

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PAULA ANGÉLICA DE ARAÚJO

**APROFUNDAMENTO EM TÉCNICAS DE LEVANTAMENTO DE RESPOSTA EM
FREQUÊNCIA DE TP_s**

Uberlândia

2023

PAULA ANGÉLICA DE ARAÚJO

**APROFUNDAMENTO EM TÉCNICAS DE LEVANTAMENTO DE RESPOSTA EM
FREQUÊNCIA DE TPs**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Ivan Nunes Santos

Coorientadora: Bárbara Morais Giancesini

Uberlândia

2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

A663 Araújo, Paula Angélica de, 1999-
2023 APROFUNDAMENTO EM TÉCNICAS DE LEVANTAMENTO
DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE TPs [recurso eletrônico] /
Paula Angélica de Araújo. - 2023.

Orientador: Ivan Nunes Santos .
Coorientadora: Bárbara Morais Giancesini.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em
Engenharia Elétrica.
Modo de acesso: Internet.
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia elétrica. I. , Ivan Nunes Santos,1979-,
(Orient.). II. Giancesini, Bárbara Morais,1994-,
(Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia.
Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

PAULA ANGÉLICA DE ARAÚJO

**APROFUNDAMENTO EM TÉCNICAS DE LEVANTAMENTO DE RESPOSTA EM
FREQUÊNCIA DE TPs**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Uberlândia, 19 de junho de 2023

Banca Examinadora:

Ivan Nunes Santos – Prof. Doutor (UFU)

Bárbara Morais Giancesini – Mestre (UFU)

Raquel Cristina Filiagi Gregory – Prof. Doutora (UFC)

Dedico este trabalho a mim, Paula, que tive determinação e persistência de chegar até aqui.

À minha tia, Vera, e ao meu pai, Paulo, por sempre me apoiarem e terem confiança nos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a mim, por não desistir em meio aos desafios que cada semestre da graduação apresentou. Reconheço o meu comprometimento necessário para concluir esta etapa da minha vida acadêmica.

Agradeço à minha tia, Vera, e ao meu pai, Paulo, que sempre acreditaram no meu potencial e sempre confiaram nas minhas escolhas. Eles me deram toda a rede de apoio para estudar e foram o meu porto seguro durante todos os momentos.

Agradeço, também, ao meu irmão Danilo, à minha cunhada Cristiane e às minhas sobrinhas, Raquel e Giovanna, por todo o apoio, incentivo e amizade.

Às minhas amigas, Lana e Larissa, que compartilham comigo o mesmo interesse pela engenharia, agradeço por fazerem parte da minha trajetória acadêmica, fazendo com que a graduação tivesse mais leveza.

Agradeço ao meu orientador, Ivan Nunes Santos, por toda a atenção durante o desenvolvimento do trabalho e pela confiança para que esta pesquisa pudesse ser concluída.

Agradeço, em especial, à minha coorientadora Bárbara Morais Giancesini, um grande exemplo de engenheira para mim, com quem pude contar durante todo o período do trabalho.

“Que ninguém se engane, só consigo a
simplicidade através de muito trabalho.”

(Clarice Lispector, 1977)

RESUMO

Com a crescente utilização de equipamentos não lineares, surge também a preocupação a respeito do comportamento do sistema elétrico de potência diante das possíveis distorções harmônicas causadas por estas cargas e seus respectivos efeitos. Assim, são desenvolvidos estudos a respeito de técnicas de medição e de quantificação dessas distorções harmônicas no contexto de campanhas de medição de indicadores de Qualidade da Energia Elétrica. Ao se tratar de sistemas de medição, pode ser necessário o uso de transdutores de potencial (TPs), a depender do nível de tensão a ser medido. Entretanto sabe-se que alguns tipos de TPs podem não apresentar resposta linear ao longo do espectro de frequência. Sendo o transformador de potencial indutivo um equipamento amplamente utilizado para este fim, tem-se que os estudos para o levantamento da resposta em frequência desse elemento são de grande relevância, pois é conhecido na literatura que as distorções harmônicas podem ter impacto sobre a precisão de suas medições. Como existem vários procedimentos propostos para a realização do teste de resposta em frequência, o presente trabalho busca realizar dois dos procedimentos encontrados nas normativas brasileiras, a fim de analisar as principais diferenças entre os procedimentos dos ensaios, e os resultados obtidos a partir deles. Nesse contexto, o primeiro procedimento consiste na alimentação do primário do TPI com uma tensão harmônica menor do que o seu valor nominal. Já o segundo procedimento é caracterizado pela aplicação da tensão fundamental nominal acrescida de componentes harmônicas. Da realização dos ensaios, foram levantadas as curvas de resposta em frequência, onde foi verificado que os resultados obtidos pelos ensaios apresentaram divergências entre si, sendo que a resposta do TPI a partir do ensaio com a tensão fundamental acrescida de componentes harmônicas se mostrou com características não lineares, violando os limites para instrumentos de maior precisão sugeridos pela IEC/TR 61869-103 para algumas ordens harmônicas. Já o ensaio com uma tensão menor do que a nominal se manteve entre os limites sugeridos. Dessa forma, conclui-se a necessidade de executar o ensaio que considera a presença de tensão fundamental nominal apesar de sua maior dificuldade de realização em campo, uma vez que ele leva a resultados mais precisos ao longo do espectro harmônico, mostrando os reais impactos da não linearidade dos transformadores de potencial indutivo.

Palavras-chave: Não linearidade; resposta em frequência; distorção harmônica; qualidade da energia elétrica; transformadores de potencial; transformador de potencial indutivo.

