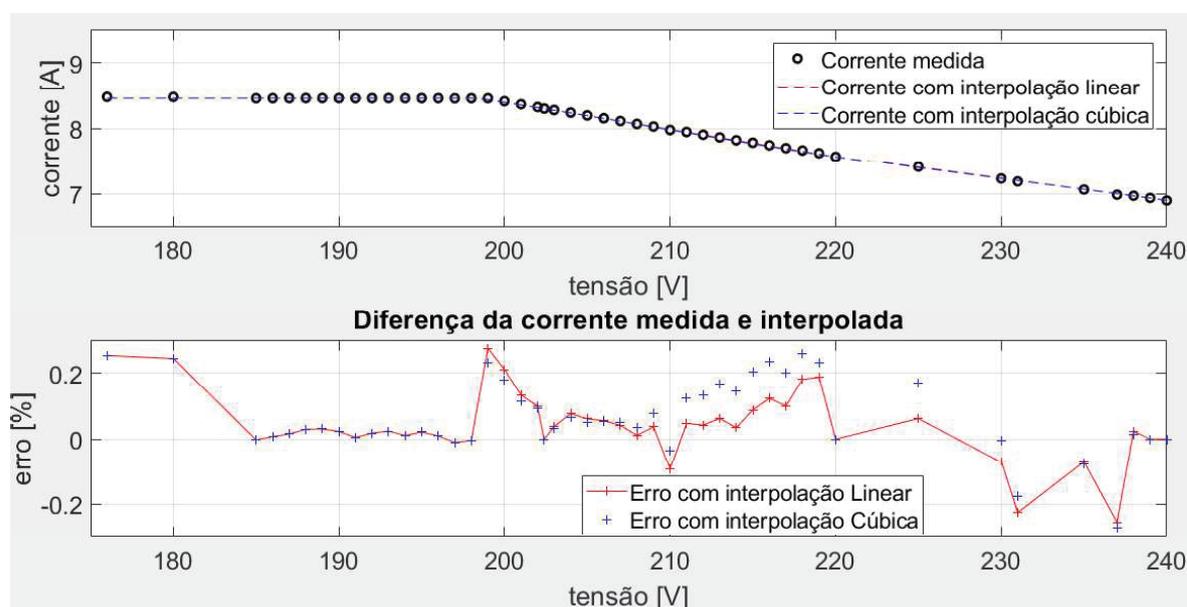
FONTE: O autor (2020).

Os traços em vermelho e azul mostrados nessas duas figuras são os valores obtidos com a aplicação dos cinco pontos de tensão escolhidos para a aplicação do método de interpolação, enquanto os pontos na cor preta são os valores obtidos com os resultados dos ensaios feitos.

É importante ressaltar que apesar das correntes fundamental e harmônicas possuírem os comportamentos bem definidos, foi observado que entre as tensões de 239 volts e 240 volts as correntes harmônicas de 3ª até a 11ª ordem apresentam uma variação bem abrupta e diferente em relação aos demais pontos ensaiados. Portanto, necessitando que estes dois pontos de tensão sejam incorporados como pontos de interpolação. Essa variação abrupta do comportamento das correntes harmônicas de 3ª a 11ª ordem podem ser observadas na Figura 19 e na Figura 20.

Ao analisar a Figura 19, percebe-se que a corrente harmônica de 3ª ordem diminui à medida que a tensão de ensaio aumenta, também é possível verificar que na região em que a corrente fundamental está saturada a corrente harmônica de 3ª ordem tem maior variação, como também entre as tensões de 239 volts e 240 volts. O mesmo acontece com as demais correntes harmônicas em todas as regiões, como mostra a Figura 20.

Figura 18 – Comparação da corrente fundamental medida e interpolada em função da variação da tensão, com potência máxima e frequência de 60 Hz



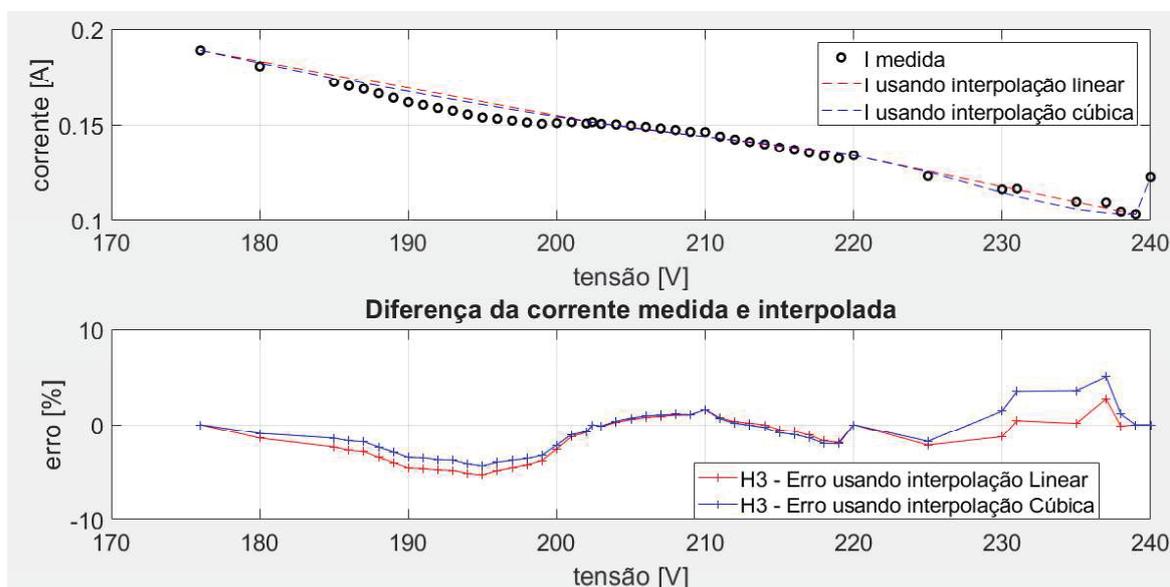
FONTE: O autor (2020).

Para correntes harmônicas de 5<sup>a</sup> até a 11<sup>a</sup> ordem, o método de interpolação linear também foi a que obteve, em termos gerais, a melhor aproximação com as correntes medidas nas demais tensões, apresentando erros inferiores a 5,63%. A Figura 20 mostra os pontos medidos das harmônicas de 5<sup>a</sup> até a 11<sup>a</sup> ordem e a curva da interpolação dessas correntes.

Outra observação realizada foi referente ao que cada harmônica representa em relação a corrente fundamental na mesma tensão, onde foi identificado que as harmônicas reduzem em valores absolutos e em porcentagem à medida que a tensão aumenta, as harmônicas praticamente permanecem constantes, apresentando distorções inferiores a 2,3% entre as tensões de 176 volts e 239 volts.

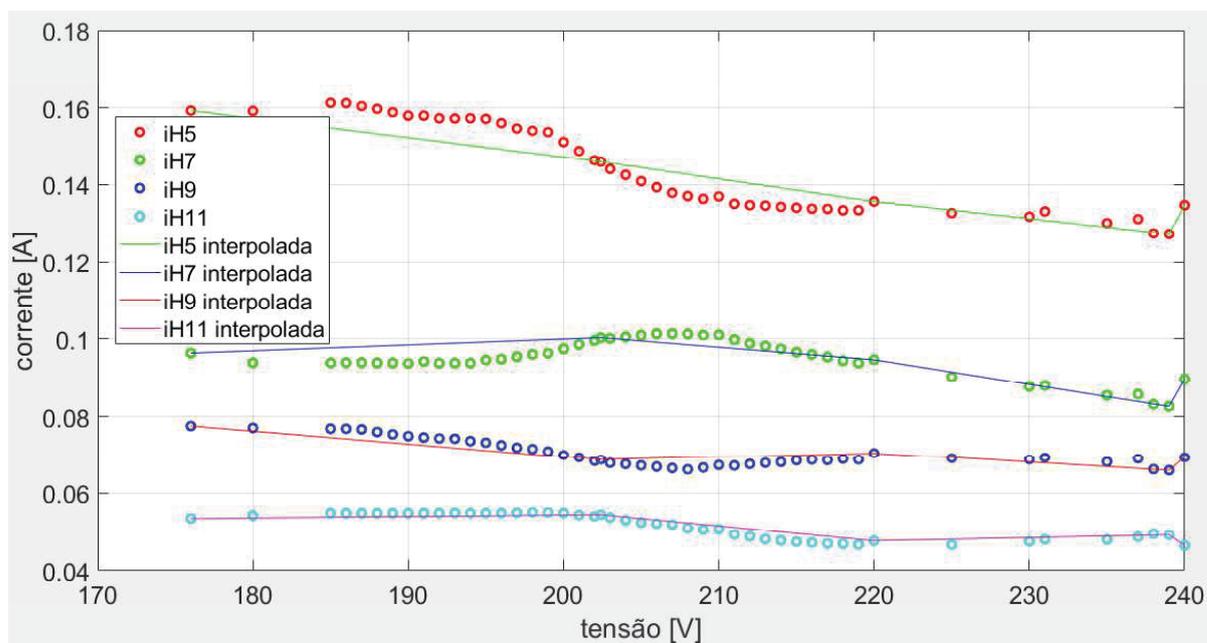
Com os resultados obtidos, buscou-se definir os pontos de ensaios para reduzir o erro, diversas possibilidades foram testadas e os pontos propostos que apresentaram um erro aceitável com apenas cinco pontos de tensão ensaiados foram as tensões de 176 volts, 220 volts, 239 volts e 240 volts. Foi definido também o uso da interpolação linear para estimar o comportamento da corrente fundamental e das harmônicas de 3<sup>a</sup> à 11<sup>a</sup> ordem, por apresentarem em termos gerais, a menor taxa de erro usando estes cinco pontos de interpolação.

Figura 19 – Comparação da corrente harmônica de 3ª ordem medida e interpolada em função da variação da tensão, com potência máxima e frequência de 60 Hz



FONTE: O autor (2020).

Figura 20 – Gráfico das correntes harmônicas medidas e interpoladas do inversor operando com tensão variável, potência máxima e frequência de 60 Hz – harmônicas de 5ª até a 11ª ordem



FONTE: O autor (2020).

### 5.3 DEFINIÇÃO DOS PONTOS A SEREM ENSAIADOS DO INVERSOR EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA POTÊNCIA

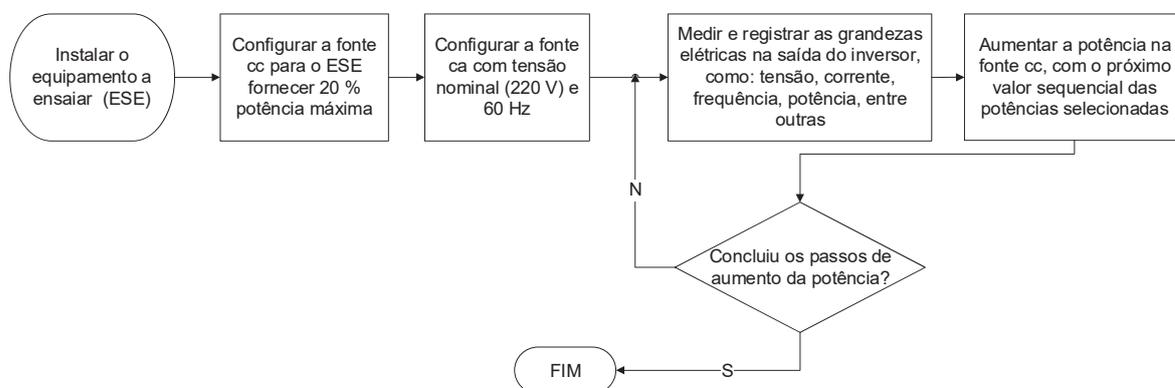
Para definir os pontos necessários de ensaios que representem o comportamento da corrente do inversor em função da variação da potência por meio de interpolação, foram realizados inicialmente 17 ensaios de diferentes potências, conforme mostra a Tabela 14, seguindo o fluxograma apresentado na Figura 21. O valor inicial de 20% da potência máxima foi definido levando em consideração o texto da NBR 16149 apresentado no capítulo 2.5 deste trabalho, em que define a obrigatoriedade de o inversor operar com fator de potência unitário com tolerância de 0,98 indutivo ou capacitivo quando estiver injetando potência acima de 20% da potência nominal. Além disso, para potências inferiores a corrente fundamental também é muito baixa, tornando as distorções harmônicas de corrente muito expressivas em termos percentuais.

Tabela 14 – Parâmetros de ensaios utilizados na avaliação do comportamento da corrente do inversor em função da variação da potência

Ensaio	Potência equivalente da potência máxima [%]	Frequência [Hz]	Tensão [V]
1	20	60	220
2	25		
3	30		
4	35		
5	40		
6	45		
7	50		
8	55		
9	60		
10	65		
11	70		
12	75		
13	80		
14	85		
15	90		
16	95		
17	100		

FONTE: O autor (2020).

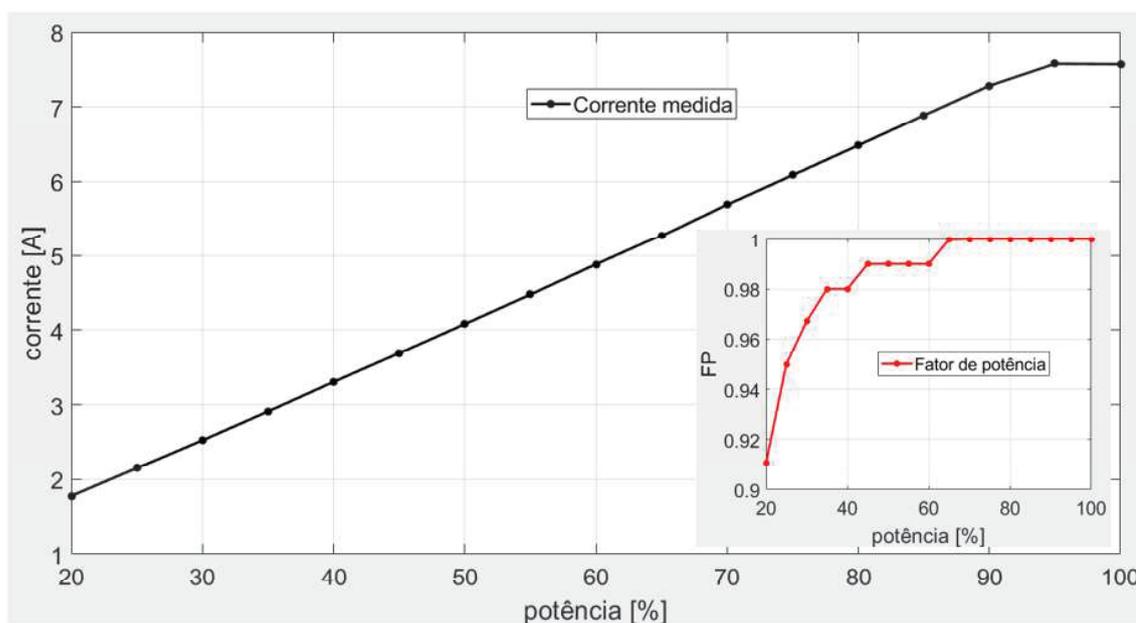
Figura 21 – Fluxograma de ensaios para levantamento do comportamento da corrente fundamental em função da variação da potência



FONTE: O autor (2020).

Com o resultado desse ensaio, foi possível verificar que a corrente fundamental aumenta linearmente à medida que a potência aumenta. No entanto, foi constatado que o inversor ensaiado opera com fator de potência abaixo do estabelecido por norma nas potências inferiores a 35% de sua capacidade máxima, como pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 – Gráfico da corrente fundamental e do fator de potência com o inversor operando em função da variação da potência, tensão nominal e frequência de 60 Hz

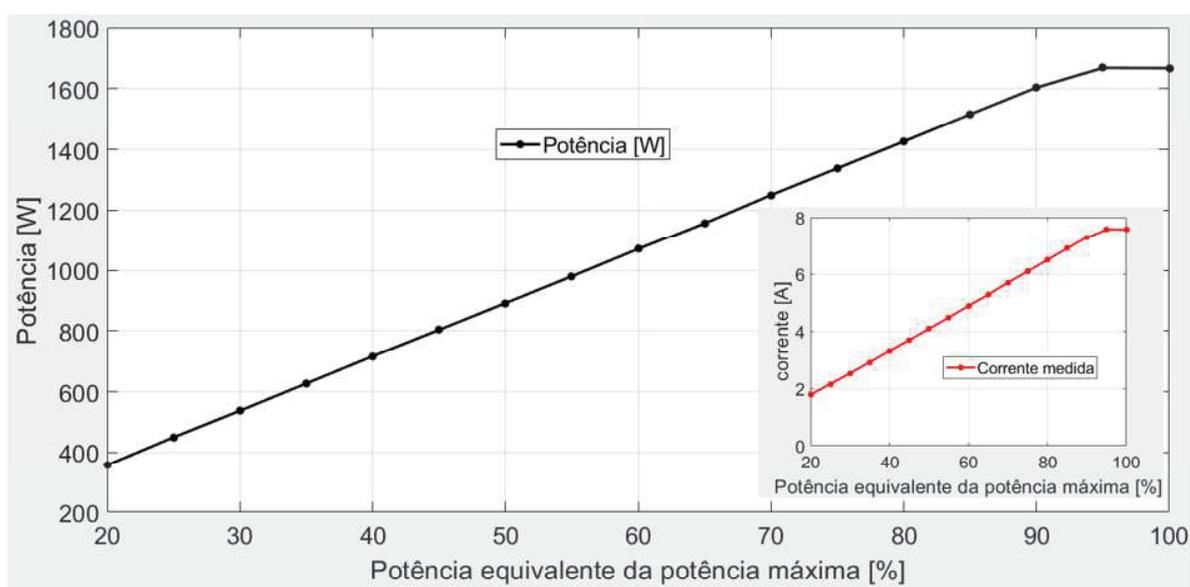


FONTE: O autor (2020).

A Figura 23 mostra que o inversor chegou em sua potência nominal (ca) quando o arranjo fotovoltaico (fonte cc) fornece 90% de sua capacidade máxima e limitou a potência ca ao atingir 95%, operando com a rede configurada em 220 volts e frequência de 60 Hz. Ao comparar os resultados deste item com os resultados apresentados nos ensaios em função da variação da tensão (capítulo 5.2), percebe-se que corrente fundamental não está saturada. Também foi verificado que os valores apresentados para as correntes fundamental e harmônicas são os mesmos, tanto para as potências equivalentes de 95 % quanto para 100 % de sua capacidade máxima. Diante disto, conclui-se que apesar da potência máxima, especificada pelo fabricante, o inversor só consegue operar com 95 % da potência máxima.

Apesar do comportamento linear das correntes harmônicas em função da potência apresentadas na Figura 25 e na Figura 26, foi necessária a utilização de 5 pontos diferentes de potência, devido ao comportamento das correntes harmônicas quando o inversor está operando com potências inferiores a 40 % de sua capacidade máxima.

Figura 23 – Gráfico da potência e da corrente fundamental com o inversor operando em função da variação da potência, tensão nominal e frequência de 60 Hz



FONTE: O autor (2020).