ABSTRACT

With the increasing use of non-linear equipment, there is also concern about the behavior of the electrical power system in the face of possible harmonic distortions caused by these loads and their respective effects. Thus, studies are developed regarding techniques for measuring and quantifying these harmonic distortions in the context of campaigns to measure Power Quality indicators. When dealing with measurement systems, it may be necessary to use voltage transducers (VTs), depending on the voltage level to be measured. However, it is known that some types of VTs may not present a linear response in the frequency spectrum. Since the inductive voltage transformer is a device widely used for this purpose, studies to obtain the frequency response of this element are of great importance, as it is known in the literature that harmonic distortions may have impact on its accuracy of measurements. As there are several proposed procedures to perform the frequency response test, the present work intends to perform two out of these procedures found in Brazilian regulations, in order to analyze the main differences between the test procedures, and the results obtained from them. In this context, the first procedure consists in applying the VT primary with harmonic voltage lower than its rated value. On the other hand, the second procedure is characterized by the applying rated fundamental voltage plus harmonic components. After carrying out the tests, the frequency response curves were drawn, it was verified that the results obtained by the tests differed from each other, and that the VT response from the test with the fundamental voltage plus harmonic components showed non-linear characteristics, violating the limits for higher precision instruments suggested by IEC/TR 61869-103 for some harmonic orders. The test with a voltage lower than the rated remained within the suggested limits. Therefore, it is concluded that it is necessary to perform the test that considers the presence of rated fundamental voltage despite its greater difficulty in carrying out it in the field, since it leads to more accurate results along the harmonic spectrum, showing the real impacts of non-linearity of inductive voltage transformers.

Keywords: Non-linearity; frequency response; harmonic distortion; power quality; voltage transformers; inductive voltage transformer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Circuito Equivalente de um TPI.	18
Figura 2 - Arranjo Ilustrativo dos Procedimentos A e B.	21
Figura 3 - Arranjo Ilustrativo do Procedimento C.	22
Figura 4 - Transformador de Potencial Indutivo. a) Imagem Ilustrativa, b) Dados de Placa. ...	24
Figura 5 - Arranjo do ensaio de relação de transformação do TPI.	25
Figura 6 - Resultado do ensaio de relação de transformação do TPI.	25
Figura 7 - Arranjo A para teste de resposta em frequência. (a) Diagrama de Ligação, (b) Estrutura Laboratorial.	26
Figura 8 - Arranjo B para teste de resposta em frequência. (a) Diagrama de Ligação, (b) Estrutura Laboratorial.	27
Figura 9 - Fonte trifásica controlada, fabricante California Instruments.	28
Figura 10 - Parametrização da fonte controlada trifásica - Arranjo A.	29
Figura 11 - Parametrização da fonte controlada trifásica - Arranjo B.	30
Figura 12 - Forma de onda de 10 ^a ordem - Arranjo B.	30
Figura 13 - Transformador monofásico, fabricante TRAEL. (a) Imagem ilustrativa, (b) Dados de placa.	31
Figura 14 - Circuito Equivalente de um DPC.	32
Figura 15 - Imagem ilustrativa do DPC, fabricante IMG.	33
Figura 16 - Imagem ilustrativa do osciloscópio.	34
Figura 17 - Imagem ilustrativa do analisador de qualidade.	35
Figura 18 - Resultados das medições no DPC.	38
Figura 19 - Fatores de Correção de Relação de Transformação - Ensaio A.	45
Figura 20 - Fatores de correção de ângulo do Ensaio A.	47
Figura 21 - Fatores de correção de relação de transformação do Ensaio B.	49
Figura 22 - Fatores de correção de ângulo do Ensaio B.	51
Figura 23 - Comparação dos fatores de correção de relação de transformação.	52
Figura 24 - Comparação dos fatores de correção de ângulo.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de placa do DPC.....	33
Tabela 2 - Valores de relação de transformação e de fator de correção da relação de transformação - Ensaio A.	43
Tabela 3 – Fatores de Correção de Ângulo do Ensaio A.....	45
Tabela 4 - Valores de relação de transformação e de fator de correção da relação de transformação - Ensaio B.	47
Tabela 5 - Fatores de Correção de Ângulo do Ensaio B.	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DPC	Divisor de Potencial Capacitivo
DPCR	Divisor de Potencial Capacitivo-Resistivo
NQEE	Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
TCB	Tape Capacitivo de Bucha de Transformador de Potência ou de Reator em Derivação
TCs	Transformadores de Corrente
TDF	Transformada Discreta de Fourier
TP	Transformador de Potencial
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo
TPI	Transformador de Potencial Indutivo
TPIs	Transformadores de Potencial Indutivo
TPs	Transformadores de Potencial
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2 OBJETIVOS	15
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2. PROCEDIMENTOS PARA LEVANTAMENTO DE RESPOSTA EM FREQÜÊNCIA DE TRANSFORMADORES DE POTENCIAL	17
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE OS TPIs	17
2.2 DIRETRIZES PROPOSTAS PELO OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS).....	18
2.3 PROCEDIMENTOS PROPOSTOS PELA IEC/TR 61869-103.....	19
2.4 PROCEDIMENTO A – TESTE COM TENSÃO REDUZIDA	20
2.5 PROCEDIMENTO B – TESTE COM TENSÃO FUNDAMENTAL NOMINAL ACRESCIDA DE TENSÃO HARMÔNICA	20
2.6 ARRANJO ILUSTRATIVO.....	21
2.7 PROCEDIMENTOS PROPOSTOS PELO Re. ONS 2.1 – 028/2005	21
2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	22
3. APLICAÇÃO PRÁTICA DO PROCEDIMENTO DE LEVANTAMENTO DA RESPOSTA EM FREQÜÊNCIA	24
3.1 EQUIPAMENTO A SER ENSAIADO	24
3.2 ESTRUTURA LABORATORIAL.....	26
3.2.1 GERADOR DE SINAIS E AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA.....	28
3.2.2 TRANSFORMADOR ELEVADOR	31
3.2.3 TRANSDUTOR DE REFERÊNCIA	31
3.2.4 OSCILOSCÓPIO (COMPARADOR).....	34
3.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS	36
3.3.1 ENSAIO A	36
3.3.2 ENSAIO B	37
3.4 TRATAMENTO DOS DADOS DOS ENSAIOS	39
3.4.1. ENSAIO A	39
3.4.2. ENSAIO B	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.4. ENSAIO A	43

4.5. ENSAIO B	47
4.6. COMPARAÇÃO E CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	51
5. CONCLUSÃO.....	54

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Ao se explorar o termo “Qualidade da Energia Elétrica”, encontra-se estudos direcionados a variações de magnitude, formas de onda e frequência de tensão e de corrente elétrica. Uma vez que a energia elétrica é definida como a integral da potência instantânea $Energia = \int v(t)i(t)dt$, e a corrente elétrica é dependente da carga, opta-se por regulamentar os fenômenos de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) a partir da análise da tensão. Desta forma, uma boa qualidade de tensão implica em uma boa qualidade da energia, idealmente caracterizada por uma forma de onda senoidal, com amplitude e frequência constantes ao longo do tempo [1].

Assim sendo, os estudos de QEE podem ser categorizados em fenômenos de regime permanente e de regime transitório. Esses fenômenos abrangem Transitórios Eletromagnéticos, Variações de Tensão de Curta Duração, Variações de Tensão de Longa Duração, Desequilíbrios, Distorções Harmônicas, Flutuação de Tensão e Variações de Frequência. As condições ideais da forma de onda são de grande interesse dos consumidores de energia, uma vez que elas garantem o funcionamento adequado dos equipamentos, além da segurança do operador. A geração de energia elétrica convencional é usualmente feita em frequências constantes de 50 Hz ou 60 Hz, tal que sua forma de onda pode ser considerada praticamente senoidal [2].

As distorções harmônicas são fenômenos estudados desde o século XIX, com o primeiro trabalho publicado de Steinmetz a respeito do assunto, sugerindo a primeira conexão em delta de transformadores para confinar correntes de terceira ordem harmônica [3]. Entretanto, o avanço e a popularização da eletrônica de potência fizeram com que as discussões sobre o tema tomassem maior repercussão. Ao ser aplicada uma tensão senoidal a um elemento ou carga não-linear, via de regra, dispositivos eletrônicos modernos, tem-se como resultado uma corrente elétrica não-senoidal. Na presença da impedância do sistema, esta corrente provoca uma queda de tensão também não-senoidal e, conseqüentemente, a distorção harmônica se propaga pelo sistema [2]. Nesse sentido, a preocupação quanto à qualidade da energia e aos indicadores de distorção harmônica tem se intensificado nos últimos tempos dado o crescimento da utilização de equipamentos com potencial de geração de distorções de corrente, como dispositivos para aplicações em eletrônica de potência, nas redes elétricas não somente em nível de distribuição, mas também de geração e transmissão.

A onda de tensão ou corrente distorcida é decomposta a partir da aplicação da série de Fourier, sendo possível verificar que o sinal distorcido é composto pela componente fundamental e por componentes harmônicas, as quais, por sua vez, são ondas senoidais cujas frequências são múltiplas inteiras da frequência fundamental. Tais distorções harmônicas são prejudiciais ao sistema elétrico, podendo levar, entre outros, ao aumento de perdas, a queima de equipamentos, a ressonâncias e a erros de medição [2]. Por isso, a medição de distorções harmônicas, tanto de tensão, quanto de corrente, é de extrema importância, principalmente para avaliar se os níveis presentes nos sistemas elétricos se encontram dentro dos limites ou valores de referência estabelecidos nos documentos normativos de cada país.

No caso da Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro, a avaliação da QEE é feita através dos indicadores definidos nos Submódulos 9.7 [4] e 2.9 [10] dos Procedimentos de Rede quando da solicitação de instalação de novos agentes, sejam eles consumidores livres, agentes de geração (a exemplo de parques eólicos e fazendas fotovoltaicas), agentes de distribuição, agentes de importação e de exportação, e demais agentes com características não lineares que impactem o desempenho da Rede Básica. Dessa forma, é de responsabilidade dos agentes que se conectam à rede realizar estudos e medições no que se refere às consequências da sua instalação sobre a QEE. Devido aos questionamentos de agentes quanto aos critérios para o acesso à Rede Básica de instalações com características não lineares, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) disponibilizou um documento com maiores detalhes a respeito dos estudos e campanhas de medição de QEE, o qual corresponde à nota técnica 009/2016 – REV. 03 [5].

No que tange aos sistemas de medição, pode haver necessidade de utilizar transdutores de tensão e/ou de corrente, a depender dos níveis de tensão e de corrente a serem medidos, pois estes podem não ser compatíveis com os limites dos equipamentos analisadores de qualidade da energia disponíveis comercialmente. Portanto, o transformador de potencial (TP) é um equipamento amplamente utilizado para reduzir o nível de tensão medido, a fim de se obter níveis mais baixos que podem ser diretamente mensurados por equipamentos de medição e proteção, bem como analisadores de qualidade da energia. Entretanto, os TPs, a depender de suas características construtivas, podem não apresentar uma resposta linear ao longo do espectro de frequência, o que pode ocasionar em erros de leitura ao se analisar sinais de tensão que possuam distorções harmônicas.

É amplamente conhecido na literatura que as distorções harmônicas podem ter impacto sobre a precisão das medições realizadas via TPIs (Transformadores de Potencial Indutivo) e TPCs (Transformadores de Potencial Capacitivo) [6-9], os quais são amplamente utilizados em

subestações da Rede Básica. Dessa forma, para garantir o rigor das medições e analisar de maneira fiel os critérios de QEE a respeito de distorções harmônicas, é recomendado, pelos Procedimentos de Rede e pela nota técnica 009/2016, que sejam realizados ensaios para a obtenção das curvas de resposta em frequência destes equipamentos, a fim de corrigir, se necessário for, o resultado obtido quando da medição de sinais que apresentam distorções harmônicas.

1.2 OBJETIVOS

Diante do exposto, no presente trabalho será estudado o comportamento de transformadores de potencial quando submetidos a medição de tensão que apresenta componentes harmônicos. O intuito é estudar, realizar e analisar os diferentes procedimentos para levantamento de resposta em frequência de TPs descritos na literatura para verificação da linearidade ou não-linearidade dos equipamentos ensaiados de maneira a corrigir, se necessário, os valores das distorções harmônicas medidas pelo equipamento e assegurar medições confiáveis. Esse procedimento é atualmente exigido pelo ONS em medições de qualidade da energia, incluindo distorções harmônicas, nos barramentos da Rede Básica.

O trabalho terá como foco a utilização de TPIs, amplamente utilizados em barramentos de subestações, e projetados para responder linearmente quando aplicada uma magnitude de tensão em seu primário dentro de uma faixa estabelecida e sob a operação da frequência nominal. Busca-se, também, desenvolver o estudo dos resultados obtidos em laboratório e, se necessário, realizar a correção das medições para mitigar os efeitos da não linearidade sobre os equipamentos.