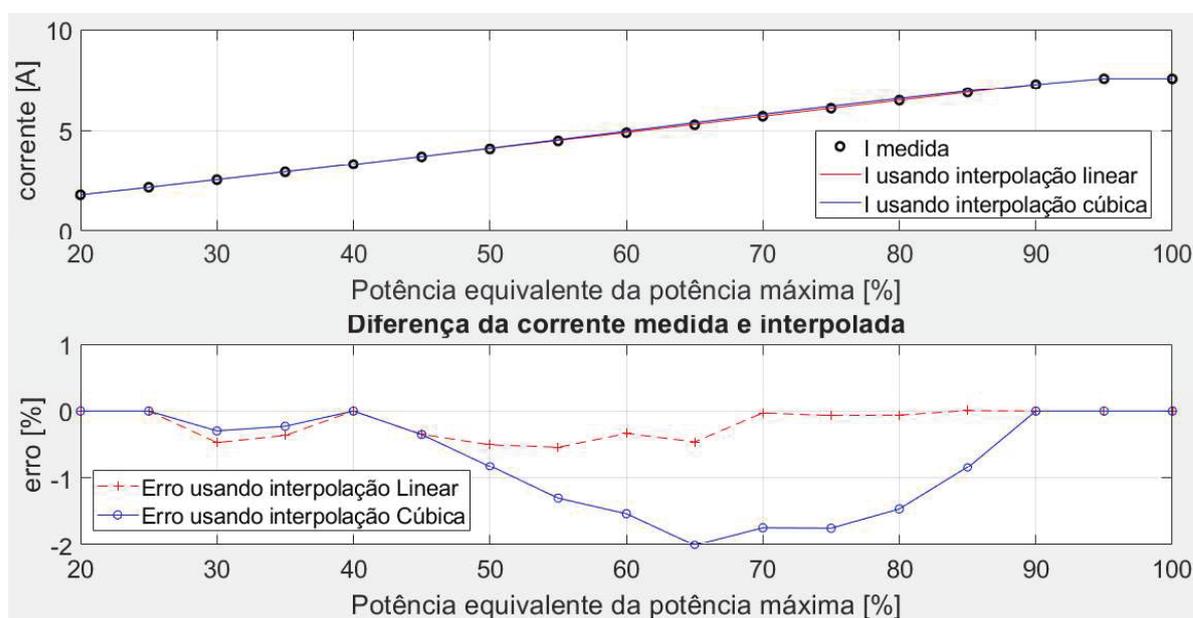
Diante disto, foram escolhidos os ensaios nas potências equivalentes a 20%, 25%, 40%, 90% e 95% da capacidade máxima do inversor para aplicar os métodos de interpolação linear e cúbica, comparando com os valores de corrente fundamental e harmônicas medidas na demais potências. Foram constatados que as correntes

fundamental e harmônica de 3ª ordem, a melhor aproximação obtida, em termos gerais, foi a interpolação linear, com erro de 0,73% e 3,38%, respectivamente, como pode ser visto na Figura 24 e Figura 25.

Para correntes harmônicas de 5ª até a 11ª ordem, o método de interpolação linear também foi o que obteve, em termos gerais, a melhor aproximação com as correntes medidas nas demais potências, apresentando erro na 11ª harmônica, enquanto os demais erros foram inferiores a 6,58%, ou seja, os maiores erros apresentados foram na harmônica de 11ª ordem, nas potências de 30 % e 55 % de sua capacidade máxima com 14,15 % e 7,78 %, respectivamente.

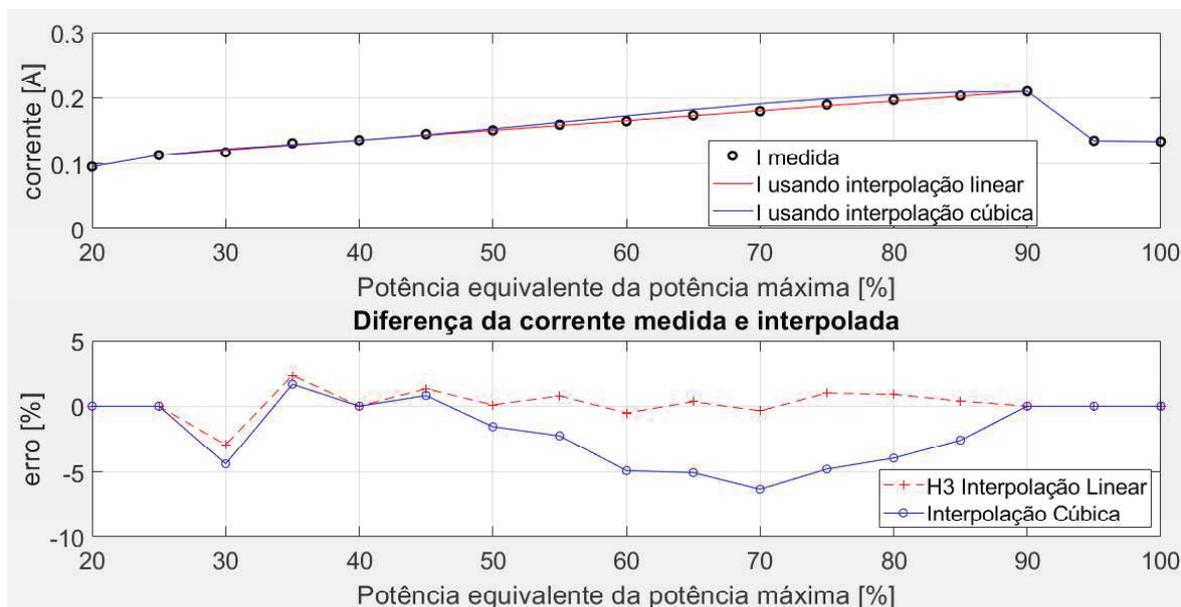
Exclusivamente, para este caso, o método de interpolação cúbica apresentou erros inferiores do que o linear, no entanto, como o método de interpolação linear apresentou melhores resultados apresentados nos capítulos 5.1 e 5.2, deve-se manter o mesmo método de interpolação definidos nos capítulos anteriores, ou seja, o método de interpolação linear.

Figura 24 – Comparação da corrente fundamental medida e interpolada em função da variação da potência, com tensão e frequência constantes



FONTE: O autor (2020).

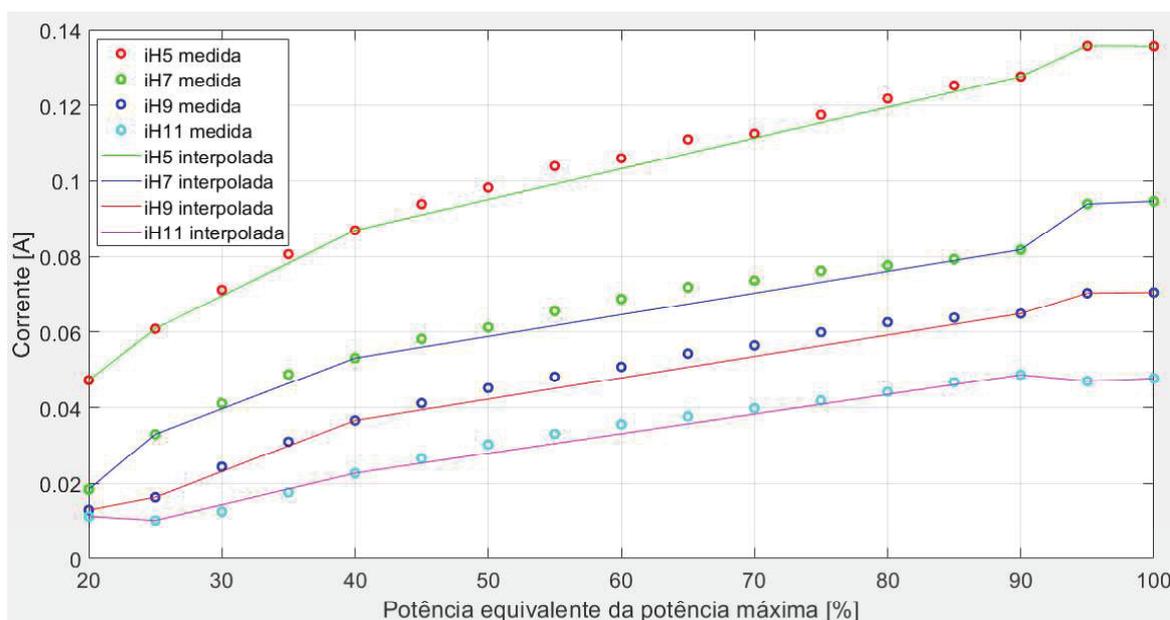
Figura 25 – Comparação da corrente harmônica de 3ª ordem medida e interpolada em função da variação da potência



FONTE: O autor (2020).

A Figura 26 mostra os pontos medidos das harmônicas de 5ª até a 11ª ordem e a curva da interpolação dessas correntes.

Figura 26 – Correntes harmônicas medidas e interpoladas do inversor operando com potência variável, tensão nominal e frequência em 60 Hz – harmônicas de 5ª até a 11ª ordem



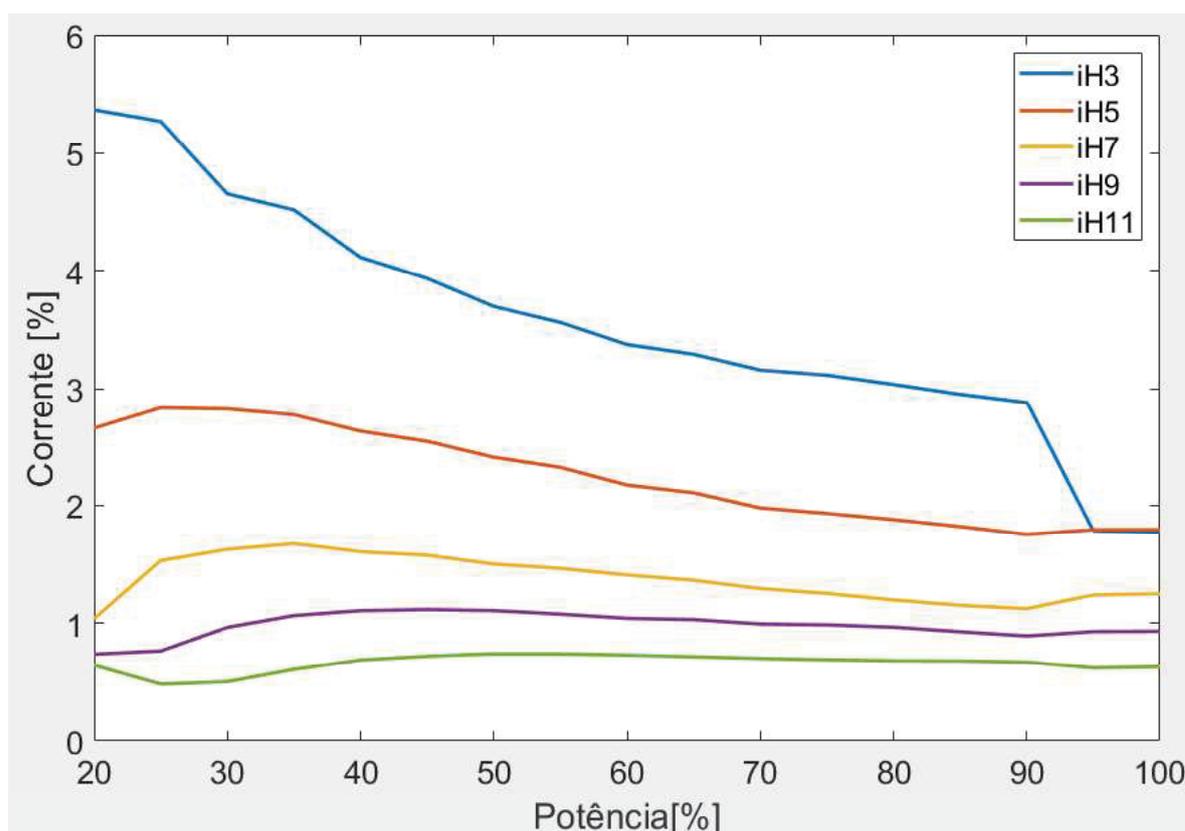
FONTE: O autor (2020).

Outra observação realizada foi referente ao que cada harmônica representa em relação a corrente fundamental na mesma potência, onde foi identificado que apesar

dos valores absolutos das correntes harmônicas aumentarem quando a potência aumenta, percentualmente ocorre o oposto, ou seja, para potências baixas as correntes fundamentais são baixas e as proporções entre as correntes harmônicas e fundamental são altas, à medida que a potência aumenta as correntes harmônicas aumentam, mas não na mesma proporção, conseqüentemente, a razão entre elas diminui.

A Figura 27 apresenta as distorções harmônicas em função da variação da potência, sendo observado na potência de 20% que a harmônica de 3ª ordem produz sua maior distorção com 5,37%, e na potência de 25% a harmônica de 5ª ordem produz sua maior distorção com 2,83%, enquanto na demais correntes as distorções harmônicas ficaram abaixo de 1,68%, ou seja, as harmônicas praticamente permanecem constantes em termos percentuais.

Figura 27 – Distorções harmônicas de corrente em função da variação da potência, tensão nominal e frequência em 60 Hz – harmônicas de 3ª até a 11ª ordem



FONTE: O autor (2020).

Com os resultados obtidos, buscou-se definir os pontos de ensaios para reduzir o erro, diversas possibilidades foram testadas e os pontos propostos que resultaram em um erro aceitável com apenas cinco pontos de potências equivalentes de sua

capacidade máxima foram, 20%, 25%, 40%, 90% e 95%. Sendo definido também o uso da interpolação linear para estimar o comportamento das correntes fundamental e harmônicas de 3ª a 11ª ordem, por apresentar, em termos gerais, a menor taxa de erro usando estes cinco pontos de interpolação.

#### 5.4 DEFINIÇÃO DOS PONTOS A SEREM ENSAIADOS DO INVERSOR EM FUNÇÃO DAS VARIAÇÕES DAS COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO

Para definir os pontos necessários de ensaios que representem o comportamento da corrente do inversor em função da variação de componentes harmônicas de tensão por meio de interpolação, foi necessário realizar diversos ensaios para diferentes cenários. No 1º cenário, foram atribuídos nove valores diferentes para as componentes harmônicas ímpares individuais de tensão até a 11ª ordem, como mostra a Tabela 15.

Como os limites superiores para as componentes harmônicas de tensão são estabelecidos pelo PRODIST módulo 8, os ensaios apresentados no referido trabalho foram realizados até o limite superior de cada componente harmônica de tensão, ou seja, 6,5%, 7,5%, 7,5%, 6,5% e 7,5% da tensão nominal para a 3ª, 5ª, 7ª, 9ª e 11ª ordem, respectivamente. O ângulo de fase para cada uma dessas componentes foi definido com o resultado de medições realizadas na rede elétrica do laboratório. Seguindo a ordem crescente de cada componente, os ângulos de fase registrados nas instalações foram 70,42°, 174,91°, 53,44°, -105,03° e -44,27°.

Com o resultado deste 1º cenário, foi possível verificar que a corrente fundamental apresenta uma redução de corrente com a presença de 3ª e 7ª harmônica de tensão à medida que a componente harmônica aumenta. Constatou-se, portanto, que a corrente fundamental reduziu até 120 mA (1,58%) em comparação com o teste realizado sem inserção de componente harmônica de tensão e com a inserção de 6,5% de distorção harmônica de 3ª ordem.

A corrente fundamental praticamente se manteve constante com a presença da componente harmônica de tensão de 5ª ordem. Com a presença das componentes harmônicas de tensão de 9ª e 11ª ordem a corrente fundamental aumentou aproximadamente 270 mA (3,58%) em comparação com o teste realizado sem inserção de componente harmônica de tensão e com a inserção de 6,5% e 7,5% de

distorção harmônica de 9ª e 11ª ordens. A Figura 28 mostra a corrente fundamental medida com a presença das componentes harmônicas individuais de tensão.

Tabela 15 – Parâmetros de ensaios utilizados na avaliação do comportamento da corrente do inversor em função da variação individual das componentes harmônicas de tensão

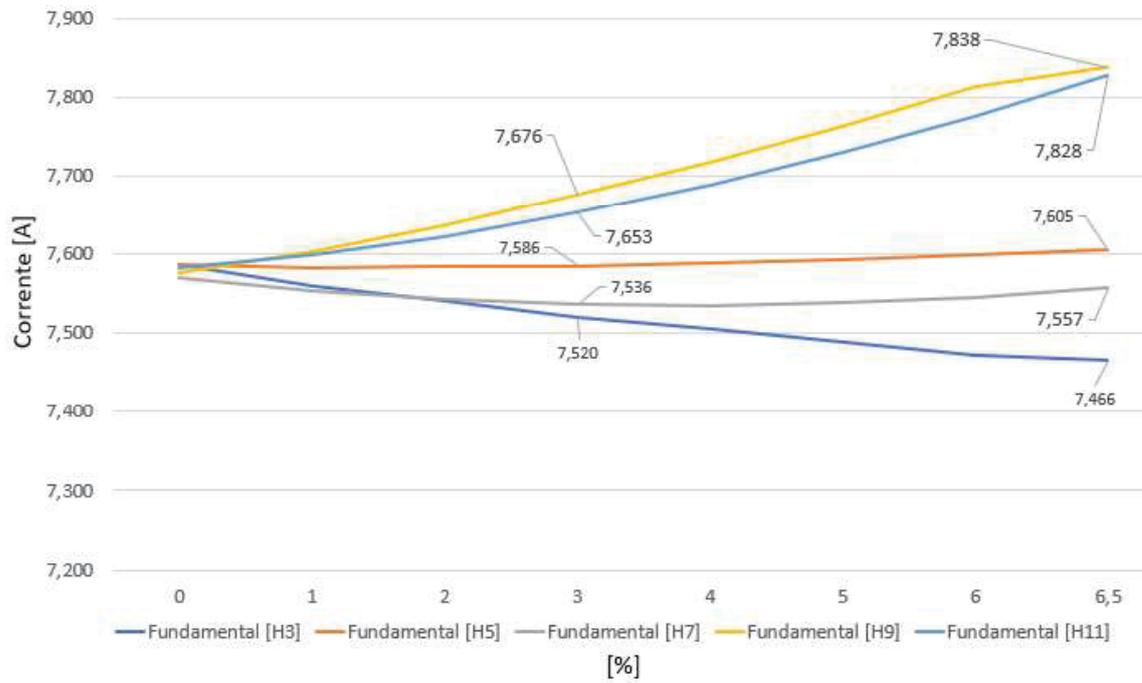
Ensaio	Valores de componentes harmônicas de tensão para 3ª e 9ª ordem [%]	Valores de componentes harmônicas de tensão para 5ª, 7ª e 11ª ordem [%]	Potência [%]	Frequência [Hz]	Tensão [V]
1	0	0	100	60	220
2	1	1			
3	2	2			
4	3	3			
5	4	4			
6	5	5			
7	6	6			
8	6,5	6,5			
9	-	7,5			

FONTE: O autor (2020).

Ao inserir uma componente harmônica de tensão de 3ª ordem, percebeu-se que a corrente harmônica de 3ª ordem também aumenta conforme aumenta a componente harmônica de tensão de 3ª ordem, enquanto isso as demais harmônicas de corrente permanecem praticamente constantes.