Assim, o principal objetivo deste trabalho é realizar um estudo investigativo de técnicas de levantamento de resposta em frequência de TPIs, uma vez que esses transdutores de tensão podem apresentar uma resposta não-linear ao longo do espectro de frequência, fazendo com que sejam propagados erros nas medições de distorções harmônicas exigidas pelos agentes reguladores.

O trabalho apresentado tem os seguintes objetivos específicos:

- a) Aprofundar os conhecimentos na temática do levantamento da resposta em frequência de TPs e a sua importância no contexto das medições de qualidade da energia, principalmente em sistemas que possuem distorções harmônicas;

- b) Implementar em ambiente laboratorial os dois distintos procedimentos de ensaios de resposta em frequência em protótipos de transformadores de potencial indutivo comercialmente disponíveis;
- c) Avaliar a variação do comportamento da resposta de TPIs ao longo do espectro de frequência frente aos dois tipos de ensaios;
- d) Analisar os dados obtidos na medição de tensão, dos lados primário e secundário dos TPIs, de acordo com os indicadores de qualidade e levantar a curva de resposta em frequência;
- e) Quantificar as distorções harmônicas devido à variação de frequência e corrigir possíveis erros de medição.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A fim de estruturar e organizar o trabalho, os assuntos foram divididos em capítulos que facilitam o amadurecimento dos temas e apontam as respectivas referências que auxiliaram no desenvolvimento do estudo e que podem ser de interesse para futuras consultas. Desse modo, tem-se a seguinte organização:

O Capítulo 1 traz a contextualização sobre o tema abordado neste trabalho, especificamente QEE, distorções harmônicas e o porquê de se realizar o ensaio de resposta em frequência em equipamentos utilizados para medições, tais como os transdutores de tensão. Além disso, o capítulo também apresenta de forma detalhada os objetivos elencados para a realização do estudo.

No Capítulo 2 é apresentada a descrição dos procedimentos para o levantamento da resposta em frequência de transdutores de potencial, com foco em transformadores de potencial indutivo, além de um maior detalhamento das normas e recomendações para os ensaios.

O Capítulo 3 aborda a aplicação prática, em ambiente laboratorial, do procedimento de levantamento de resposta em frequência, apresentando o equipamento a ser ensaiado e suas especificações técnicas, a estrutura laboratorial, os detalhes do arranjo dos ensaios considerando as recomendações da IEC TR 61869-103 e do Relatório ONS 2.1-028/2005, bem como o tratamento dos dados.

O Capítulo 4, por sua vez, detalha os resultados obtidos e suas respectivas análises e discussões.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões acerca do trabalho realizado, assim como sugestões de estudos e pesquisas futuros.

2. PROCEDIMENTOS PARA LEVANTAMENTO DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE TRANSFORMADORES DE POTENCIAL

Neste capítulo são apresentadas as normas e as recomendações tomadas como base para a realização do ensaio de resposta em frequência em transdutores de potencial, além da descrição dos procedimentos necessários para tal estudo. Dentre essa documentação normativa, tem-se os seguintes documentos disponibilizados pelo ONS: Submódulo 9.7 dos Procedimentos de Rede - Indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica [4] e Submódulo 2.9 - Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica [10], além da Nota Técnica 009/2016 - Instruções para realização de estudos e medições de QEE relacionados aos acessos à Rede Básica ou aos barramentos de fronteira com a Rede Básica para parques eólicos, solares, consumidores livres e distribuidoras [5].

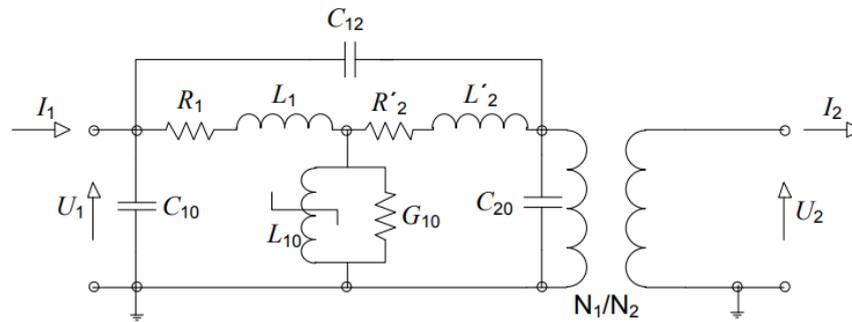
Deve-se destacar que os documentos acima mencionados trazem referência ao padrão IEC/TR 61869-103 - Instrument Transformers - The use of Transformer Instruments for Power Quality [11] e ao Relatório do ONS 2.1-028/2005 - Definição das Metodologias e Procedimentos Necessários às Campanhas de Medição dos Indicadores de Desempenho de 2005 [12].

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE OS TPIs

Os TPIs mantêm a sua linearidade da forma de onda de tensão para a frequência nominal. Contudo, para outros valores de frequência, o seu comportamento pode não ser linear, conforme amplamente abordado na literatura [6-9]. A depender do nível de tensão e dos aspectos construtivos do equipamento, a resposta em frequência pode ser muito variável. Dessa forma, a utilização de um TPI para fins medição de distorções harmônicas é somente válida, para alguns agentes regulatórios, se houver a possibilidade de levantamento da sua resposta em frequência através de campanhas de medição ou ensaios laboratoriais.

Os TPIs possuem acoplamento eletromagnético entre os circuitos primário e secundário, resultando no seguinte circuito equivalente mostrado na Figura 1 [11]:

Figura 1 - Circuito Equivalente de um TPI.



Fonte: [11]

Da representação da Figura 1, é possível explicar o seu comportamento pelos seguintes parâmetros: a indutância de magnetização L_{10} é não linear, possuindo comportamento histerético, onde a característica da curva de histerese se dá em função da magnitude da onda de tensão e da frequência. Já as capacitâncias, tanto C_{12} (entre enrolamentos) quanto C_{10} e C_{20} (entre enrolamentos e o terra), impactam no circuito equivalente de forma variável de acordo com a frequência. Quanto maior a frequência, maiores são os seus efeitos capacitivos [11]. Dessa forma, tem-se que a relação de transformação pode não obedecer àquela nominal à medida que a frequência aumenta.