O mesmo acontece quando é inserida uma componente harmônica de tensão de 5ª ordem, a corrente harmônica que aumenta é a de 5ª ordem e as demais correntes permanecem constantes. Assim também acontece quando é ensaiado com as demais harmônicas de tensão, demonstrando as independências nos comportamentos das correntes harmônicas. Também foi observado que quanto maior a ordem harmônica, maiores são as correntes harmônicas para os mesmos valores de componentes harmônicas de tensão. A Figura 29 mostra as correntes harmônicas de 3ª a 11ª ordem ao aplicar tensão harmônica com as respectivas ordens.

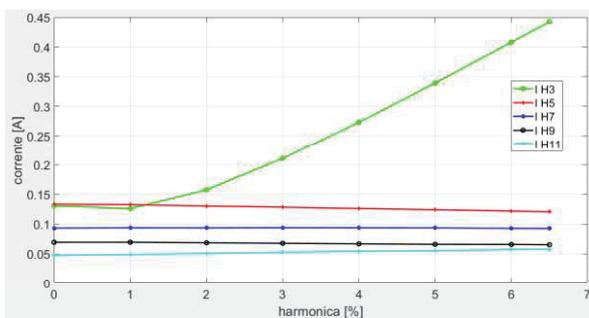
Figura 28 – Gráfico da corrente fundamental com o inversor operando em função das variações das componentes harmônicas individuais de tensão, potência máxima, tensão nominal e frequência de 60 Hz



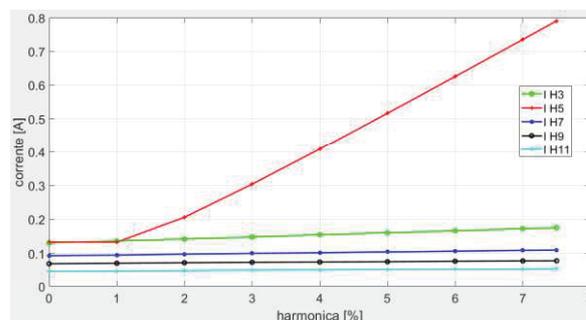
FONTE: O autor (2020).

Figura 29 – Gráfico das correntes harmônicas ímpares, com o inversor operando com potência ativa máxima, tensão nominal e frequência de 60 Hz

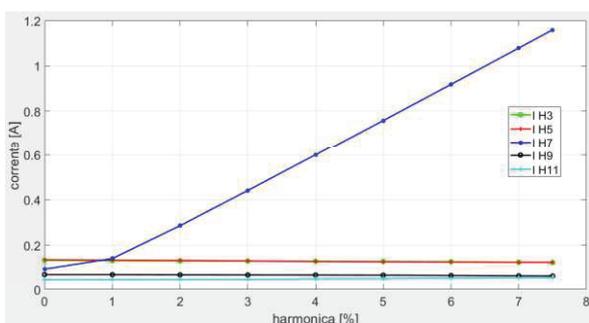
a) Em função da variação da 3ª harmônica de tensão



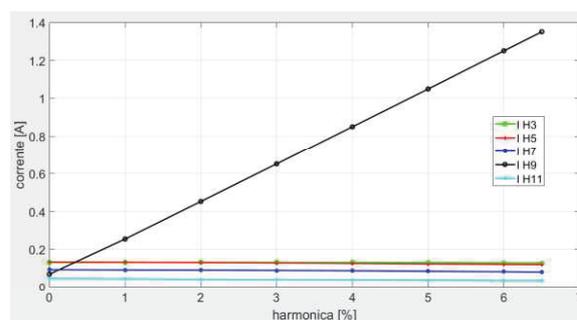
b) Em função da variação da 5ª harmônica de tensão



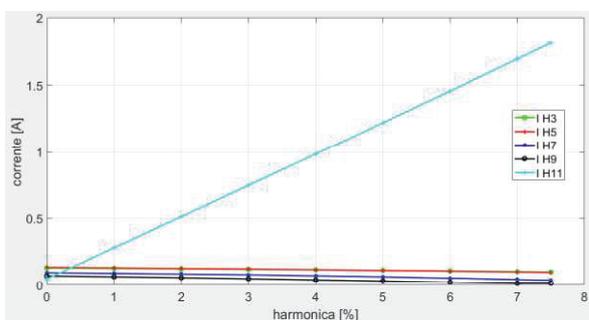
c) Em função da variação da 7ª harmônica de tensão



d) Em função da variação da 9ª harmônica de tensão



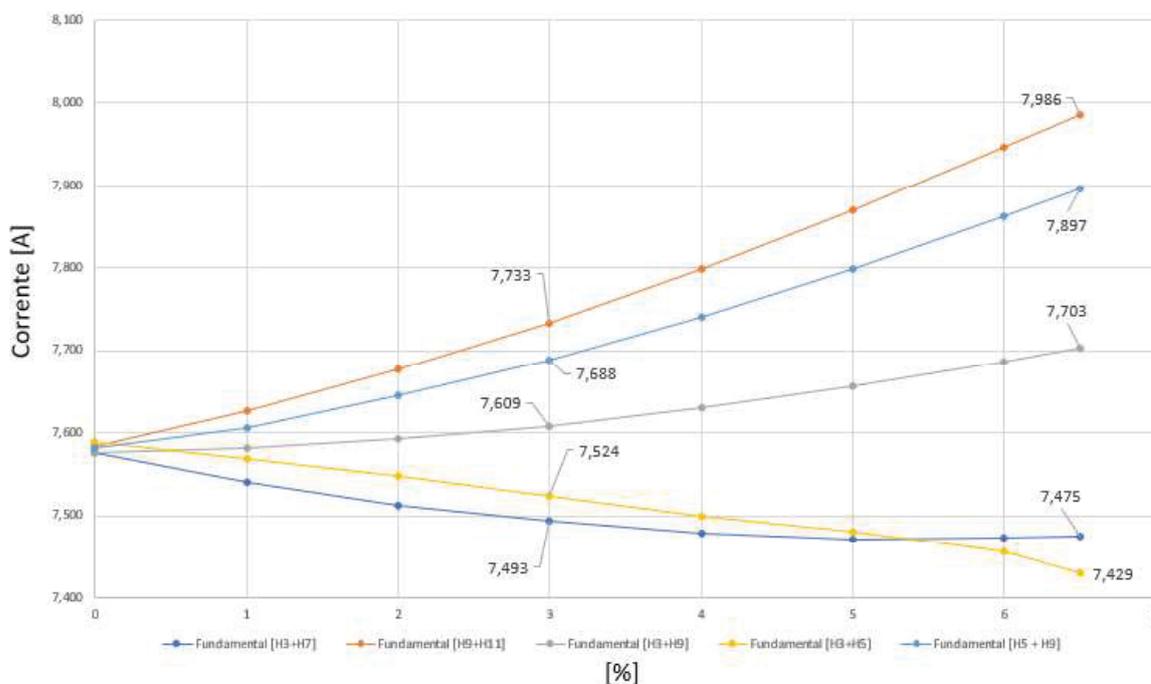
e) Em função da variação da 11ª harmônica de tensão



FONTE: O autor (2020).

No 2º cenário, foram atribuídos nove valores diferentes para pares de componentes harmônicas ímpares de tensão até a 11ª ordem, como mostra a Tabela 15, formando as combinações possíveis de pares de harmônicas de tensão, com seus respectivos valores de distorção.

Figura 30 – Gráfico da corrente fundamental com o inversor operando em função da variações das componentes harmônicas de tensão de 3ª e 5ª, 3ª e 7ª, 3ª e 9ª, 5ª e 9ª e 9ª e 11ª ordem, potência máxima, tensão nominal e frequência de 60 Hz



FONTE: O autor (2020).

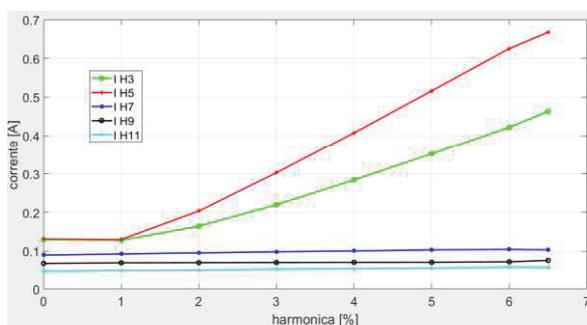
Ao inserir duas componentes harmônicas ímpares de tensão de 1% até 6,5% de distorção, foi observada a independência entre as harmônicas de tensão na harmônica de corrente de mesma ordem sem interferir nas outras correntes, semelhante ao comportamento das correntes harmônicas quando há a presença de apenas harmônicas individuais de tensão.

A Figura 31 mostra as correntes harmônicas com a inserção de duas componentes harmônicas de tensão.

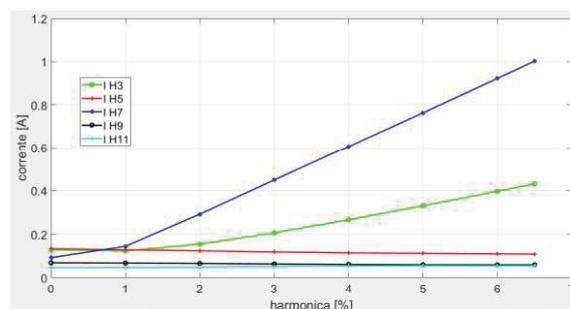
Ao analisar o comportamento dos ensaios realizados nos cenários um e dois, onde foram identificadas as independências das harmônicas de tensão na obtenção das correntes harmônicas, tornando-se interessante a criação do 3º cenário, onde foram inseridos 15 valores de distorções de tensão em todas as componentes harmônicas presentes nos ensaios. A Tabela 16 mostra os valores utilizados nos ensaios neste 3º cenário.

Figura 31 – Gráfico dos pares de correntes harmônicas ímpares de 3ª a 11ª ordem com o inversor operando em função da variação da componente harmônica de tensão, com potência ativa máxima, tensão nominal e frequência de 60 Hz

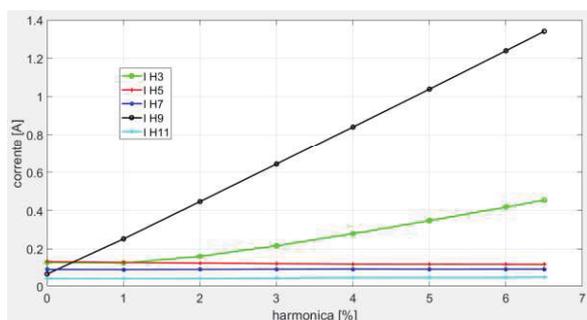
a) Em função da variação da 3ª e 5ª harmônica de tensão



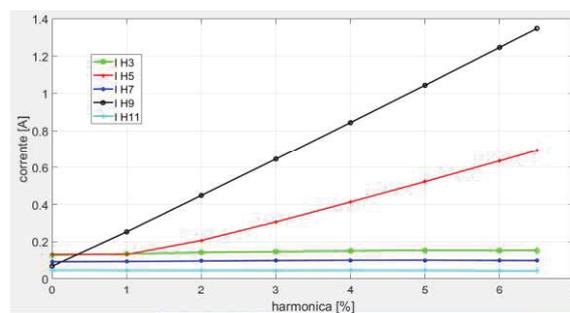
b) Em função da variação da 3ª e 7ª harmônica de tensão



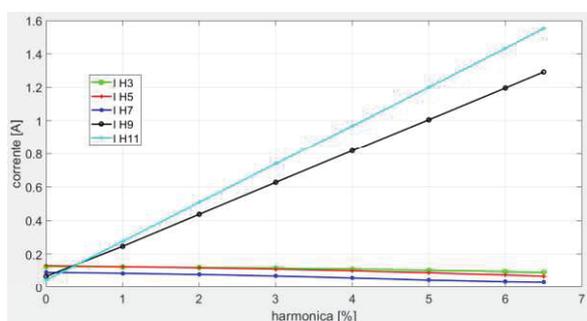
c) Em função da variação da 3ª e 9ª harmônica de tensão



d) Em função da variação da 5ª e 9ª harmônica de tensão



e) Em função da variação da 9ª e 11ª harmônica de tensão



FONTE: O autor (2020).

Tabela 16 – Parâmetros de ensaios utilizados na avaliação do comportamento da corrente do inversor em função da variação de todas as componentes harmônicas ímpares de tensão

Ensaio	Valores de componentes harmônicas de tensão da 3ª até a 11ª ordem [%]	Frequência [Hz]	Tensão [V]
1	0	60	220
2	0,5		
3	1		
4	1,5		
5	2		
6	2,5		
7	3		
8	3,5		
9	4		
10	4,5		
11	5		
12	5,5		
13	6		
14	6,5		
15	7		
16	7,5		

FONTE: O autor (2020).

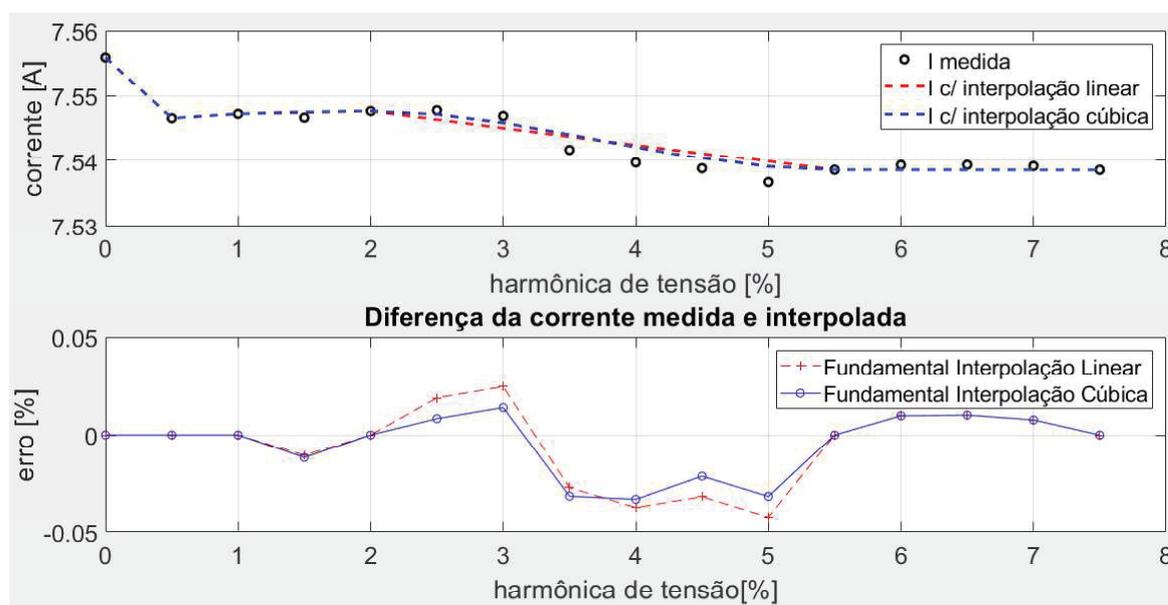
Com o resultado do terceiro ensaio, foi possível verificar que a corrente fundamental apresenta uma redução causada pela presença das harmônicas de tensão até a 11ª ordem, ao comparar com o comportamento causado pela inserção individual da 9ª e 11ª harmônica de tensão apresentadas no primeiro cenário pela Figura 28. Essa redução da corrente fundamental foi de aproximadamente 299mA (3,81%) em comparação com o teste realizado com a presença da harmônica individual de 9ª ordem contendo 6,5% de distorção, e uma redução de 289mA (3,69%) em comparação com o teste realizado com a presença da harmônica individual de 11ª ordem contendo 6,5 % de distorção.

Em seguida, foram escolhidos os ensaios com a presença de 0,5%, 1%, 2% e 7,5% de distorção harmônica de tensão de 3ª a 11ª ordens para aplicar os métodos de interpolação unidimensional linear e cúbica, comparando com os valores das correntes fundamental e harmônicas medidas na presença de outros valores de distorção harmônica de tensão.

Com os resultados obtidos, foi constatado que na corrente fundamental a melhor aproximação obtida foi a interpolação cúbica, com erro de 0,03%, no entanto foi definida a utilização da interpolação linear devido aos resultados dos demais ensaios obtidos nos ensaios anteriores apresentados nos capítulos 5.1, 5.2 e 5.3. A

Figura 32 mostra a corrente fundamental medida e interpolada e o respectivo erro para cada valor de distorção harmônica de tensão.

Figura 32 – Comparação da corrente fundamental medida e interpolada em função das variações de todas as componentes harmônicas ímpares de tensão, com potência máxima, tensão nominal e frequência de 60 Hz



FONTE: O autor (2020).

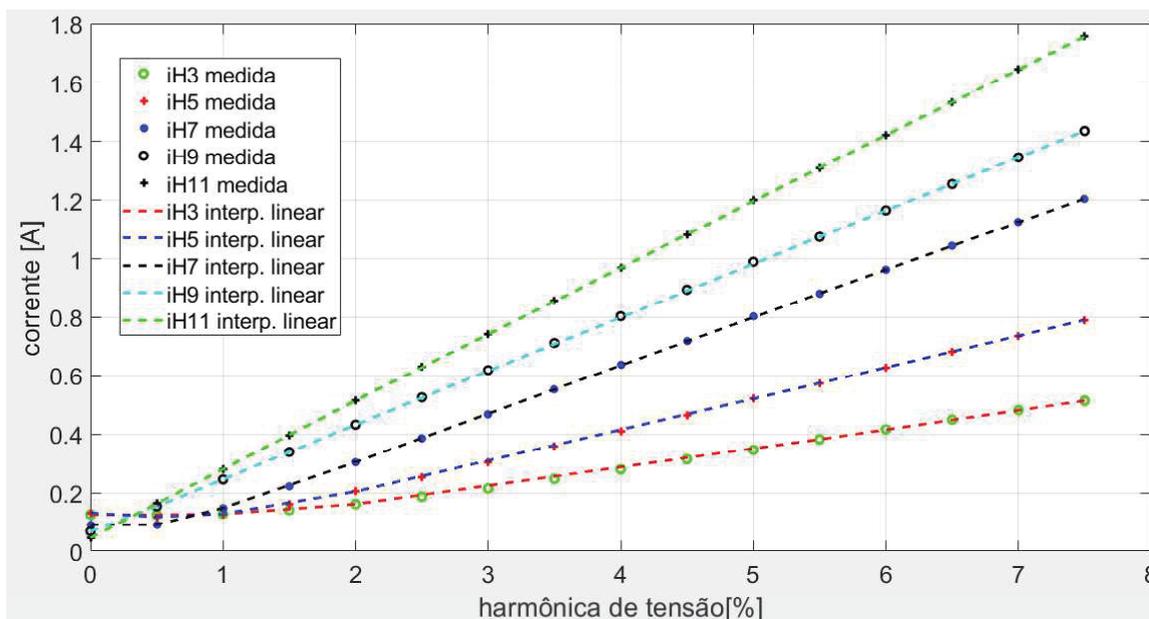
Para correntes harmônicas de 5<sup>a</sup> até a 11<sup>a</sup> ordem, o método de interpolação linear foi a que obteve em termos gerais a melhor aproximação com as correntes medidas nas demais distorções harmônicas de tensão, apresentando erros inferiores a 3,39%. A Figura 33 mostra os pontos medidos das harmônicas de 3<sup>a</sup> até a 11<sup>a</sup> ordem e a curva da interpolação dessas correntes.

Com o resultado desses ensaios, foi feita uma análise de correlação entre as distorções harmônicas de tensão com as harmônicas de corrente. Assim, constatou-se que os comportamentos das harmônicas individuais de corrente são praticamente independentes uma das outras. No entanto, essas correntes são diretamente dependentes das suas respectivas componentes harmônicas de tensão, como pode ser visto no 3<sup>o</sup> cenário de ensaios.

Para definição dos ensaios a serem realizados na presença das distorções harmônicas de tensão, também foi necessário realizar uma análise de correlação das correntes harmônicas apresentadas nos capítulos 5.1, 5.2, e 5.3. Ao verificar o comportamento das harmônicas em função da variação da tensão (capítulo 5.2),

percebe-se que as distorções harmônicas praticamente permaneceram constantes em função da variação da tensão, apresentando distorções inferiores a 2,3% em relação a corrente fundamental, como pode ser visto na Figura 34.

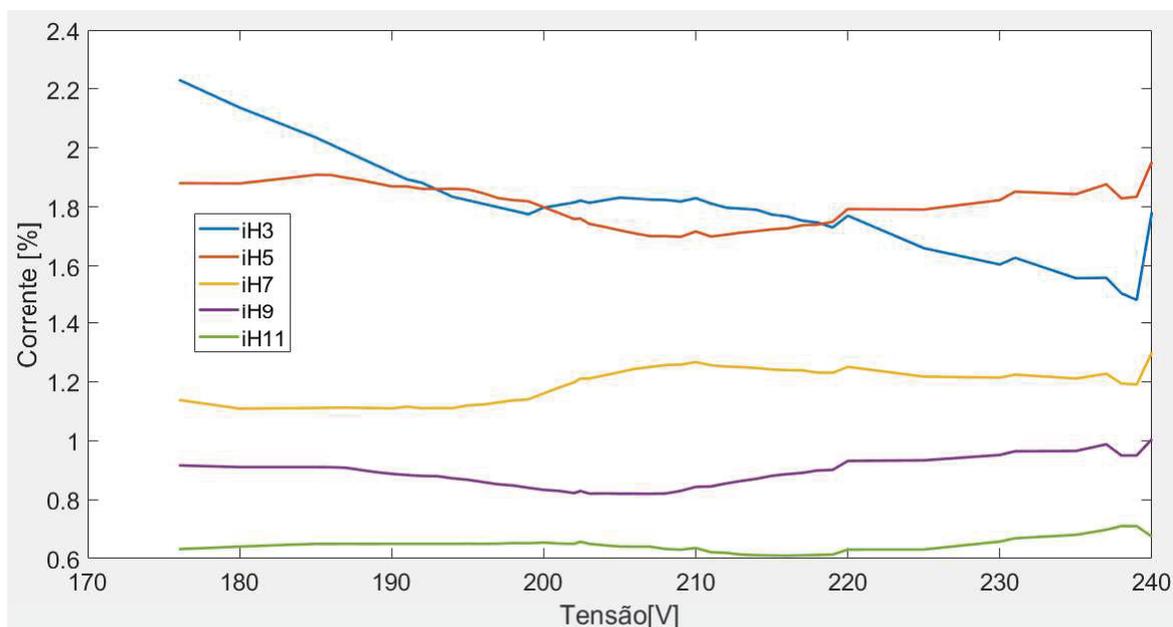
Figura 33 – Gráfico das correntes harmônicas ímpares de 3ª a 11ª ordem com o inversor operando em função da variação de todas as componentes harmônicas ímpares de tensão de 3ª a 11ª ordem, com potência ativa máxima, tensão nominal e frequência de 60 Hz



FONTE: O autor (2020).

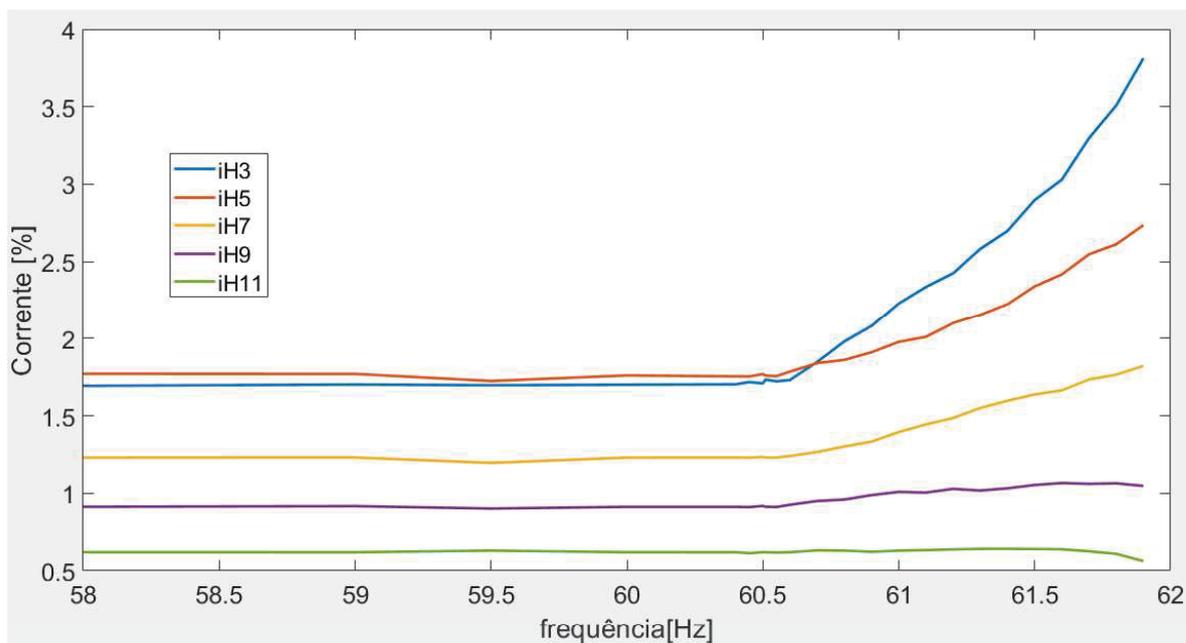
Ao verificar o comportamento das harmônicas em função da variação da frequência (capítulo 5.1), as correntes harmônicas apresentavam variações apenas quando a frequência está acima de 60,5Hz, ou seja, quando a corrente fundamental e a potência ativa começam a reduzir devido ao controle interno do inversor que deve atuar em casos de sobrefrequência. Apresentando uma distorção de 3,8% na 3ª harmônica quando o inversor estava operando com 61,9Hz, e nas frequências abaixo de 60,5Hz as distorções ficaram inferiores a 1,8%. Diante disto, percebe-se que as distorções apresentadas pela variação da frequência, são referentes a redução da potência ativa provocadas pela sobrefrequência. A Figura 35 mostra as distorções harmônicas em função da variação da frequência.

Figura 34 – Distorções harmônicas em função da variação da tensão, potência máxima e frequência em 60 Hz – harmônicas de 3ª até a 11ª ordem



FONTE: O autor (2020).

Figura 35 – Distorções harmônicas em função da variação da frequência, potência máxima e tensão nominal – harmônicas de 3ª até a 11ª ordem



FONTE: O autor (2020).

Ao verificar o comportamento das harmônicas em função da variação da potência (capítulo 5.3), as correntes harmônicas apresentaram maiores distorções quando o inversor estava operando em baixas potências, pois nesses casos a

corrente fundamental também é baixa. À medida que a potência ativa aumenta, a corrente fundamental aumenta e as distorções diminuem, como mostra a Figura 27 do capítulo 5.3.

Com a análise feita no 3º cenário e pela correlação dos comportamentos das distorções harmônicas de corrente em função da variação da frequência, tensão e em função da potência, foi constatado que as distorções harmônicas são provocadas pela variação da potência, pois nos ensaios de variação de tensão as distorções da corrente são praticamente constantes, e nos ensaios de variação da frequência, o aumento das distorções são provocadas pela redução da potência ativa e no caso dos ensaios em função da potência, as distorções reduzem com o aumento da potência.

Diante disto, a quantidade de ensaios a ser realizada para compor o banco de dados do referido trabalho foi reduzida significativamente, passando de 400 para 125 ensaios.

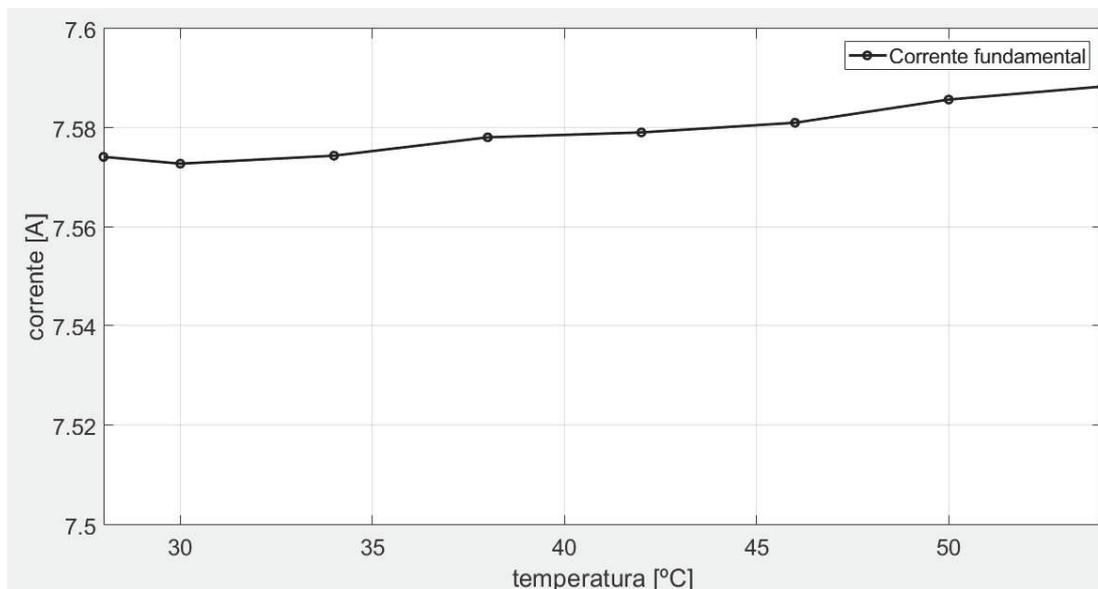
## 5.5 COMPORTAMENTO DA CORRENTE EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA

Também foi realizado um ensaio para saber se há interferência nas correntes fundamental e harmônicas à medida que a temperatura do inversor vai aumentando. Para isso, o inversor foi configurado para operar com a potência máxima, tensão nominal, frequência de 60 Hz e sem a presença de componentes harmônicas de tensão. Antes de iniciar o ensaio, foram colocados materiais isolantes envolvendo o inversor, com a finalidade de reduzir a dissipação térmica e, conseqüentemente, aumentar a temperatura do equipamento durante o processo de ensaio.

A temperatura ambiente no laboratório antes de iniciar o ensaio era de 26°C, ou seja, era um dia quente. Ao iniciar o ensaio foi constatada a temperatura de 28°C no inversor e ao final do ensaio a temperatura registrada era de 54°C. Ao concluir o ensaio, foi verificado que a temperatura ambiente do laboratório estava registrando 29°C.

Nesse ensaio, foi verificado que a corrente fundamental variou 0,20% ao longo de todo o período, ou seja, pode-se considerar que a corrente fundamental permaneceu constante durante o teste e a variação da temperatura não interferiu no comportamento da corrente fundamental, como pode ser verificada pela Figura 36.

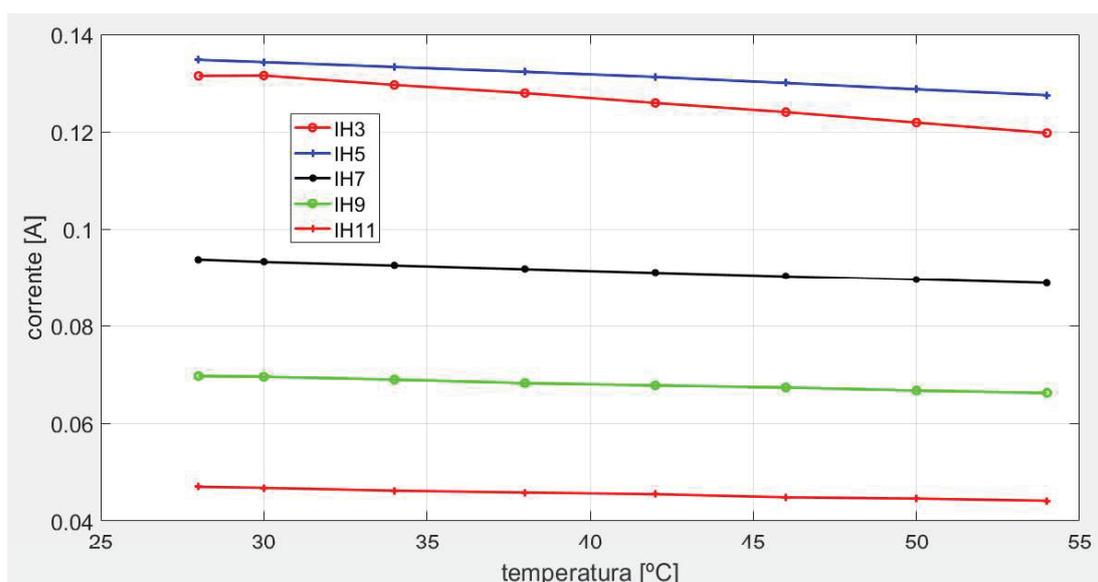
Figura 36 – Comparação da corrente fundamental medida em função da variação da temperatura



FONTE: O autor (2020).

No entanto, as correntes harmônicas reduziram linearmente com o aumento da temperatura, apresentando uma redução de aproximadamente 9,0%, 5,40%, 5,30%, 5,0% e 6,0% para as harmônicas de corrente de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> ordens, respectivamente. A Figura 37 mostra os gráficos das correntes harmônicas ímpares até a 11<sup>a</sup> ordem em função da variação da temperatura.

Figura 37 – Gráfico das correntes harmônicas de 3<sup>a</sup> até a 11<sup>a</sup> ordem medidas em função da variação da temperatura



FONTE: O autor (2020).

Portanto, é importante informar que nos ensaios realizados no referido trabalho não foram tomadas medidas de controle da temperatura, por considerar que a temperatura tivesse uma contribuição desprezível no comportamento das correntes elétricas. No entanto, foi constatado no final dos ensaios que para as harmônicas isso não era verdade e, os resultados dos ensaios poderão apresentar valores diferentes nas correntes harmônicas e, conseqüentemente, poderá aumentar o erro entre os valores medidos e interpolados.

## 5.6 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foi levantado o comportamento das correntes fundamental e harmônicas do inversor em vários ensaios distintos, variando dentro do seu limite de operação apenas uma das grandezas elétricas (frequência, tensão, potência ou harmônicas de tensão), enquanto as demais permaneciam constantes. Aplicando métodos de interpolação e extrapolação de variável unidimensional, foi possível definir o número de ensaios e com quais condições de cada grandeza elétrica devem ser realizados para representar o comportamento das correntes do inversor com uma margem de erro aceitável. A quantidade de cada grandeza e os respectivos valores definidos para realizar os ensaios são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 –Grandezas elétricas definidas para realização de ensaios do inversor

Potência equivalente da potência máxima admissível pelo inversor [%]	20, 25, 40, 90, 95
Tensão equivalente da nominal [%]	80, 92, 100, 108,6, 109,1
Frequência [Hz]	58, 60,5, 61,2, 61,9
Harmônica de tensão de 3ª à 11ª ordem	0,5 %, 1,0 %, 1,5 %, 2,0 %, 2,5 %, 3,0 %, 3,5 %, 4,0 %, 4,5 %, 5,0 %, 5,5 %, 6,0 %, 6,5 %, 7,0 % e 7,5 %
Ângulo de fase das harmônicas de tensão: 3ª, 5ª, 7ª, 9ª e 11ª ordem	70,42°, 174,91 °, 53,44 °, -105,03 ° e -44,27 °, respectivamente

FONTE: O autor (2020).

Com definição de quantos e quais os valores para potência, tensão, frequência e harmônicas de tensão, os maiores erros encontrados ao aplicar os métodos de

interpolação foram de 14,15%, 5,62%, 6,53% e 6,27%, respectivamente. Devido à correlação entre as harmônicas de corrente e as harmônicas de tensão, pode ser definida a quantidade total de ensaios para compor o banco de dados para aplicação dos métodos de interpolação, com parâmetros e valores definidos na Tabela 17, reduzindo assim de 400 ensaios para 125 no total. Essas definições demonstraram ser efetivas para a aplicação da metodologia proposta que será apresentada a seguir.

## 6 VALIDAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com as definições dos pontos de ensaios, foi necessária a criação do banco de dados, ensaiando o inversor nesses pontos, para que posteriormente sejam feitos os ensaios de validação. A seguir são apresentados o processo de ensaios para criação do banco de dados, bem como os ensaios de validação do método proposto.

### 6.1 LEVANTAMENTO DO BANCO DE DADOS

Com as definições de quantidade de pontos e valores para potência, frequência, tensão e distorções harmônicas de tensão apresentados na Tabela 17, o inversor foi submetido aos ensaios, com o objetivo de criar o banco de dados para que fosse possível implementar o método de interpolação linear definido no capítulo 5.

O fluxograma mostrado na Figura 38 apresenta as etapas para a aplicação do método de ensaio. Ao instalar o inversor para ensaiar no laboratório, os equipamentos devem ser parametrizados para as condições iniciais para fornecerem a menor potência cc, menor frequência e menor tensão ao inversor sem a presença das componentes harmônicas de tensão.

Na sequência, deve-se iniciar o ensaio com estes parâmetros. Ao concluir o 1º ensaio, o valor da tensão é incrementado e os demais parâmetros permanecem inalterados, repetindo o processo de ensaio com um novo parâmetro de tensão, até concluir todos os ensaios com a variação da tensão, na frequência mínima e na potência mínima definidas na Tabela 17.

Em seguida, a frequência é incrementada e a tensão é novamente parametrizada para a tensão mínima, iniciando novamente os ensaios com a variação da tensão, mas agora a frequência também será incrementada ao concluir os ensaios com todas as tensões na referida frequência e assim, sucessivamente até concluir todos os ensaios previstos para a potência mínima, para todas as frequências e tensões.

Após ensaiar o inversor com a potência mínima para todas as frequências e tensões, a potência é incrementada, a fonte ca é parametrizada para não fornecer componentes harmônicas de tensão, a frequência e a tensão são novamente parametrizadas para seus valores mínimos. Iniciando novamente os ensaios com a variação da tensão e frequência, mas agora a potência também será incrementada.

Ao concluir todos os ensaios nas referidas tensões e frequências, deve-se repetir o processo de ensaios até que sejam executados todos os ensaios previstos para todas as potências, frequências e tensões sem a presença das componentes harmônicas de tensão definidas na Tabela 17.

Com a conclusão dos ensaios sem a presença de componentes harmônicas de tensão, inicia-se a etapa contendo as harmônicas de tensão. Porém, nessa etapa os ensaios não são executados com todas as frequências e tensões, apenas na frequência e tensão nominal, variando apenas a potência e os valores das harmônicas.

Para isso, a fonte cc deve ser parametrizada para fornecer a mínima potência definida, a fonte ca deve ser parametrizada para fornecer o valor mínimo para todas as componentes harmônicas com suas respectivas defasagens apresentadas na Tabela 17. A tensão e frequência deverão ser configurados na tensão nominal, frequência nominal e mantidos com esses valores durante todos os ensaios.