A resposta em frequência depende, também, da classe de tensão dos equipamentos. Percebe-se que o limite de linearidade em função da frequência é maior para TPIs de classe de tensão menores. Já para as classes de tensão mais altas, podem ser encontradas ressonâncias sob frequências menores, uma vez que os valores de indutância e de capacitância são influenciados pelos aspectos construtivos de fabricação e de isolamento do transformador [11].

2.2 DIRETRIZES PROPOSTAS PELO OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS)

ONS propõe, através do item 4.4.2 do Submódulo 2.9 dos Procedimentos de Rede que, para a realização das campanhas de medição, algumas precauções devem ser observadas quanto ao nível de precisão dos tipos de transdutores de tensão utilizados, conforme estabelecido na IEC/TR 61869-103.

No que se refere a ensaios de resposta em frequência de transdutores de tensão em campanhas de medição, a nota técnica 009/2016 - REV. 03 [5] também estabelece alguns procedimentos de acordo com a norma IEC/TR 61869-103, no intuito da obtenção de uma

medição de distorções harmônicas com nível de precisão adequado. Ainda, a nota técnica [5] também menciona o relatório de campanhas de medição Re. ONS 2.1-028/2005-Rev.4, como outra referência de procedimento para levantamento de resposta em frequências de TPs.

Assim sendo, a nota técnica [5] disponibilizada pelo ONS solicita o uso de técnicas alternativas de correção de resposta em frequência de TPs a fim de diminuir o efeito da não linearidade da forma de onda de tensão desses transdutores sob determinada faixa de frequências múltiplas da fundamental. Portanto, nas próximas seções são detalhados os procedimentos apresentados em ambos os documentos técnicos, IEC/TR 61869-103 e Re. ONS 2.1-028/2005, para realização dos ensaios de levantamento da resposta em frequência de TPs.

2.3 PROCEDIMENTOS PROPOSTOS PELA IEC/TR 61869-103

Para campanhas de medição de QEE que utilizem transdutores de tensão, a norma IEC/TR 61869-103 sugere classificar os instrumentos conforme diferentes classes de precisão. Do anexo B da normativa citada, sugere-se que para instrumentos classe PQ1, a classe de maior precisão, para uma faixa de frequências de 2 a 50 vezes o valor da frequência fundamental, nesse caso, de 120 Hz a 3 kHz, o erro medido na relação de transformação de TPs não deve ultrapassar o valor de 5%. E, caso os ângulos de fase também sejam mensurados, estes não devem ultrapassar em $\pm 5^\circ$. Esses valores serão utilizados como limites na avaliação dos resultados. A norma propõe, ainda, a possibilidade de adequação do desempenho dos transdutores por meio de testes em laboratório.

A norma IEC/TR 61869-103 Instrument Transformers - The use of Transformer Instruments for Power Quality [11] traz as orientações quanto a realização de testes de resposta em frequência para transdutores de potencial. Assim, tem-se dois procedimentos a depender da informação sobre a resposta em frequência do equipamento:

- Procedimento A: Se for comprovado que a resposta em frequência do transdutor não é afetada pela presença da tensão fundamental e das variações de carga, o teste de resposta em frequência pode ser feito a um nível de tensão abaixo da nominal pela aplicação de uma onda senoidal cuja frequência é variada.
- Procedimento B: Se a resposta em frequência do transdutor sofrer interferência da tensão fundamental nominal, o teste deve ser feito através da aplicação da tensão de frequência fundamental com o valor nominal ou próximo ao nominal e com a inserção de harmônicos e sub-harmônicos.

2.4 PROCEDIMENTO A – TESTE COM TENSÃO REDUZIDA

Nesse ensaio, é aplicada, ao lado de alta tensão do transformador, uma forma de onda de tensão senoidal, de amplitude menor do que o valor nominal do transdutor e de frequência variada entre 15 Hz e 3 kHz. Aplica-se cada sinal de forma separada, ou seja, um de cada vez. Essas formas de onda de tensão senoidais com frequências variadas são criadas por um gerador de sinais, cuja saída é conectada ao primário (ou lado de alta tensão) do TP através de um amplificador de potência. Em paralelo ao primário do TP, tem-se a conexão do transdutor de referência. Além disso, o secundário do TP (ou lado de baixa tensão) e a saída do transdutor de referência são comparadas em termos de magnitude e ângulo através de um comparador de tensão que fornece uma amostragem em alta resolução sincronizada por um computador.

Se a tensão aplicada ao transdutor estiver abaixo da tensão máxima de entrada do comparador, a tensão pode ser medida diretamente, sem a necessidade do transdutor de referência. Para o caso de necessidade da presença de um transdutor de referência, deve-se empregar o DPC (Divisor de Potencial Capacitivo) ou o DPCR (Divisor de Potencial Capacitivo-Resistivo), uma vez que ambos possuem uma resposta linear ao longo de todo o espectro de frequência [11].