Na sequência, deve-se iniciar o ensaio com estes parâmetros. Ao concluir o 1º ensaio, os valores das harmônicas serão incrementados e os demais parâmetros permanecem inalterados, repetindo o processo de ensaio com um novo parâmetro de harmônicas, assim sucessivamente até concluir todos os ensaios com a variação da harmônica para aquela potência.

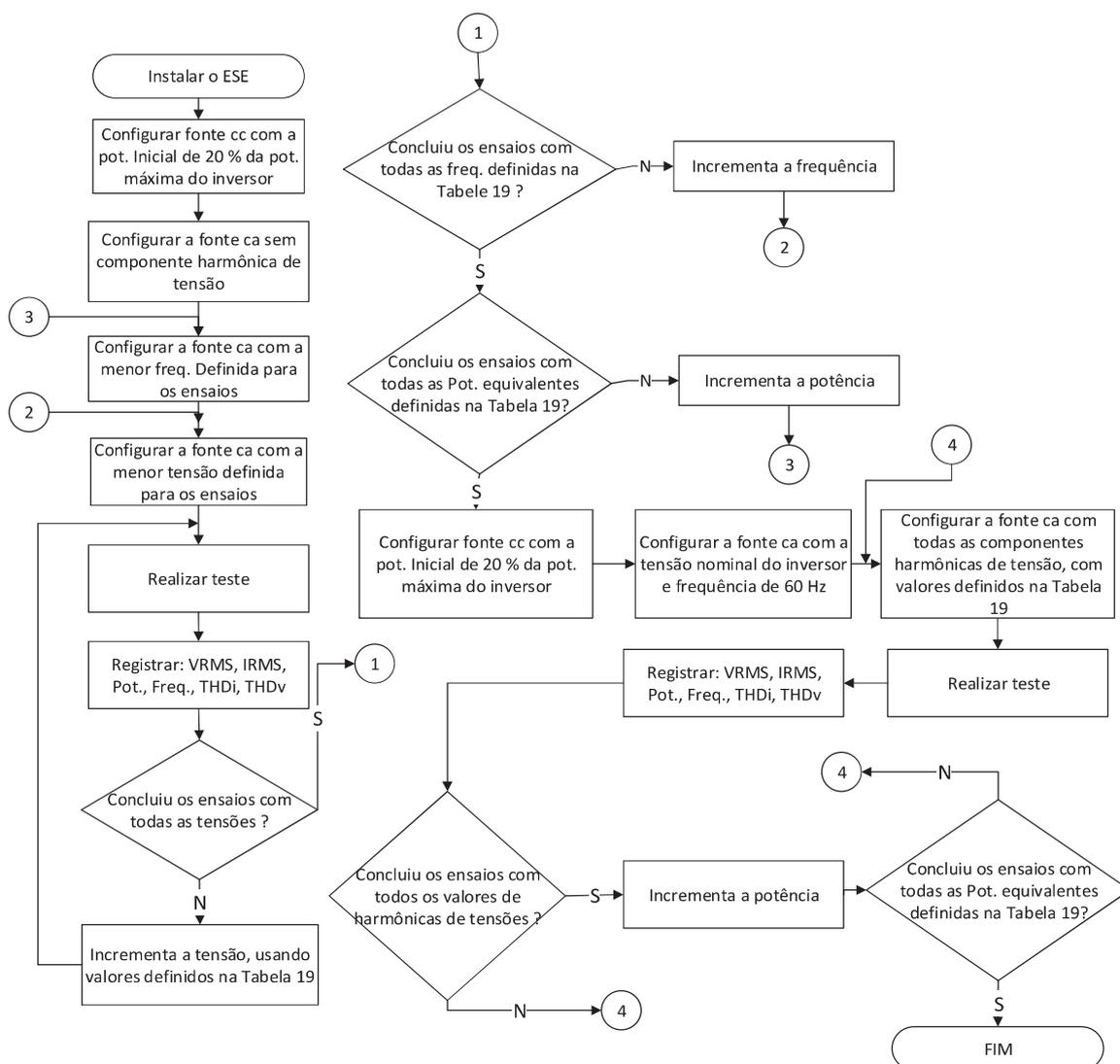
Em seguida, a potência é incrementada e as harmônicas de tensão são parametrizadas para seus valores mínimos, iniciando novamente o processo de ensaio até que sejam executados todos os ensaios previstos para as potências e harmônicas de tensão apresentados na Tabela 17.

Com essa metodologia, foram executados 125 ensaios, contemplando apenas algumas interações simultâneas dos parâmetros definidos. Dessa forma, foi possível criar os *scripts* necessários para a aplicação dos métodos de interpolação bidimensional e multidimensional.

Com as medições obtidas nos ensaios envolvendo as interações das grandezas elétricas, foi desenvolvido no Matlab um *script* para carregar os dados e criar as matrizes multidimensionais apresentadas no capítulo 2.6, usando os índices tensão, frequência e potência, resultando em três matrizes de (5, 4, 6). Para essas matrizes, há uma matriz (5, 4, 6) contendo os respectivos valores da corrente fundamental, outra matriz (5, 4, 6) com os valores da corrente harmônica de 3ª ordem e outras matrizes (5, 4, 6) para as demais correntes harmônicas ímpares, para os

ângulos de fase dessas correntes e para os valores do fator de potência, obtidos com as medições.

Figura 38 – Fluxograma do procedimento de ensaio com interação simultânea das grandezas elétricas



FONTE: O autor (2020).

Assim, foi possível criar um *script* para executar o processo de interpolação linear com variáveis multidimensionais de potência, frequência e tensão, obtendo os resultados estimados das correntes fundamental e harmônicas, ângulo de fase e fator de potência no ponto desejado, quando não houver a presença de componentes harmônicas de tensão.

Com as medições obtidas com a presença das componentes harmônicas de tensão, foi criado um *script* para realizar a interpolação bidimensional entre potência e componentes harmônicas de tensão, para obter os resultados estimados das

correntes fundamental e harmônicas, os ângulos de fase dessas correntes e o fator de potência no ponto desejado, quando existir a presença de uma ou mais componentes harmônicas de tensão. O arquivo completo de criação das matrizes multidimensionais e os processos de interpolação são apresentados no apêndice B.

Com a implementação dessas técnicas de interpolação no Matlab, foi possível realizar os ensaios de validação com parâmetros elétricos aleatórios não utilizados na construção do banco de dados e compará-los com os resultados da interpolação. Os ensaios de validação e discussão dos resultados são apresentados a seguir.

Antes de apresentar os resultados dos ensaios e suas respectivas aproximações por interpolação, se faz necessário comentar a respeito das técnicas de interpolação utilizadas. No capítulo 5, ficou definido que o método de interpolação a ser utilizado para calcular as correntes fundamental e de 3ª a 11ª ordem é a interpolação linear

Dessa forma, nos ensaios de validação apresentados a seguir foram utilizados o método de interpolação linear para estimar os valores desejados para todas as grandezas elétricas, sendo elas correntes fundamental e harmônicas ímpares de 3ª a 11ª ordem, bem como o ângulo de fase de cada uma das correntes harmônicas e o fator de potência.

## 6.2 ENSAIOS DE VALIDAÇÃO SEM A PRESENÇA DE COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO

O primeiro ensaio de validação foi feito com os três valores dos parâmetros de potência, frequência e tensão diferentes daqueles utilizados para compor o banco de dados. A Tabela 18 mostra os valores obtidos das medições e os valores com a aplicação da metodologia de interpolação linear.

Ao analisar essa tabela pode-se notar que os parâmetros utilizados neste ensaio possuem algumas características, a potência está próxima a capacidade de operação do inversor, a tensão está com valor bem abaixo da tensão nominal (220 volts). Fazendo com que a corrente fundamental esteja no ponto de saturação, conforme apresentado pela Figura 17 e comentado no capítulo 5.2, ou seja, o *script* desenvolvido no processo de interpolação deverá identificar esta situação e realizar a extrapolação antes de efetivamente interpolar a corrente fundamental, afim de reduzir o erro ao comparar os valores medidos e interpolados. Outra observação é que a

frequência está abaixo da frequência ensaiada para compor o banco de dados (60,5Hz).

Com o resultado da interpolação, percebe-se que a diferença (erro) obtida em comparação com o valor medido da corrente fundamental e interpolada foi de 30,1 mA, o equivalente a 0,36%, demonstrando que a técnica utilizada foi efetiva.

Ao comparar os resultados da interpolação com os valores medidos, a corrente harmônica de 3ª ordem foi a que apresentou o maior erro, com 6,7% e em valor absoluto foi de 10,3 mA, enquanto as demais correntes harmônicas apresentaram erro inferior a 4,87%. Tais resultados demonstram que a metodologia e a técnica de interpolação propostas cumprem o objetivo proposto no referido trabalho para este ensaio.

Tabela 18 – Resultado do ensaio de validação 01

PARÂMETROS	MEDIDO					
Potência [%]	98.00%	1610.67 [W]				
Frequência [Hz]	59.6					
Tensão [%]	86.36	190.0 [V]				
COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO [%]						
vH3	vH5		vH7	vH9	vH11	
0	0%		0%	0%	0%	
COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO [V]						
vH3	vH5		vH7	vH9	vH11	
0	0		0	0	0	
PARÂMETROS	Distorção [%]	MEDIDO [A]	Distorção [%]	VALORES INTERPOLADOS [A]	ERRO ABSOLUTO [A]	ERRO [%]
FUNDAMENTAL		8.4776		8.4470	0.031	0.36%
IH3	1.8%	0.1534	1.9%	0.1637	-0.010	-6.70%
IH5	1.8%	0.1509	1.7%	0.1472	0.004	2.44%
IH7	1.1%	0.0907	1.1%	0.0951	-0.004	-4.86%
IH9	0.8%	0.0706	0.9%	0.0721	-0.002	-2.17%
IH11	0.6%	0.0526	0.6%	0.0520	0.001	1.03%
PARÂMETROS	MEDIDO	VALORES INTERPOLADOS		ERRO ABSOLUTO	ERRO [%]	
FP	1.0000	1.000		0.0000	0.00%	
PARÂMETROS	MEDIDO [°]	VALORES INTERPOLADOS [°]		ERRO ABSOLUTO	ERRO [%]	
Φf3	-141.12	-142.30		1.18	-0.84%	
Φf5	-166.09	-164.46		-1.63	0.98%	
Φf7	-162.51	-163.11		0.59	-0.37%	
Φf9	-158.89	-159.54		0.64	-0.41%	
Φf11	-161.32	-159.74		-1.58	0.98%	

FONTE: O autor (2020).

No segundo ensaio de validação foi feito com dois parâmetros (potência e frequência) diferentes daqueles utilizados para compor o banco de dados, como mostra Tabela 19a. Ao analisar essa tabela pode-se notar que os parâmetros

utilizados neste ensaio possuem algumas características, a potência está com 65% da capacidade de operação do inversor e a frequência está com 60 Hz.

Ao comparar os resultados da interpolação com os valores medidos, as correntes harmônicas de 9ª e 11ª ordem foram as que apresentaram os maiores erros, com 5,71% e 6,25%, respectivamente. Enquanto as demais correntes harmônicas apresentaram erro inferior a 5,03%, demonstrando que a metodologia e a técnica de interpolação propostas cumprem o objetivo proposto no referido trabalho para este ensaio.

No terceiro ensaio de validação foram feitos com três parâmetros (potência, frequência e tensão) diferentes daqueles utilizados para compor o banco de dados, como mostra Tabela 19b. Ao analisar essa tabela pode-se notar que os parâmetros utilizados neste ensaio possuem algumas características, a potência está com 50% da capacidade de operação do inversor, o qual o inversor deveria fornecer 892,30 W no ponto de conexão, porém, como a frequência está com 61 Hz, o inversor deve reduzir em 20% a potência ativa, pois foi atuado o controle interno de proteção do inversor por sobrefrequência, conforme apresentado no capítulo 5.1 e a tensão está abaixo da nominal, ou seja, 199,10 volts.

Ao comparar os resultados da interpolação com os valores medidos, as correntes harmônicas de 9ª e 11ª ordem foram as que apresentaram os maiores erros, com 14,46% e 21,30%, respectivamente. Apesar do erro percentualmente ser considerável, em valores absolutos o erro foi inferior a 5mA, enquanto as demais correntes harmônicas apresentaram erro inferior a 9mA. Quanto à potência, foi feito o cálculo da potência com os valores medidos onde constatou-se que o inversor reduziu 164W (18,4%), enquanto os cálculos usando os valores interpolados a redução foi de 186,2W (20,87%), ou seja, valores bem próximos do esperado.

Ao analisar as distorções harmônicas medidas, percebe-se que as maiores distorções estão nas ordens mais baixas (3ª, 5ª e 7ª), com 3,9%, 2,7% e 1,8%, respectivamente. Apresentando comportamento semelhante aos mostrados nas Figura 27, Figura 34 e Figura 35 e nos capítulos 5.3 e 5.4, ou seja, quanto menor a potência, maiores são as correntes harmônicas. Valores bem próximos também são observados nas correntes harmônicas interpoladas.

Ao comparar as fases das harmônicas medidas com as interpoladas, percebe-se que o maior erro obtido foi na 11ª harmônica, com 11,11% e os demais erros foram

inferiores a 4,32%, ou seja, apresentando valores bem próximos dos ângulos medidos.

Apesar da corrente harmônica de 11ª ordem apresentar o erro de 20,04%, é possível considerar que a técnica de interpolação proposta no referido trabalho cumpre o objetivo proposto para este ensaio, pois o valor absoluto da corrente harmônica de 11ª ordem é de apenas 23,28mA.

Tabela 19 – Resultado do ensaio de validação 02 e 03, sem a presença de harmônicas de tensão

a) Ensaio de validação 02, com mudança de dois parâmetros (potência e frequência)

PARÂMETROS	MEDIDO					
Potência [%]	65.00%		1160	[W]		
Frequência [Hz]	60					
Tensão [%]	100	220.0		[V]		
COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO [%]						
vH3	vH5		vH7	vH9	vH11	
0%	0%		0%	0%	0%	
COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO [V]						
vH3	vH5		vH7	vH9	vH11	
0	0		0	0	0	
PARÂMETROS	Distorção [%]	MEDIDO [A]	Distorção [%]	VALORES INTERPOLADOS [A]	ERRO ABSOLUTO [A]	ERRO [%]
FUNDAMENTAL		5.27462		5.2976	0.023	0.44%
IH3	3.2%	0.16964	3.2%	0.1719	-0.002	-1.32%
IH5	2.0%	0.10783	2.0%	0.1060	0.002	1.67%
IH7	1.3%	0.07015	1.3%	0.0666	0.004	5.02%
IH9	1.0%	0.05322	0.9%	0.0502	0.003	5.71%
IH11	0.7%	0.03747	0.7%	0.0351	0.002	6.25%
PARÂMETROS	MEDIDO	VALORES INTERPOLADOS		ERRO ABSOLUTO	ERRO [%]	
FP	1.00	0.9910		0.0090	0.90%	
PARÂMETROS	MEDIDO [e]	VALORES INTERPOLADOS [e]		ERRO ABSOLUTO	ERRO [%]	
Φf3	-129.40	-128.24		-1.16	0.90%	
Φf5	-168.09	-165.61		-2.48	1.47%	
Φf7	-164.74	-161.14		-3.60	2.18%	
Φf9	-166.38	-163.58		-2.80	1.68%	
Φf11	-166.96	-164.58		-2.38	1.43%	

b) Ensaio de validação 03, com mudança de três parâmetros (potência, frequência e tensão)

PARÂMETROS	MEDIDO					
Potência [%]	50.00%		892	[W]		
Frequência [Hz]	61					
Tensão [%]	90.5	199.1		[V]		
COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO [%]						
vH3	vH5		vH7	vH9	vH11	
0%	0%		0%	0%	0%	
COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO [V]						
vH3	vH5		vH7	vH9	vH11	
0	0		0	0	0	
PARÂMETROS	Distorção [%]	MEDIDO [A]	Distorção [%]	VALORES INTERPOLADOS [A]	ERRO ABSOLUTO [A]	ERRO [%]
FUNDAMENTAL		3.69489		3.6103	0.085	2.29%
IH3	3.9%	0.14314	4.1%	0.1468	-0.004	-2.55%
IH5	2.7%	0.10094	2.6%	0.0923	0.009	8.52%
IH7	1.8%	0.06577	1.6%	0.0565	0.009	14.07%
IH9	1.0%	0.03697	0.9%	0.0315	0.005	14.86%
IH11	0.6%	0.02328	0.5%	0.0186	0.005	20.04%
PARÂMETROS	MEDIDO	VALORES INTERPOLADOS		ERRO ABSOLUTO	ERRO [%]	
FP	0.99	0.991		-0.0010	-0.10%	
PARÂMETROS	MEDIDO [e]	VALORES INTERPOLADOS [e]		ERRO ABSOLUTO	ERRO [%]	
Φf3	-150.41	-143.92		-6.49	4.31%	
Φf5	-156.38	-152.85		-3.53	2.26%	
Φf7	-156.66	-152.09		-4.57	2.91%	
Φf9	-143.10	-143.39		0.29	-0.20%	
Φf11	-147.06	-163.40		16.34	-11.11%	

FONTE: O autor (2020).

No quarto ensaio de validação foram feitos com três parâmetros (potência, frequência e tensão) diferentes daqueles utilizados para compor o banco de dados, como mostra Tabela 20. Ao analisar essa tabela pode-se notar que os parâmetros utilizados neste ensaio possuem algumas características, a tensão está abaixo da nominal, ou seja, 195 Volts, a baixa potência, apresentando 23% da capacidade de operação do inversor, o qual o inversor deveria fornecer 410 W no ponto de conexão.

No entanto, como a frequência está com 61,5 Hz, o inversor deve reduzir em 40% a potência ativa, pois foi atuado o controle interno de proteção do inversor por sobrefrequência, conforme apresentado no capítulo 5.1. Ao usar os dados medidos a potência calculada é de 223,93 W, ou seja, uma redução de 45,38%, o que representa

uma potência equivalente a 13,40% da capacidade do inversor, ou seja, uma potência muito baixa.

Ao comparar os resultados da interpolação com os valores medidos, as correntes harmônicas apresentaram erros muito altos, principalmente para a 11ª harmônica (57,92%). No entanto, percebe-se que esses erros são inferiores a 2mA paras as harmônicas de 5ª à 11ª ordem.

Outra constatação observada foi em relação ao fator de potência, que apesar de apresentar seu valor abaixo do seu limite de tolerância definido por norma (0,98 indutivo ou capacitivo para potências acima de 20% da nominal), comentado nos capítulos 2.5 e 5.2, devido a sobrefrequência usada no ensaio, a potência ativa fornecida pelo inversor foi de apenas 13,4%. Diante deste fato, o fator de potência medido e interpolado ficaram bem abaixo do esperado.

Tabela 20 – Resultado do ensaio de validação 04

PARÂMETROS	MEDIDO					
Potência [%]	23.00%	410.00 [W]				
Frequência [Hz]	61.5					
Tensão [%]	88.63	195.0 [V]				
COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO [%]						
vH3	vH5		vH7	vH9	vH11	
0	0%		0%	0%	0%	
COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO [V]						
vH3	vH5		vH7	vH9	vH11	
0	0		0	0	0	
PARÂMETROS	Distorçã o [%]	MEDIDO [A]	Distorçã o [%]	VALORES INTERPOLADOS [A]	ERRO ABSOLUTO [A]	ERRO [%]
FUNDAMENTAL		1.305		1.229	0.076	5.86%
IH3	6.5%	0.084	5.8%	0.071	0.013	15.99%
IH5	1.6%	0.021	1.9%	0.024	-0.003	-12.77%
IH7	1.6%	0.020	1.5%	0.018	0.002	12.26%
IH9	0.8%	0.010	0.7%	0.008	0.002	19.31%
IH11	0.3%	0.003	0.4%	0.005	-0.002	-57.96%
PARÂMETROS	MEDIDO	VALORES INTERPOLADOS		ERRO ABSOLUTO	ERRO [%]	
FP	0.8800	0.8236		0.0564	6.41%	
PARÂMETROS	MEDIDO [e]	VALORES INTERPOLADOS [e]		ERRO ABSOLUTO	ERRO [%]	
Φf3	-101.48	-120.40		18.92	-18.64%	
Φf5	-141.95	-141.84		-0.11	0.08%	
Φf7	-181.53	-144.82		-36.71	20.22%	
Φf9	-155.08	-172.36		17.27	-11.14%	
Φf11	-156.81	-152.06		-4.75	3.03%	

FONTE: O autor (2020).

No quinto ensaio de validação foram feitos com dois parâmetros (potência, frequência) diferentes daqueles utilizados para compor o banco de dados, como mostra Tabela 21. Ao analisar essa tabela pode-se notar que os parâmetros utilizados neste ensaio possuem algumas características, está sendo usada a tensão nominal

do inversor, a baixa potência, apresentando 23% da capacidade de operação do inversor, o qual o inversor deve fornecer 410 W no ponto de conexão.

Ao comparar os resultados da interpolação com os valores medidos, a corrente harmônica de 9ª ordem foi a que apresentou o maior erro, com 8,42% (1mA), enquanto as demais harmônicas apresentaram erros inferiores a 1,36%.

Outra constatação observada foi em relação ao fator de potência, que apesar de apresentar seu valor abaixo do seu limite de tolerância definido por norma (0,98 indutivo ou capacitivo para potências acima de 20% da nominal), foi observado na Figura 22 do capítulo 5.3 que o fator de potência somente atinge o valor definido por norma nas potências acima de 35% da capacidade do inversor.

Ao analisar os dados dos ensaios de validação 04 e 05 da Tabela 20 e Tabela 21, respectivamente, percebe-se que ambos possuem as mesmas potências, mas no ensaio 04 a frequência está no ponto de dimerização da potência e a tensão está abaixo da nominal, enquanto no ensaio 05, a frequência está abaixo da nominal (60 Hz) e a tensão está na nominal (220 V).

Com isto, entende-se que pelo fato de as tensões terem valores diferentes e principalmente pela dimerização da potência provocada pela sobrefrequência (redução de 45,38% da potência) é que os erros obtidos nas comparações entre as grandezas medidas e interpoladas no ensaio 04 ficaram muito altos. Enquanto as comparações dos valores medidos e interpolados no ensaio 05 mostraram erros bem inferiores.

Também é possível observar que os erros encontrados entre as medições e interpolações dos ângulos de defasagem das harmônicas do ensaio 04 apresentaram maiores erros em relação a todos os outros ensaios realizados anteriormente. No entanto, apesar dos erros obtidos na comparação dos valores medidos e interpolados dos ângulos de defasagem das harmônicas do ensaio 05, serem inferiores ao do ensaio 04, observa-se que tanto no ensaio 04 quanto no ensaio 05, os valores interpolados são os mesmos, mostrando que o método de interpolação para os ângulos não considerou a dimerização da potência para realizar a interpolação.

Dessa forma, constatou-se que o método utilizado no referido trabalho possui limitações para potências baixas, quando a potência está sendo dimerizada (reduzida), devido a atuação do controle de sobrefrequência do inversor.

Tabela 21 – Resultado do ensaio de validação 05

PARÂMETROS	MEDIDO					
Potência [%]	23.00%	410	[W]			
Frequência [Hz]	59.5					
Tensão [%]	100	220.0	[V]			
COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO [%]						
vH3	vH5		vH7	vH9	vH11	
0%	0%		0%	0%	0%	
COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO [V]						
vH3	vH5		vH7	vH9	vH11	
0	0		0	0	0	
PARÂMETROS	Distorção [%]	MEDIDO [A]	Distorção [%]	VALORES INTERPOLADOS [A]	ERRO ABSOLUTO [A]	ERRO [%]
FUNDAMENTAL		1.9842		1.9939	-0.010	-0.49%
IH3	5.3%	0.1060	5.3%	0.1064	0.000	-0.34%
IH5	2.8%	0.0559	2.8%	0.0552	0.001	1.15%
IH7	1.3%	0.0267	1.3%	0.0263	0.000	1.20%
IH9	0.7%	0.0140	0.8%	0.0152	-0.001	-8.42%
IH11	0.5%	0.0109	0.6%	0.0110	0.000	-1.36%
PARÂMETROS	MEDIDO	VALORES INTERPOLADOS		ERRO ABSOLUTO	ERRO [%]	
FP	0.94	0.937		0.0026	0.28%	
PARÂMETROS	MEDIDO [°]	VALORES INTERPOLADOS [°]		ERRO ABSOLUTO	ERRO [%]	
Φ3	-119.76	-120.40		0.64	-0.53%	
Φ5	-141.87	-141.84		-0.03	0.02%	
Φ7	-141.64	-144.82		3.18	-2.25%	
Φ9	-170.44	-172.36		1.92	-1.13%	
Φ11	-131.61	-152.06		20.44	-15.53%	

FONTE: O autor (2020).

Com os resultados dos ensaios de validação apresentados até o presente momento, foi possível observar que o método de interpolação não é preciso para baixas potências, quando estas são dimerizadas devido ao controle interno do inversor que é atuado quando a frequência da rede está acima de 60,5Hz. Apesar disto, isso não é crítico pelo fato de as correntes harmônicas serem muito baixas nessa condição de operação.

Assim, pode-se concluir em termos gerais, que as técnicas propostas, tanto dos ensaios quanto das interpolações, são capazes de representar o comportamento das correntes quando o inversor está operando em diversas condições, sem a presença de componentes harmônicas de tensão, mesmo sem realizar o controle da temperatura no comportamento das correntes do inversor.

### 6.3 ENSAIOS DE VALIDAÇÃO COM A PRESENÇA DE COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO

O sexto ensaio de validação foi feito com os três valores dos parâmetros de potência, frequência e tensão diferentes daqueles utilizados para compor o banco de dados, mas dentro dos limites normativos definidos pelo PRODIST módulo 8 para qualidade da tensão. Nesse ensaio, estavam presentes as componentes harmônicas ímpares de tensão até a 11ª ordem com valores de 0,5% de distorção em cada harmônica, a distorção harmônica total de tensão (THDv) presente foi de 1,12%. A Tabela 22 mostra os valores obtidos das medições e os valores com a aplicação da metodologia de interpolação.

Nesse ensaio, a frequência aplicada está acima dos limites superiores definidos pela NBR 16149, conseqüentemente o inversor reduziu 132 W (8,20%) da potência injetada na rede, conseqüentemente a corrente fundamental também reduziu. Percebe-se que a corrente fundamental interpolada neste ensaio apresentou o mesmo comportamento que a corrente medida, ao exibir um erro de 1,89% na comparação entre os dois valores, em decorrência do processo de interpolação.

Ao comparar os resultados da interpolação com os valores medidos, a corrente harmônica de 3ª ordem foi a que apresentou o maior erro, com 10,81% (12,2 mA), enquanto as demais correntes harmônicas apresentaram erros percentuais inferiores a 8,01% e em termos absolutos abaixo de 9 mA. Vale ressaltar que apesar do maior erro obtido no processo de interpolação, a 3ª harmônica de corrente apresentou, em termos percentuais e absolutos, uma distorção menor que a 9ª e 11ª ordem, tanto para os valores medidos quanto para os valores interpolados, em torno de 7,9% e 8,3%, respectivamente.

O motivo das maiores distorções harmônicas de corrente estarem na 9ª e 11ª harmônica é observado na Figura 33 apresentado no item de definição das harmônicas (capítulo 5.4), onde, as harmônicas de tensão de mais alta ordem (9ª e 11ª) produzem um aumento mais significativo nas harmônicas de corrente da mesma ordem que a tensão que a produz.

Com os resultados deste ensaio, constata-se que a técnica de interpolação proposta cumpre o objetivo proposto no referido trabalho, para este caso.

Tabela 22 – Resultado do ensaio de validação 06

PARÂMETROS		MEDIDO					
Potência [%]		98.00%	1610	[W]			
Frequência [Hz]		60.9					
Tensão [%]		102.27	225.0	[V]			
COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO [%]							
vH3		vH5		vH7	vH9	vH11	
0.50%		0.50%		0.50%	0.50%	0.50%	
COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO [V]							
vH3		vH5		vH7	vH9	vH11	
1.1		1.1		1.1	1.1	1.1	
PARÂMETROS	Distorção [%]	MEDIDO [A]	Distorção [%]	VALORES INTERPOLADOS [A]	ERRO ABSOLUTO [A]	ERRO [%]	
FUNDAMENTAL		6.5718		6.4475	0.124	1.89%	
IH3	1.7%	0.1128	1.9%	0.1250	-0.012	-10.81%	
IH5	5.6%	0.1102	1.8%	0.1190	-0.009	-8.01%	
IH7	4.3%	0.0859	1.4%	0.0914	-0.005	-6.40%	
IH9	7.9%	0.1562	2.4%	0.1550	0.001	0.74%	
IH11	8.3%	0.1646	2.6%	0.1651	0.000	-0.27%	
PARÂMETROS	MEDIDO	VALORES INTERPOLADOS		ERRO ABSOLUTO	ERRO [%]		
FP	1.00	1.000		0.0000	0.00%		
PARÂMETROS	MEDIDO [e]	VALORES INTERPOLADOS [e]		ERRO ABSOLUTO	ERRO [%]		
Φf3	-129.53	-123.23		-6.30	4.86%		
Φf5	158.90	163.33		-4.43	-2.79%		
Φf7	-107.80	-115.70		7.90	-7.33%		
Φf9	162.29	164.59		-2.30	-1.42%		
Φf11	-157.93	-157.54		-0.39	0.25%		

FONTE: O autor (2020).

No sétimo ensaio de validação foram feitos com três parâmetros (potência, frequência e harmônicas de tensão) diferentes daqueles utilizados para compor o banco de dados. Nesse ensaio, estavam presentes as componentes harmônicas ímpares de tensão até a 11ª ordem com valores aleatórios de distorção em cada harmônica, a distorção harmônica total de tensão (THDv) presente foi de 3,0%. A Tabela 23 mostra os valores obtidos com a aplicação da metodologia de interpolação e das medições realizadas no ensaio de validação no inversor.

Ao analisar essa tabela pode-se notar que os parâmetros utilizados neste ensaio possuem algumas características, a potência está com 65% da capacidade de operação do inversor, a frequência está com 60 Hz e foram usados valores aleatórios em todas as harmônicas de tensão.

Ao comparar os resultados da interpolação com os valores medidos, a corrente harmônica de 3ª ordem foi a que apresentou o maior erro, com 17,47%, enquanto as demais correntes harmônicas apresentaram erros inferiores a 6,45%. Apesar do erro resultante da diferença entre o valor medido e interpolado na 3ª harmônica apresentar um valor alto, este erro pode estar relacionado com as condições em que foram feitos os ensaios para constituição do banco de dados e do ensaio de validação. Pois, não

foram identificadas as temperaturas no inversor em nenhum dos ensaios, mas conforme foi apresentado no item de identificação do comportamento da corrente do inversor em função da variação da temperatura (capítulo 5.5), a corrente harmônica de 3ª ordem pode apresentar uma variação de até 9%, dependendo da temperatura registrada durante sua operação.

Percebe-se que apesar da baixa diferença de componente harmônica de tensão da 9ª e 11ª ordem em relação as demais, as correntes harmônicas produzidas pela 9ª e 11ª ordem são mais significativas que as demais distorções, reforçando a observação realizada no ensaio de validação 06 e no item de definição das harmônicas (capítulo 5.4).

Tabela 23 – Resultado do ensaio de validação 07

PARÂMETROS	MEDIDO					
Potência [%]	65.00%		1160 [W]			
Frequência [Hz]	60					
Tensão [%]	100	220.0 [V]				
COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO [%]						
vH3	vH5		vH7	vH9	vH11	
1.30%	1.30%		0.40%	1.80%	1.50%	
COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO [V]						
vH3	vH5		vH7	vH9	vH11	
2.86	2.86		0.88	3.96	3.3	
PARÂMETROS	Distorção [%]	MEDIDO [A]	Distorção [%]	VALORES INTERPOLADOS [A]	ERRO ABSOLUTO [A]	ERRO [%]
FUNDAMENTAL		5.3179		5.2976	0.020	0.38%
IH3	3.4%	0.1831	2.9%	0.1511	0.032	17.47%
IH5	2.4%	0.1269	2.2%	0.1187	0.008	6.44%
IH7	1.6%	0.0868	1.5%	0.0815	0.005	6.09%
IH9	7.2%	0.3810	6.8%	0.3599	0.021	5.56%
IH11	7.3%	0.3904	7.0%	0.3704	0.020	5.12%
PARÂMETROS	MEDIDO	VALORES INTERPOLADOS		ERRO ABSOLUTO	ERRO [%]	
FP	0.99	0.972		0.0176	1.78%	
PARÂMETROS	MEDIDO [°]	VALORES INTERPOLADOS [°]		ERRO ABSOLUTO	ERRO [%]	
Φf3	-98.22	-92.36		-5.86	5.97%	
Φf5	114.46	106.65		7.81	6.82%	
Φf7	-100.47	-85.28		-15.19	15.12%	
Φf9	152.39	150.83		1.56	1.02%	
Φf11	-154.82	-154.18		-0.64	0.42%	

FONTE: O autor (2020).

O oitavo ensaio foi realizado com potência baixa (33%), com frequência de 60,2 Hz e com a tensão eficaz de 225 volts (102,3%), acima da tensão nominal. Foram inseridas apenas duas componentes harmônicas de tensão, sendo elas de 3ª e 5ª ordem, contendo 2% de distorção em cada. A THDv provocada por estas harmônicas foi de 2,82%.

Ao analisar os dados da Tabela 24, observa-se que a corrente harmônica de 3ª ordem apresenta o maior erro de aproximação usando o método de interpolação linear, com 7 mA (4,32%). Apesar da tensão e da frequência serem superiores aos valores nominais do inversor, os erros obtidos pelo processo de interpolação permaneceram baixos, tendo em vista que a frequência está abaixo de 60,5Hz, ou seja, não está operando no ponto em que há dimerização da potência.

Tabela 24 – Resultado do ensaio de validação 08

PARÂMETROS	MEDIDO					
Potência [%]	33.00%	588.92	[W]			
Frequência [Hz]	60.2					
Tensão [%]	102.3	225.1	[V]			
COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO [%]						
vH3	vH5		vH7	vH9	vH11	
2.00%	2.00%		0.00%	0.00%	0.00%	
COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO [V]						
vH3	vH5		vH7	vH9	vH11	
4.4	4.4		0	0	0	
PARÂMETROS	Distorção [%]	MEDIDO [A]	Distorção [%]	VALORES INTERPOLADOS [A]	ERRO ABSOLUTO [A]	ERRO [%]
FUNDAMENTAL		2.7013		2.7326	-0.031	-1.16%
IH3	6.4%	0.1730	6.6%	0.1805	-0.007	-4.32%
IH5	7.1%	0.1914	7.1%	0.1939	-0.003	-1.31%
IH7	2.0%	0.0543	1.9%	0.0527	0.002	2.90%
IH9	1.3%	0.0359	1.3%	0.0361	0.000	-0.54%
IH11	0.8%	0.0216	0.8%	0.0222	-0.001	-2.71%
PARÂMETROS	MEDIDO	VALORES INTERPOLADOS		ERRO ABSOLUTO	ERRO [%]	
FP	0.97	0.972		-0.0020	-0.21%	
PARÂMETROS	MEDIDO [g]	VALORES INTERPOLADOS [g]		ERRO ABSOLUTO	ERRO [%]	
Φf3	-72.21	-76.80		4.59	-6.36%	
Φf5	92.53	90.44		2.09	2.26%	
Φf7	-144.74	-154.77		10.03	-6.93%	
Φf9	-141.11	-157.30		16.19	-11.48%	
Φf11	-140.22	-158.58		18.36	-13.10%	

FONTE: O autor (2020).

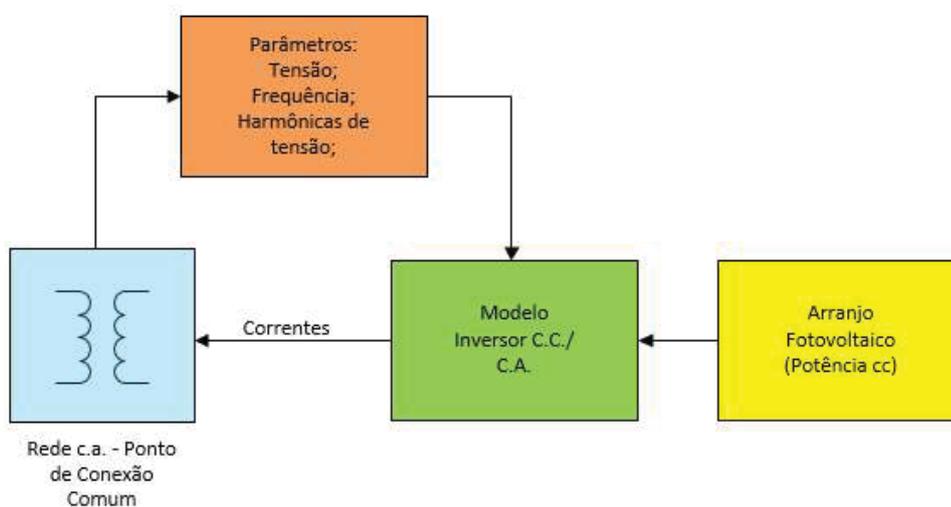
Com os resultados dos ensaios de validação apresentados neste item, foi possível observar que o método de interpolação é preciso mesmo para baixas potências, na presença de harmônicas de tensão em todas as ordens, como também em apenas duas componentes e com valores aleatórios. O maior erro apresentado foi no sétimo ensaio com 17,47% para a harmônica de corrente de 3ª ordem. No entanto, este erro pode ter sido provocado pelo comportamento das correntes harmônicas em função da variação da temperatura mostrada no capítulo 5.5. Diante disto, pode-se concluir em termos gerais que as técnicas propostas, tanto dos ensaios quanto das interpolações, são capazes de representar o comportamento das correntes e dos

ângulos de fase impostos pelas correntes quando o inversor está operando em diversas condições, com a presença de componentes harmônicas de tensão.