2.5 PROCEDIMENTO B – TESTE COM TENSÃO FUNDAMENTAL NOMINAL ACRESCIDA DE TENSÃO HARMÔNICA

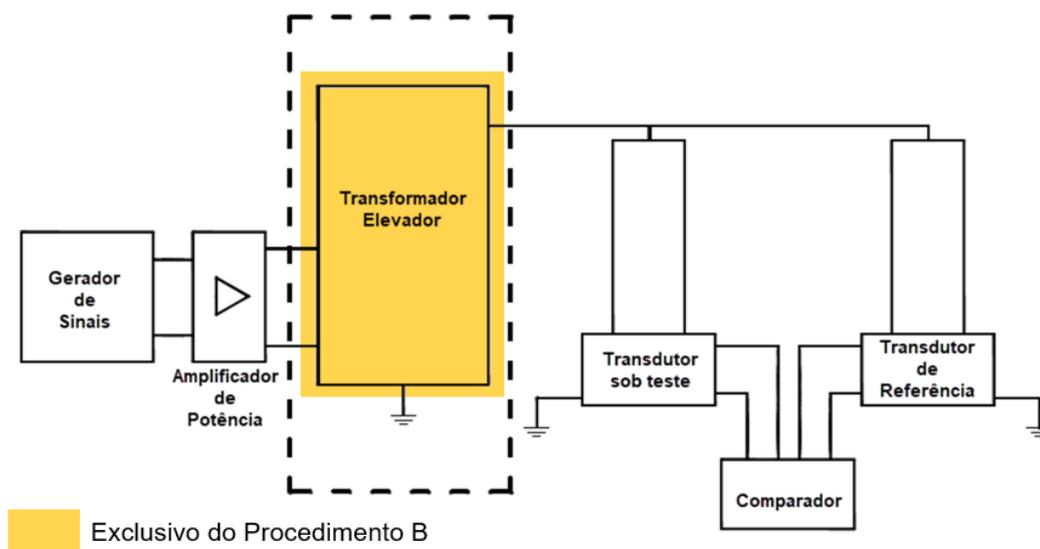
Nesse ensaio, é aplicada, ao lado de alta do transformador, uma forma de onda de tensão com duas componentes: uma com frequência fundamental e de magnitude igual ou próxima à tensão nominal do transdutor e outra componente que é uma harmônica. Essa componente harmônica também é variada de 15 Hz a 3 kHz e a sua magnitude é dependente da tensão nominal do transdutor em teste, devendo estar entre 0,2% e 3% da tensão nominal fundamental para transdutores de alta tensão e entre 2% a 10% para transdutores de média tensão.

Esse procedimento tem a necessidade do uso de um transformador elevador entre o amplificador de potência e o transdutor ensaiado, com o intuito de elevar o nível de tensão fornecido pelo amplificador de potência e alimentar o transdutor sob ensaio com tensão fundamental nominal. Além disso, nesse ensaio, o uso de um transdutor de referência se torna obrigatório, já que o nível de tensão aplicado ao TP é, certamente, muito maior do que a tensão máxima de entrada do comparador.

2.6 ARRANJO ILUSTRATIVO

A seguir é apresentada, na Figura 2, o esquema do arranjo para ambos os testes, sendo a diferença entre eles a presença do transformador elevador.

Figura 2 - Arranjo Ilustrativo dos Procedimentos A e B.



Fonte: Adaptado de [11]

2.7 PROCEDIMENTOS PROPOSTOS PELO Re. ONS 2.1 – 028/2005

Do relatório de campanhas de medição Re. ONS 2.1-028/2005-Rev.4 – Definição das Metodologias e Procedimentos Necessários às Campanhas de Medição dos Indicadores de Desempenho [12], tem-se que a faixa de frequências de interesse em medições de QEE é de 120 Hz a 3 kHz para o fenômeno da distorção harmônica de tensão. Além do levantamento da resposta em frequência em transdutores de tensão, o documento propõe a correção dos valores obtidos no secundário dos TPs a fim de obter uma medição de distorções harmônicas confiável.

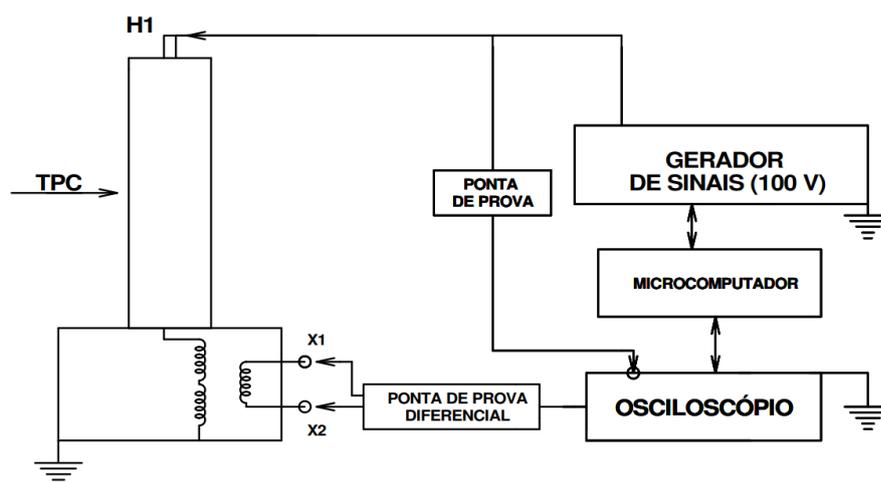
Ao se tratar dos TPIs, o relatório cita que a maioria dos equipamentos possui uma resposta em frequência linear até a 12ª ordem harmônica e que o ensaio consiste simplesmente na aplicação de tensão harmônica no lado de alta tensão do TP e na medição da tensão induzida no lado de baixa tensão do TP.

A metodologia de realização do teste de resposta em frequência deste transdutor do tipo TPI baseia-se na aplicação de uma tensão de cerca de 100 Vrms através de uma fonte com frequência variável nas faixas de 40 Hz a 5 kHz. Também é requerido um osciloscópio com no

mínimo dois canais para medir os níveis de tensão no primário e no secundário do TP e um microcomputador para automatizar a medição, armazenar e analisar dados.

A Figura 3 apresenta o esquema do arranjo denominado como procedimento C em um TPC, sendo o mesmo procedimento realizado para o TPI:

Figura 3 - Arranjo Ilustrativo do Procedimento C.



Fonte: [12]

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do exposto, percebe-se que a IEC/TR 61869-103 propõe duas maneiras de executar o teste de resposta em frequência, uma vinculada à presença da tensão fundamental nominal e outra atrelada à aplicação somente de tensões harmônicas ao terminal primário do TPI. O documento também levanta a questão de a resposta em frequência ser impactada pelas características construtivas do transdutor ensaiado.

Já o Re. ONS 2.1 – 028/2005 recomenda um caso particular do Procedimento A da IEC/TR 61869-103, em que a tensão inferior à nominal tem um valor definido de 100 Vrms e uma frequência variável. Contudo, o ONS reconhece em [5] que o uso de amplitudes inferiores à tensão nominal durante o ensaio pode ocasionar em erros de medição. Ademais, o texto da seção 2.1, que tem como referência [11], demonstra que o TPI é um equipamento que apresenta a sua resposta em frequência influenciada pela presença da tensão nominal fundamental. Portanto, dentre os procedimentos para levantamento de resposta em frequência de TPIs propostos na literatura, o que demonstra maior confiabilidade seria o procedimento B da IEC/TR 61869-103.