#### 6.4 SUGESTÃO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO

A aplicação do método proposto e validado, possibilitará a sua inserção em um sistema de simulação, por exemplo um bloco do *Simulink*, o qual permitirá simular um sistema elétrico conectado ao inversor, como mostra Figura 39. O modelo do inversor corresponde ao *script* criado no Matlab, constituído do banco de dados dos ensaios realizados no inversor real, juntamente com a técnica de interpolação. O bloco do modelo do inversor receberá os dados da irradiação proveniente dos arranjos fotovoltaicos e das condições da rede elétrica no PCC com o inversor. Esse bloco, realizará as interpolações das grandezas elétricas, disponibilizando no PCC os valores interpolados das correntes elétricas, fator de potência e ângulo de fase das correntes harmônicas, que o inversor real produziria operando naquelas condições.

Figura 39 – Sugestão de implementação do inversor no software Matlab/*Simulink*



FONTE: O autor (2020).

## 6.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Com os resultados dos ensaios de validação sem a presença de harmônicas de tensão, os resultados das interpolações se mostraram condizentes com os valores medidos, apresentando erros inferiores a 8,5%, mesmo para potências baixas sem a dimerização da potência. No entanto, foi possível observar que o método de interpolação não é preciso para baixas potências, quando estas são dimerizadas devido ao controle interno do inversor que é atuado quando a frequência da rede está acima de 60,5Hz. Apesar disto, isso não é crítico pelo fato dos valores absolutos das correntes harmônicas serem muito baixas nessa condição de operação. Quando a dimerização ocorreu em potência intermediária o erro apresentado ficou abaixo de 5 mA (20,04%) na harmônica de 11ª ordem, enquanto as demais harmônicas apresentaram erros inferiores a 14,86%.

Com os resultados dos ensaios de validação com a presença de harmônicas de tensão, os resultados das interpolações também se mostraram condizentes com os valores medidos, apresentando valores próximos do que era esperado. No entanto, deve-se atentar para as temperaturas do inversor que pode provocar variações no comportamento das correntes harmônicas, conseqüentemente, pode aumentar o erro ao comparar os valores medidos e interpolados. Também foi possível observar que o método de interpolação é preciso mesmo para baixas potências, na presença de harmônicas de tensão em todas as ordens, como também em apenas duas componentes e com valores aleatórios.

Diante disto, pode-se concluir, em termos gerais, que a técnica proposta para as interpolações é capaz de representar o comportamento das correntes, dos ângulos de fase impostos pelas correntes e pelo fator de potência, se mostrando efetivo, com pequenos erros quando o inversor está operando em diversas condições, com e sem a presença de componentes harmônicas de tensão. Isso permite a implementação deste método em sistemas computacionais, como por exemplo o Matlab/Simulink para simulação do sistema.

## 7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia de ensaios em inversores utilizados em sistema fotovoltaico conectado à rede, de forma que permitisse emular no *software* Matlab o comportamento do inversor por meio de aplicação de técnicas de interpolação.

Para que isto fosse possível, foram realizados 170 ensaios em um inversor monofásico com o objetivo de definir os pontos a serem ensaiados para formar o banco de dados com as informações de operação do inversor. Aplicando a interpolação unidimensional nos dados coletados, tornou-se possível a identificação dos pontos de cada parâmetro que reduzissem o erro, diversas possibilidades foram testadas até encontrar um erro aceitável com a menor quantidade de pontos, para cada parâmetro ensaiado.

Em seguida foram feitas análises dos parâmetros ensaiados, com o objetivo de identificar se havia alguma dependência entre eles, para reduzir o número de variáveis e de ensaios. Foi identificado que as harmônicas de corrente apresentavam variações quando o inversor mudava o valor da potência injetada na rede. Percebeu-se, também, que as harmônicas de tensão produzem harmônicas de corrente na mesma ordem que a da tensão, enquanto as demais harmônicas permaneciam com valores constantes. Demonstrando que harmônicas de correntes têm uma relação direta com as harmônicas de tensão e uma independência com outros parâmetros de ensaio, permitindo reduzir a quantidade de ensaios.

Ao identificar a quantidade de pontos para cada parâmetro elétrico e seus respectivos valores, foi definida uma sequência para realização dos ensaios, onde o inversor foi ensaiado 125 vezes, contemplando em cada ensaio as variações da potência, tensão, frequência e harmônicas de tensão. Criou-se, assim, o banco de dados que foi inserido no Matlab para aplicação do método de interpolação multidimensional, obtendo como resultado os valores do fator de potência e os ângulos de fase das correntes harmônicas.

A validação foi realizada comparando os resultados da interpolação com ensaios aleatórios. O método mostrou ser efetivo, apresentando erros aceitáveis quando o inversor está operando em diversas condições da rede e de irradiância solar (potência cc). Demonstrando que é possível implementar este método em um bloco do *Simulink* ou outro *software* de simulação, permitindo de forma efetiva e com

pequenos erros, a simulação do comportamento da rede que contenha o inversor ensaiado.

Como trabalhos futuros, pode-se elencar:

- Automatizar os equipamentos do laboratório de geração distribuída para realizar os ensaios automaticamente, reduzindo o tempo d(homem/hora) para a realização de ensaio em inversores fotovoltaicos;
- Ampliar os estudos realizados submetendo essa técnica em outros inversores;
- Implementar o banco e dados e a técnica de interpolação no Matlab/*Simulink* para simular o comportamento da rede que contemple o inversor ensaiado.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16149**: Sistemas fotovoltaicos (FV) - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ALMEIDA NETO, J. C. de S. **Avaliação de conformidade de inversores para micro e mini geração fotovoltaica**: a implementação da NBR 16150 e NBR IEC 62116. 141 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Energia e Ambiente. Universidade de São Paulo, 2017. Disponível em: Energia, Instituto D E%0Alee, E Ambiente%0AFotovoltaica, Geração%0ADa, A Implantação%0ANbr, N B R E.

ANEEL. **Banco de Informações de Geração, Matriz de Energia Elétrica**. 2018. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoizjM4NjM0OWYtN2IwZS00YjViLTlIMjltN2E5MzBkN2ZlMzVklwidC16JjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSlsMiOjR9>. Acesso em: 14 nov. 2018.

ANWARI, M. *et al.* Power quality analysis of grid-connected photovoltaic system with adjustable speed drives. *In*: 1st IEEE-PES/IAS Conference on Sustainable Alternative Energy, SAE 2009 - **Proceedings**, p. 1–5, 2009.

BERTOLANI, M. N. **Funções de base radial de suporte global e compacto na aproximação de superfícies**. 2010. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010. Disponível em: [http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/4141/1/tese\\_4264\\_vers%c3%a3o%20final%20MARCOS%20N%20BERTOLANI.pdf](http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/4141/1/tese_4264_vers%c3%a3o%20final%20MARCOS%20N%20BERTOLANI.pdf). Acesso em: 10 out. 2020.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. **Portaria n.º 357, de 01 de agosto de 2014**. Adequação aos Requisitos de Avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para Energia Fotovoltaica. 2014. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002145.pdf>. Acesso em: 10 out. 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional 2017**: Ano base 2016 / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2017, p. 296.

BRASIL. **Portal de Periódicos CAPES/MEC**. Disponível em: <http://www.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 10 out. 2020.

CAMPOS, I. de O. **Análise de técnicas para estabelecimento de modelos digitais de terrenos - DTM**. 1994. Dissertação (Mestrado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidad de São Paulo, São Carlos, 1995. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-13042018-184144/es.php>. Acesso em: 10 out. 2020.

CHICCO, G.; SCHLABBACH, J.; SPERTINO, F. Experimental assessment of the waveform distortion in grid-connected photovoltaic installations. **Solar Energy**, v. 83, n. 7, p. 1026–1039, 2009. Elsevier Ltd.

ELKHOLY, A. *et al.* Experimental evaluation of 8 kW grid-connected photovoltaic system in Egypt. **Journal of Electrical Systems and Information Technology**, v. 3, n. 2, p. 217–229, 2016. Elsevier B.V.

ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R.; PINTO, H. M. Processo de investigação e análise bibliométrica: avaliação da qualidade dos serviços bancários. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 17, n. 3, p. 325–349, 2013.

FARINA, L. A.; POSSER, M. S. **MATLAB**: Ferramenta matemática para Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul Disponível em: [https://www.academia.edu/34387716/MATLAB\\_Ferramenta\\_matem%C3%A1tica\\_para\\_Engenharia](https://www.academia.edu/34387716/MATLAB_Ferramenta_matem%C3%A1tica_para_Engenharia). Acesso em: 30 out. 2020.

GÖRBE, P. *et al.* Experimental study of the nonlinear distortion caused by domestic power plants. **Applied Thermal Engineering**, v. 70, n. 2, p. 1288–1293. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2014.

GRANJA, A. V. *et al.* Study of power quality at the point of common coupling of a low voltage grid and a distributed generation system of 7.8 kWp in a tropical region. **Energies**, v. 11, n. 6, 2018.

DAL MOLIN, G. D. *et al.* **Impacto da Geração Fotovoltaica na Qualidade de Energia de uma Empresa**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

KARIMI, M. *et al.* Photovoltaic penetration issues and impacts in distribution network – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, n. C, p. 594–605. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2016.

KASSMAYER, K.; FRAXE NETO, H. J. **A Entrada em Vigor do Acordo de Paris: o que muda para o Brasil**. Senado Federal. Brasília/DF, 2016.

MORENO, H. **Procobre**. 1. ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Cobre, 2001.

NEMES, C.; MUNTEANU, F.; ASTANEI, D. Analysis of grid-connected photovoltaic system integraton on low-voltage distribution network. **Journal of Sustainable Energy**, v. 7, n. 1, p. 9–14, 2016. University of Oradea. Disponível em: <https://doaj.org/article/0ed37819b0ab42f78f755165fe26ca6a>. Acesso em: 10 out 2020.

P. ALVES, R. M. de AZEVEDO, L. N. CANHA, PAXÃO, J. L. Minimization of the Impacts Caused by Distributed Generation to the Electric System by Exploring the Reactive Control Range of Solar Inverters. *In*: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (SBSE). Niterói, Brasil, 2018.

PINTO, R. J. C.; MARIANO, P. S. J.; CALADO, M. D. R. A. Power quality experimental analysis on rural home grid-connected PV systems. **International Journal of Photoenergy**, v. 2015, Londres, 2015.

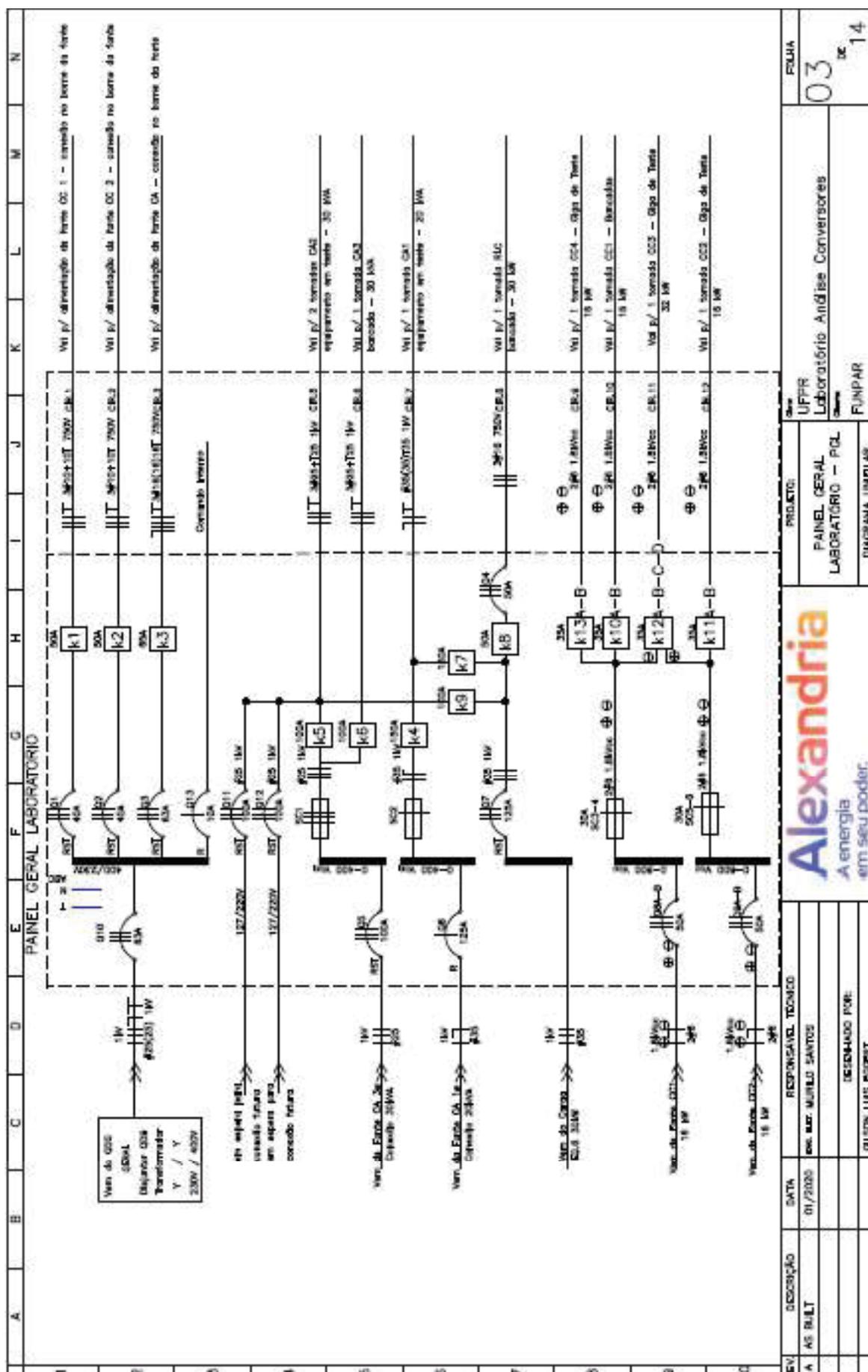
RAMPINELLI, G. A. *et al.* Assessment and mathematical modeling of energy quality parameters of grid connected photovoltaic inverters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 133–141. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2015.

SEME, S. *et al.* Power quality experimental analysis of grid-connected photovoltaic systems in urban distribution networks. **Energy**, v. 139, 2017. Oxford: Elsevier BV. Disponível em: <http://search.proquest.com/docview/1968402299/>. Acesso em: 10 out. 2020.

URBANETZ JUNIOR, J. **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas**: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010. Disponível em: [http://fotovoltaica.ufsc.br/Teses/Tese\\_Jair\\_Urbanetz\\_Junior.pdf](http://fotovoltaica.ufsc.br/Teses/Tese_Jair_Urbanetz_Junior.pdf). Acesso em: 10 out. 2020.

WONG, J. *et al.* Grid-connected photovoltaic system in Malaysia: A review on voltage issues. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, Amsterdam: Elsevier B.V., 2014.

APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DO PAINEL GERAL DO LABORATÓRIO



## APÊNDICE B – SCRIPT PARA CRIAÇÃO DAS MATRIZES MULTIDIMENSIONAIS, INTERPOLAÇÃO UNIDIMENSIONAL E MULTIDIMENSIONAL

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Universidade Federal do Paraná
% Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
% Implementação de matrizes e métodos de interpolação multidimensionais
% Orientador Prof. Dr. João Américo Vilela Junior
% Data: 30/10/2020

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Aluno: Carlos André Fiuza
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

close all %Fecha todas as abas do Matlab abertas
clear all %Limpa as variáveis
clc %Limpa a Command Window

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% valores ensaiados
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

v=[80,92,100,108.6,109.1];% Proporção da tensão nominal |ensaida em [%]
f=[58,60.50,61.2,61.9]; % Frequências ensaidas [Hz]
p=[20,25,40,90,95,100]; % Potências ensaidas [%]
aux_h3=[0]; % Limite distorção harmônica de tensão H3 [V]
aux_h5=[0]; % Limite distorção harmônica de tensão H5 [V]
aux_h7=[0]; % Limite distorção harmônica de tensão H7 [V]
aux_h9=[0]; % Limite distorção harmônica de tensão H9 [V]
aux_h11=[0]; % Limite distorção harmônica de tensão H11 [V]
cont=0; % Contador inicial do nº de ensaios realizados

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Carregamento dos arquivos ensaidos z representa o
%tamanho do vetor da potência. (y)representa o
%tamanho do vetor da frequência. (t3)até (t11)
%representa o tamanho do vetor das harmonicas de
%tensão. (x) representa do tamanho do vetor da tensão.

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for z=1:6
    for y=1:1:4
        for x=1:5

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Converte os números em String para poder carregar os arquivos ensaiados
% ao dar o comando "importadata"
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

a=num2str(v(x)); % Converte Num. em String da tensão
b=num2str(f(y)); % Converte Num. em String da frequência
c=num2str(p(z)); % Converte Num. em String da potência
d3=num2str(0); % Converte Num. em String da H3
d5=num2str(0); % Converte Num. em String da H5

```

```
d7=num2str(0); % Converte Num. em String da H7
d9=num2str(0); % Converte Num. em String da H9
d11=num2str(0); % Converte Num. em String da H11
aux=importdata(['P',c,'_F',b,'_T',a,'_H3_',d3,'_H5_',d5,'_H7_',d7,
'_H9_',d9,'_H11_',d11,'.fpq.txt']); % Carrega o arquivo
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Carregando a variáveis multidimensionais da corrente fundamental e harmônicas
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
i1(x,y,z)=mean(aux.data(:,2));% media da corrente fundamental
i1(x,y,z)=mean(aux.data(:,2));% media da corrente fundamental para extrapolar
aux1=mean(aux.data(:,2)); % media da corrente fundamental para
% cálculo corrente harmônica
fpa(x,y,z)= mean(aux.data(:,7)); % Carrega o Fator de Potência
thdi(x,y,z)= mean(aux.data(:,108)); % Carrega THDI [%]
i3(x,y,z)=aux1*(mean(aux.data(:,111)/100)); % media da corrente H3 [A]
i5(x,y,z)=aux1*(mean(aux.data(:,113)/100)); % media da corrente H5 [A]
i7(x,y,z)=aux1*(mean(aux.data(:,115)/100)); % media da corrente H7 [A]
i9(x,y,z)=aux1*(mean(aux.data(:,117)/100)); % media da corrente H9 [A]
i11(x,y,z)=aux1*(mean(aux.data(:,119)/100));% media da corrente H11 [A]
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Ângulo de fase
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
if3(x,y,z)=mean(aux.data(:,161)); % Angulo de fase H3 [A]
if5(x,y,z)=mean(aux.data(:,163)); % Angulo de fase H5 [A]
if7(x,y,z)=mean(aux.data(:,165)); % Angulo de fase H7 [A]
if9(x,y,z)=mean(aux.data(:,167)); % Angulo de fase H9 [A]
if11(x,y,z)=mean(aux.data(:,169));% Angulo de fase H11[A]
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Condição e limite da corrente para usar extrapolação
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
if mean(aux.data(:,2))>=8.447
    i1(x,y,z)=(-0.086839*v(x))+16.257337; % (9.3102) Função para carregar
    % a corrente extrapolada
```