Entretanto, é notável a dificuldade de realização do teste devido à alimentação do transdutor com uma tensão próxima a nominal juntamente às componentes harmônicas mesmo em um ambiente laboratorial, controlado e conhecido. Assim, realizar este procedimento em campo, o que é muitas vezes necessário devido aos transdutores já estarem instalados em subestações pelo país, é ainda mais desafiador. Por isso, o procedimento com tensão reduzida é muitas vezes adotado.

Nesse sentido, uma vez que o procedimento com tensão reduzida é muitas vezes realizado pelos motivos já apresentados, esse trabalho pretende realizar, em ambiente laboratorial, os dois procedimentos: o Procedimento A e o Procedimento B, com o intuito de comparar e analisar as respostas em frequência de um TPI de 13,8 kV obtidas através de tais procedimentos.

3. APLICAÇÃO PRÁTICA DO PROCEDIMENTO DE LEVANTAMENTO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

Neste capítulo são fornecidas informações acerca das especificações técnicas do transformador de potencial indutivo a ser ensaiado para a obtenção da resposta em frequência e os detalhes dos arranjos laboratoriais necessários para a realização dos testes. Em seguida, são descritos os procedimentos realizados para execução dos ensaios, bem como o tratamento aplicado aos dados obtidos.

3.1 EQUIPAMENTO A SER ENSAIADO

Nesta seção é apresentado o transformador de potencial do tipo indutivo que será objeto de estudo deste trabalho. O transformador em questão é um protótipo, cuja relação de transformação nominal é de 13800 V/ 220 V, de potência de 300 VA e de fator de potência igual a 0,8. Deve-se também apontar que sua frequência nominal fundamental é de 60 Hz.

A Figura 4 (a) ilustra o TPI que será ensaiado. Os dados de placa do TPI são mostrados na Figura 4 (b).

Figura 4 - Transformador de Potencial Indutivo. a) Imagem Ilustrativa, b) Dados de Placa.

(a)



(b)



Fonte: A autora.

Deve-se destacar que, anterior ao teste de resposta em frequência, foi realizado o ensaio de relação de transformação do TPI no Laboratório de Alta Tensão da UFU. Através do teste, foi verificado que a relação de transformação real era divergente da nominal, uma vez que pelos dados de placa temos o valor de $\frac{13800}{220} = 62,7273$, no entanto, ao fazer a medição obteve-se o valor de 53,395. Dessa forma, durante os ensaios e a análise de dados, foi utilizado o valor medido do equipamento. As Figura 5 e Figura 6 mostram, respectivamente, o arranjo para a realização do ensaio de relação de transformação do TPI e o resultado encontrado.

Figura 5 - Arranjo do ensaio de relação de transformação do TPI.



Fonte: A autora.

Figura 6 - Resultado do ensaio de relação de transformação do TPI.

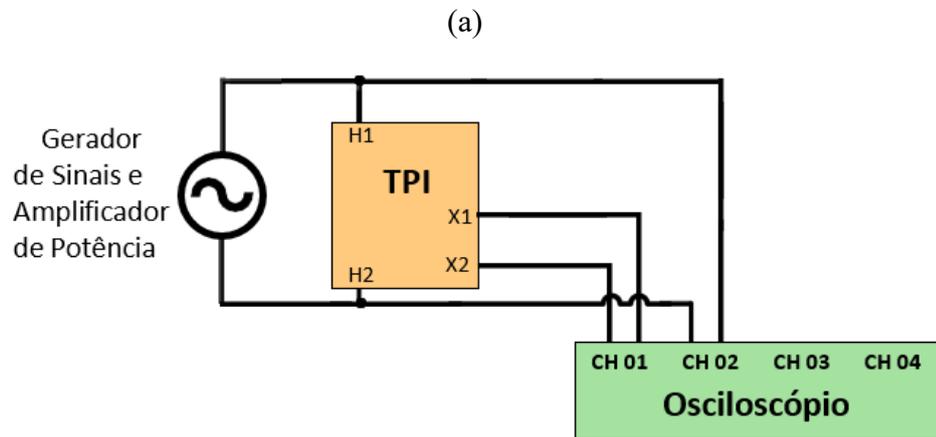


Fonte: A autora.