```
end
```



```
ih9= interpn(V,F,P,i9,dig_ten1,dig_freq,dig_pot,'linear');
ih11= interpn(V,F,P,i11,dig_ten1,dig_freq,dig_pot,'linear');
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Interpolação tridimensional das fases
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
ANG3= interpn(V,F,P,if3,dig_ten1,dig_freq,dig_pot,'linear');
ANG5= interpn(V,F,P,if5,dig_ten1,dig_freq,dig_pot,'linear');
ANG7= interpn(V,F,P,if7,dig_ten1,dig_freq,dig_pot,'linear');
ANG9= interpn(V,F,P,if9,dig_ten1,dig_freq,dig_pot,'linear');
ANG11= interpn(V,F,P,if11,dig_ten1,dig_freq,dig_pot,'linear');
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Interpolação do THDI e FP
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
THDI= interpn(V,F,P,thdi,dig_ten1,dig_freq,dig_pot,'linear');
fp= interpn(V,F,P,fpa,dig_ten1,dig_freq,dig_pot,'linear');
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Substituir valor da corrente no caso de saturação
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
if ih1<8.448
    ih1=ih1;
else
    ih1=8.447;
end
else
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Realiza a interpolação quando estiver presente harmônicas de tensão
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% INTERPOLA NAS POTENCIAS MAIORES OU IGUAL A 66%
% CONTENDO HARMÔNICAS DE TENSÃO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
if dig_pot>66
    if (H3V>0.2)
        h3=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];
```

```

aux_3=[0.1325 0.125 0.1284 0.1411 0.1599 0.1864 0.2173 0.25 0.2852...
0.3225 0.3579 0.3994 0.4337 0.4765 0.5154 0.5479];
ih3=interp1(h3,aux_3,H3V,'linear');
auxf_3=[-123.25 -123.23 -106.94 -92.40 -79.81 -71.11 -65.16 -59.75...
-55.64 -52.18 -50.26 -47.47 -46.50 -44.41 -43.09 -42.69];
ANG3=interp1(h3,auxf_3,H3V,'linear');
aux_fp3=[1.00 1.00 1.00 0.99 0.99 0.99 0.98 0.98 0.97 0.96 0.96 0.95...
0.94 0.93 0.92 0.91];
fp3=interp1(h3,aux_fp3,H3V,'linear');
else
ih3=0.1325;
ANG3=-138.94;
fp3=1;
end

if (H5V>0.2)

h5=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];
aux_5=[0.1354 0.119 0.1303 0.163 0.2147 0.2666 0.3105 0.3653 0.4212...
0.4819 0.5373 0.6045 0.6582 0.7286 0.7933 0.8469];
ih5=interp1(h5,aux_5,H5V,'linear');
auxf_5=[163.5 163.33 136.56 117.33 103.77 96.73 93.13 89.93 87.60...
85.63 84.01 82.75 81.69 80.88 80.14 79.47];
ANG5=interp1(h5,auxf_5,H5V,'linear');
aux_fp5=[1.00 1.00 1.00 0.99 0.99 0.99 0.98 0.98 0.97 0.96 0.96 0.95...
0.94 0.93 0.92 0.91];
fp5=interp1(h5,aux_fp5,H5V,'linear');
else
ih5=0.1354;
ANG5=-170.84;
fp5=1;
end

if (H7V>0.2)

h7=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];
aux_7=[0.09391 0.09141 0.1492 0.225 0.3106 0.3958 0.4752 0.5622...
0.6497 0.7408 0.8273 0.9251 1.008 1.11 1.206 1.289];
ih7=interp1(h7,aux_7,H7V,'linear');
auxf_7=[-116 -115.70 -85.00 -72.94 -65.78 -62.47 -61.07 -59.19 -57.82...
-56.69 -56.09 -55.21 -54.90 -54.16 -53.72 -53.59];
ANG7=interp1(h7,auxf_7,H7V,'linear');
aux_fp7=[1.00 1.00 1.00 0.99 0.99 0.99 0.98 0.98 0.97 0.96 0.96 0.95...
0.94 0.93 0.92 0.91];
fp7=interp1(h7,aux_fp7,H7V,'linear');
else
ih7=0.09391;
ANG7=-170.06;
fp7=1;
end

if (H9V>0.2)

h9=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];

```

```

aux_9=[0.07037 0.155 0.2477 0.3419 0.4475 0.5455 0.6283 0.7263 0.8241...
0.9275 1.02 1.133 1.222 1.34 1.449 1.536];
ih9=interp1(h9,aux_9,H9V,'linear');
auxf_9=[165 164.59 157.94 155.05 153.15 152.12 151.58 151.15 150.83...
150.40 150.20 149.81 149.71 149.37 149.15 149.09];
ANG9=interp1(h9,auxf_9,H9V,'linear');
aux_fp9=[1.00 1.00 1.00 0.99 0.99 0.99 0.98 0.98 0.97 0.96 0.96 0.95...
0.94 0.93 0.92 0.91];
fp9=interp1(h9,aux_fp9,H9V,'linear');
else
ih9=0.07037;
ANG9=-171.21;
fp9=1;
end

if (H11V>0.2)

h11=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];
aux_11=[0.04757 0.1651 0.2825 0.4008 0.5319 0.6537 0.7555 0.8731...
0.9924 1.12 1.238 1.379 1.49 1.635 1.768 1.878];
ih11=interp1(h11,aux_11,H11V,'linear');
auxf_11=[-166.46 -157.54 -156.05 -155.47 -155.57 -155.24 -154.75...
-154.64 -154.58 -154.56 -154.55 -154.48 -154.50 -154.38...
-154.30 -154.29];
ANG11=interp1(h11,auxf_11,H11V,'linear');
aux_fp11=[1.00 1.00 1.00 0.99 0.99 0.99 0.98 0.98 0.97 0.96 0.96...
0.95 0.94 0.93 0.92 0.91];
fp11=interp1(h11,aux_fp11,H11V,'linear');
else
ih11=0.04757;
ANG11=-166.46;
fp11=1;
end
fp=(fp3+fp5+fp7+fp9+fp11)/5;
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% INTERPOLA NAS POTÊNCIAS MAIORES OU IGUAL A 31% E MENOR QUE 66%
% CONTENDO HARMÔNICAS DE TENSÃO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

if dig_pot>30 && dig_pot<66

if (H3V>0.2)

h3=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];
aux_3=[0.1351 0.1322 0.1412 0.1577 0.1805 0.2062 0.2407 0.2764 0.3153...
0.3585 0.402 0.4546 0.5395 0.6625 0.7896 0.953];
ih3=interp1(h3,aux_3,H3V,'linear');
auxf_3=[-115.8 -115.74 -100.44 -86.97 -76.80 -68.77 -62.64 -57.86...
-53.93 -50.86 -48.31 -46.31 -45.50 -45.86 -46.29 -47.36];
ANG3=interp1(h3,auxf_3,H3V,'linear');

```

```

    aux_fp3=[0.98 0.98 0.98 0.97 0.96 0.94 0.93 0.91 0.89 0.87 0.85 0.83...
            0.80 0.78 0.75 0.73];
    fp3=interp1(h3,aux_fp3,H3V,'linear');
else
    ih3=0.1351;
    ANG3=-132.22;
    fp3=0.98;
end

if (H5V>0.2)

    h5=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];
    aux_5=[0.08627 0.06744 0.09042 0.1376 0.1939 0.2554 0.3141 0.3798...
           0.4505 0.522 0.5987 0.6851 0.8074 0.973 1.144 1.348];
    ih5=interp1(h5,aux_5,H5V,'linear');
    auxf_5=[157.50 157.40 117.79 99.22 90.44 85.67 82.62 80.45 78.95...
            77.77 76.90 76.29 75.84 75.33 74.81 74.20];
    ANG5=interp1(h5,auxf_5,H5V,'linear');
    aux_fp5=[0.98 0.98 0.98 0.97 0.96 0.94 0.93 0.91 0.89 0.87 0.85 0.83 ...
            0.80 0.78 0.75 0.73];
    fp5=interp1(h5,aux_fp5,H5V,'linear');
else
    ih5=0.08627;
    ANG5=-160.67;
    fp5=0.98;
end

if (H7V>0.2)

    h7=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];
    aux_7=[0.05268 0.0887 0.1667 0.2514 0.3397 0.4324 0.5263 0.625 0.7286...
           0.8343 0.9454 1.061 1.18 1.303 1.426 1.546];
    ih7=interp1(h7,aux_7,H7V,'linear');
    auxf_7=[-85.30 -85.27 -68.34 -62.14 -58.97 -56.75 -55.50 -54.59...
            -53.84 -53.35 -52.95 -52.95 -54.34 -57.08 -59.29 -62.33];
    ANG7=interp1(h7,auxf_7,H7V,'linear');
    aux_fp7=[0.98 0.98 0.98 0.97 0.96 0.94 0.93 0.91 0.89 0.87 0.85 0.83...
            0.80 0.78 0.75 0.73];
    fp7=interp1(h7,aux_fp7,H7V,'linear');
else
    ih7=0.05268;
    ANG7=-154.77;
    fp7=0.98;
end

if (H9V>0.2)

    h9=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];
    aux_9=[0.03613 0.1162 0.2067 0.3013 0.3989 0.5018 0.6031 0.7106...
           0.8243 0.9399 1.063 1.186 1.289 1.373 1.456 1.517];
    ih9=interp1(h9,aux_9,H9V,'linear');
    auxf_9=[161.05 161.02 154.27 151.74 150.23 149.36 148.92 148.47...
            148.16 147.90 147.70 147.39 146.67 145.81 145.38 144.95];
    ANG9=interp1(h9,auxf_9,H9V,'linear');

```

```

        aux_fp9=[0.98 0.98 0.98 0.97 0.96 0.94 0.93 0.91 0.89 0.87 0.85 0.83...
                0.80 0.78 0.75 0.73];
        fp9=interp1(h9,aux_fp9,H9V,'linear');
else
    ih9=0.03613;
    ANG9=-157.30;
    fp9=0.98;
end

if (H11V>0.2)

    h11=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];
    aux_11=[0.02216 0.138 0.2526 0.3704 0.4911 0.6162 0.7396 0.8713 1.011...
            1.152 1.302 1.462 1.635 1.824 2.007 2.193];
    ih11=interp1(h11,aux_11,H11V,'linear');
    auxf_11=[-154.8 -154.60 -154.25 -154.18 -154.08 -153.95 -153.79...
            -153.73 -153.73 -153.75 -153.74 -153.99 -155.18 -157.30...
            -158.95 -160.98];
    ANG11=interp1(h11,auxf_11,H11V,'linear');
    aux_fp11=[0.98 0.98 0.98 0.97 0.96 0.94 0.93 0.91 0.89 0.87 0.85...
            0.83 0.80 0.78 0.75 0.73];
    fp11=interp1(h11,aux_fp11,H11V,'linear');
else
    ih11=0.02216;
    ANG11=-158.58;
    fp11=0.98;
end
fp=(fp3+fp5+fp7+fp9+fp11)/5;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% INTERPOLA NAS POTENCIAS MAIORES OU IGUAL A 23% E MENOR QUE 31%
% CONTENDO HARMÔNICAS DE TENSÃO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if dig_pot>22 && dig_pot<31

    if (H3V>0.2)

        h3=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];
        aux_3=[0.1074 0.1096 0.1216 0.1419 0.1699 0.2066 0.244 0.2877 0.336...
                0.3881 0.4431 0.5012 0.5753 0.6762 0.7808 0.8793];
        ih3=interp1(h3,aux_3,H3V,'linear');
        auxf_3=[-106.60 -106.50 -90.25 -76.74 -66.81 -59.90 -53.97 -49.74...
                -46.23 -42.90 -40.52 -38.08 -36.76 -37.19 -37.19 -36.84];
        ANG3=interp1(h3,auxf_3,H3V,'linear');
        aux_fp3=[0.95 0.95 0.94 0.92 0.90 0.88 0.85 0.82 0.79 0.75 0.72 0.69...
                0.66 0.64 0.61 0.59];
        fp3=interp1(h3,aux_fp3,H3V,'linear');
    else
        ih3=0.1074;
        ANG3=-123.56;
    end
end

```

```

    fp3=0.95;
end

if (H5V>0.2)

    h5=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];
    aux_5=[0.06067 0.04052 0.07824 0.1349 0.1981 0.2598 0.3344 0.4104...
           0.4936 0.5873 0.6809 0.7883 0.9193 1.057 1.221 1.379];
    ih5=interp1(h5,aux_5,H5V,'linear');
    auxf_5=[150 149.97 102.66 89.00 83.29 80.12 78.30 77.01 76.21 75.61...
            75.14 74.79 74.51 74.27 73.93 73.59];
    ANG5=interp1(h5,auxf_5,H5V,'linear');
    aux_fp5=[0.95 0.95 0.94 0.92 0.90 0.88 0.85 0.82 0.79 0.75 0.72 0.69...
             0.66 0.64 0.61 0.59];
    fp5=interp1(h3,aux_fp5,H5V,'linear');
else
    ih5=0.06067;
    ANG5=-146.59;
    fp5=0.95;
end

if (H7V>0.2)

    h7=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];
    aux_7=[0.03164 0.09048 0.1741 0.2627 0.3564 0.4536 0.5616...
           0.6735 0.7922 0.9235 1.056 1.202 1.351 1.495 1.651 1.809];
    ih7=interp1(h7,aux_7,H7V,'linear');
    auxf_7=[-72.05 -72.01 -61.65 -57.53 -55.36 -54.14 -53.03 -52.54...
            -52.17 -51.77 -51.61 -51.32 -51.68 -53.16 -54.14 -54.64];
    ANG7=interp1(h7,auxf_7,H7V,'linear');
    aux_fp7=[0.95 0.95 0.94 0.92 0.90 0.88 0.85 0.82 0.79 0.75 0.72 0.69...
             0.66 0.64 0.61 0.59];
    fp7=interp1(h7,aux_fp7,H7V,'linear');
else
    ih7=0.03164;
    ANG7=-143.79;
    fp7=0.95;
end

if (H9V>0.2)

    h9=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];
    aux_9=[0.01678 0.1002 0.1915 0.2879 0.3899 0.4941 0.613 0.734 0.8641...
           1.009 1.157 1.324 1.484 1.616 1.772 1.94];
    ih9=interp1(h9,aux_9,H9V,'linear');
    auxf_9=[155 154.89 150.90 149.60 148.67 148.54 148.18 148.10 148.12...
            148.06 148.15 148.22 148.10 147.83 147.78 147.95];
    ANG9=interp1(h9,auxf_9,H9V,'linear');
    aux_fp9=[0.95 0.95 0.94 0.92 0.90 0.88 0.85 0.82 0.79 0.75 0.72 0.69...
             0.66 0.64 0.61 0.59];
    fp9=interp1(h9,aux_fp9,H9V,'linear');
else
    ih9=0.01678;
    ANG9=-162.60;
end

```

```

    fp9=0.95;
end

if (H11V>0.2)

    h11=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];
    aux_11=[0.01004 0.1199 0.2338 0.3533 0.4794 0.607 0.7507 0.8979 1.056...
            1.231 1.408 1.607 1.813 2.019 2.247 2.474];
    ih11=interp1(h11,aux_11,H11V,'linear');
    auxf_11=[-152.65 -154.86 -153.57 -153.28 -153.11 -152.95 -152.86...
            -152.77 -152.72 -152.72 -152.70 -152.73 -153.17 -154.35...
            -155.31 -155.86];
    ANG11=interp1(h11,auxf_11,H11V,'linear');
    aux_fp11=[0.95 0.95 0.94 0.92 0.90 0.88 0.85 0.82 0.79 0.75 0.72 0.69...
            0.66 0.64 0.61 0.59];
    fp11=interp1(h11,aux_fp11,H11V,'linear');
else
    ih11=0.01004;
    ANG11=-152.65;
    fp11=0.95;
end
fp=(fp3+fp5+fp7+fp9+fp11)/5;
end
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% POTENCIA MAIOR OU IGUAL A 20 % E MENOR QUE 23 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

if dig_pot>19 && dig_pot<23

    if (H3V>0.2)

        h3=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];
        aux_3=[0.1074 0.1096 0.1216 0.1419 0.1699 0.2066 0.244 0.2877 0.336...
              0.3881 0.4431 0.5012 0.5753 0.6762 0.7808 0.8793];
        ih3=interp1(h3,aux_3,H3V,'linear');
        auxf_3=[-101 -100.88 -85.17 -71.83 -61.72 -54.03 -48.41 -44.08...
              -40.68 -37.82 -35.45 -33.47 -32.14 -31.49 -31.33 -31.15];
        ANG3=interp1(h3,auxf_3,H3V,'linear');
        aux_fp3=[0.91 0.91 0.90 0.88 0.85 0.82 0.78 0.75 0.71 0.68 0.65 0.62...
              0.59 0.57 0.54 0.52];
        fp3=interp1(h3,aux_fp3,H3V,'linear');
    else
        ih3=0.1074;
        ANG3=-118.33;
        fp3=0.91;
    end

    if (H5V>0.2)

        h5=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];

```

```

aux_5=[0.06067 0.04052 0.07824 0.1349 0.1981 0.2598 0.3344 0.4104...
0.4936 0.5873 0.6809 0.7883 0.9193 1.057 1.221 1.379];
ih5=interp1(h5,aux_5,H5V,'linear');
auxf_5=[133.15 133.12 94.11 84.82 80.68 78.66 77.38 76.40 75.76 75.17...
74.65 74.13 73.60 73.24 72.86 72.56];
ANG5=interp1(h5,auxf_5,H5V,'linear');
aux_fp5=[0.91 0.91 0.90 0.88 0.85 0.82 0.78 0.75 0.71 0.68 0.65 0.62...
0.59 0.57 0.54 0.52];
fp5=interp1(h5,aux_fp5,H5V,'linear');
else
ih5=0.06067;
ANG5=-139.94;
fp5=0.91;
end

if (H7V>0.2)

h7=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];
aux_7=[0.03164 0.09048 0.1741 0.2627 0.3564 0.4536 0.5616 0.6735...
0.7922 0.9235 1.056 1.202 1.351 1.495 1.651 1.809];
ih7=interp1(h7,aux_7,H7V,'linear');
auxf_7=[-64.3 -64.18 -57.86 -55.32 -54.24 -53.23 -52.62 -52.15 -51.75...
-51.40 -51.09 -50.80 -50.72 -51.13 -51.74 -52.19];
ANG7=interp1(h7,auxf_7,H7V,'linear');
aux_fp7=[0.91 0.91 0.90 0.88 0.85 0.82 0.78 0.75 0.71 0.68 0.65 0.62...
0.59 0.57 0.54 0.52];
fp7=interp1(h7,aux_fp7,H7V,'linear');
else
ih7=0.03164;
ANG7=-152.28;
fp7=0.91;
end

if (H9V>0.2)

h9=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];
aux_9=[0.01678 0.1002 0.1915 0.2879 0.3899 0.4941 0.613 0.734 0.8641...
1.009 1.157 1.324 1.484 1.616 1.772 1.94];
ih9=interp1(h9,aux_9,H9V,'linear');
auxf_9=[150.65 150.56 149.15 148.90 148.74 148.66 148.69 148.73...
148.85 148.96 149.10 149.35 149.63 149.62 149.66 149.77];
ANG9=interp1(h9,auxf_9,H9V,'linear');
aux_fp9=[0.91 0.91 0.90 0.88 0.85 0.82 0.78 0.75 0.71 0.68 0.65 0.62...
0.59 0.57 0.54 0.52];
fp9=interp1(h9,aux_fp9,H9V,'linear');
else
ih9=0.01678;
ANG9=-191.16;
fp9=0.91;
end

if (H11V>0.2)

h11=[0 1.1 2.2 3.3 4.4 5.5 6.6 7.7 8.8 9.9 11 12.1 13.2 14.3 15.4 16.5];

```