3.2 ESTRUTURA LABORATORIAL

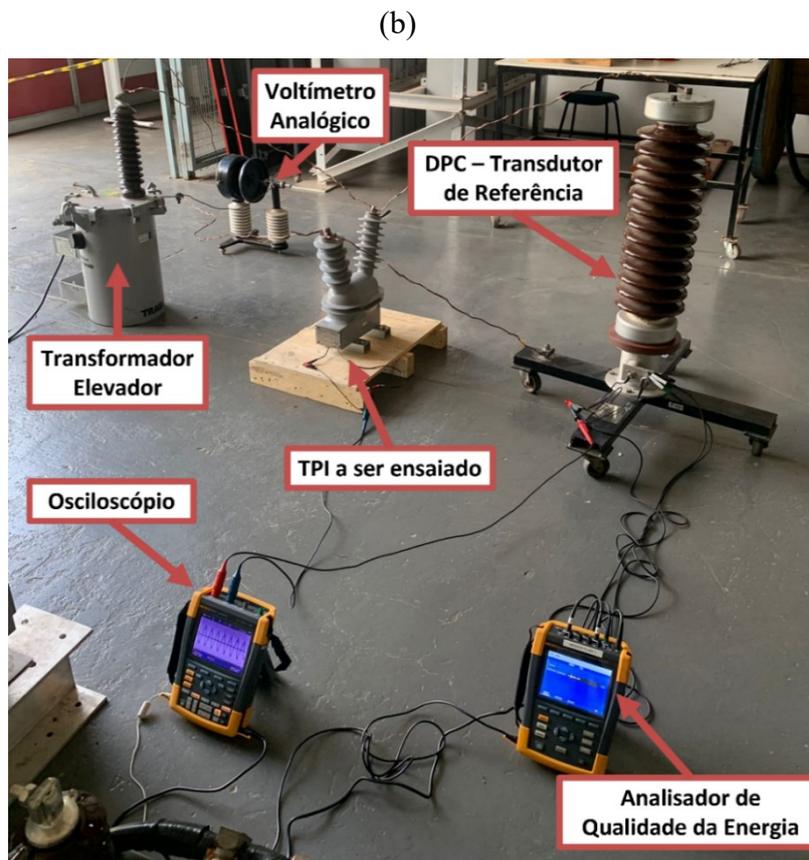
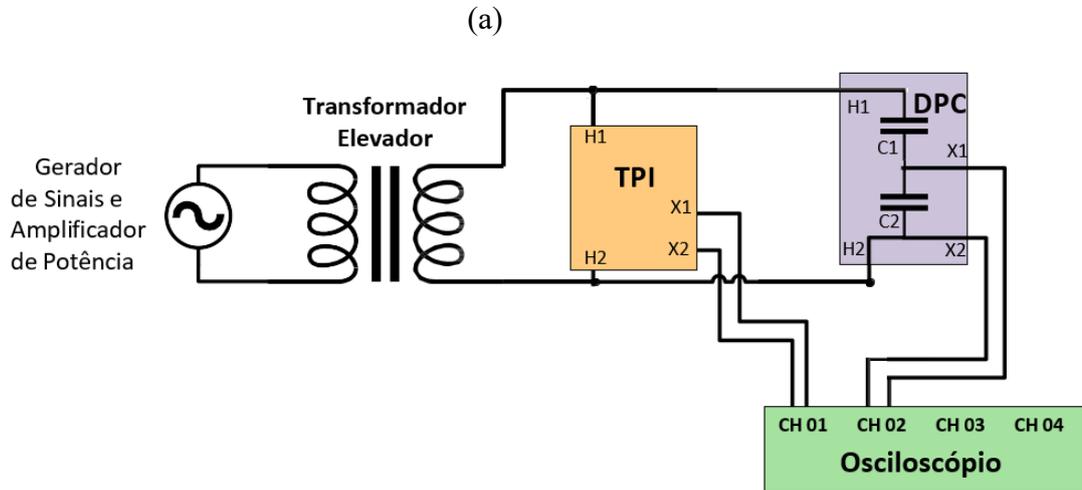
Ao se comparar os Procedimentos A e B da IEC/TR 61869-103 [11], tem-se que a diferença entre os dois arranjos laboratoriais se dá na presença do transformador elevador e do transdutor de referência. Assim, para diferenciar as duas disposições laboratoriais neste trabalho, o arranjo em que não é necessário o uso do transformador elevador e do transdutor de referência será denominado **Arranjo A** e o arranjo que os utiliza será denominado de **Arranjo B**. Os diagramas de ligação e as montagens dos arranjos dos ensaios realizados no laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Uberlândia são mostrados nas Figura 7 e Figura 8.

Figura 7 - Arranjo A para teste de resposta em frequência. (a) Diagrama de Ligação, (b) Estrutura Laboratorial.



Fonte: A autora.

Figura 8 - Arranjo B para teste de resposta em frequência. (a) Diagrama de Ligação, (b) Estrutura Laboratorial.



Fonte: A autora.

Nas seguintes subseções, são apresentadas as características técnicas dos equipamentos e instrumentos utilizados nos dois arranjos, a fim de fornecer mais detalhes da estrutura laboratorial.

3.2.1 GERADOR DE SINAIS E AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA

O equipamento selecionado para o exercer o papel de gerador de sinais e amplificador de potência corresponde a uma fonte de tensão trifásica controlada do fabricante California Instruments, modelo CSW Series [13]. Esta fonte controlada permite a escolha de saída monofásica ou trifásica através do menu de seleções ou, ainda, por controle feito remotamente. A sua potência trifásica alcança um valor de até 11100 VA dada a disposição dos módulos Master/ Slave. O modelo CSW5550 utilizado fornece tensão trifásica controlável em uma faixa de 0 a 312 V (fase-neutro) e em frequências entre 40 Hz e 5 kHz, além de entregar uma corrente de até 38,5 A (pico).

Deve-se destacar, ainda, que a fonte programável é capaz de gerar formas de onda harmônicas para testes de suscetibilidade a harmônicos através da definição dos valores de amplitude e de fase para uma amostra de até 50 ordens harmônicas em uma interface do programa da fonte, sendo possível armazenar até 200 formas de onda em sua memória.

A Figura 9 mostra a fonte trifásica controlada utilizada nos dois arranjos, disponibilizada pelo NQEE da UFU.

Figura 9 - Fonte trifásica controlada, fabricante California Instruments.



Fonte: A autora.

No teste de resposta em frequência, foi feita a parametrização da fonte trifásica controlada de modo que os dois procedimentos A e B, descritos respectivamente nas seções 2.4 e 2.5 deste trabalho, pudessem ser realizados de forma automatizada.

A Figura 10 mostra a parametrização da fonte no programa próprio “California Instruments – Virtual Panels, Version 1.2.5” para o Arranjo A, em que são criadas formas de onda senoidais com frequências múltiplas inteiras da fundamental. As frequências das formas de onda são inseridas como percentual da frequência fundamental, portanto, no caso da representação de uma forma de onda de 300 Hz (5ª ordem), a frequência corresponde a 500% da frequência fundamental. Além disso, definiu-se, para este ensaio, que todas as formas de onda possuiriam amplitude de 300 V, o que corresponde a aproximadamente 2,2% da tensão nominal do TPI sob análise. Também se definiu o tempo de 5 segundos para imposição de cada forma de onda.

A Figura 11 mostra a parametrização da fonte para o Arranjo B, em que foram construídas as formas de onda de tensão nominal acrescida de componentes harmônicas e definido o tempo em que essas formas de onda seriam aplicadas ao transformador elevador. Nesse ensaio, cada forma de onda foi aplicada ao transformador elevador por 5 segundos. Na Figura 12, tem-se um exemplo da forma de onda construída para a décima ordem harmônica com amplitude de 5% da fundamental. A amplitude de tensão foi de 5% da fundamental para as ordens harmônicas desde a 2ª até 48ª. Entretanto, para as ordens 49ª e 50ª, a fonte não permite este mesmo valor e limita a uma amplitude de 2% da fundamental.

Figura 10 - Parametrização da fonte controlada trifásica - Arranjo A.

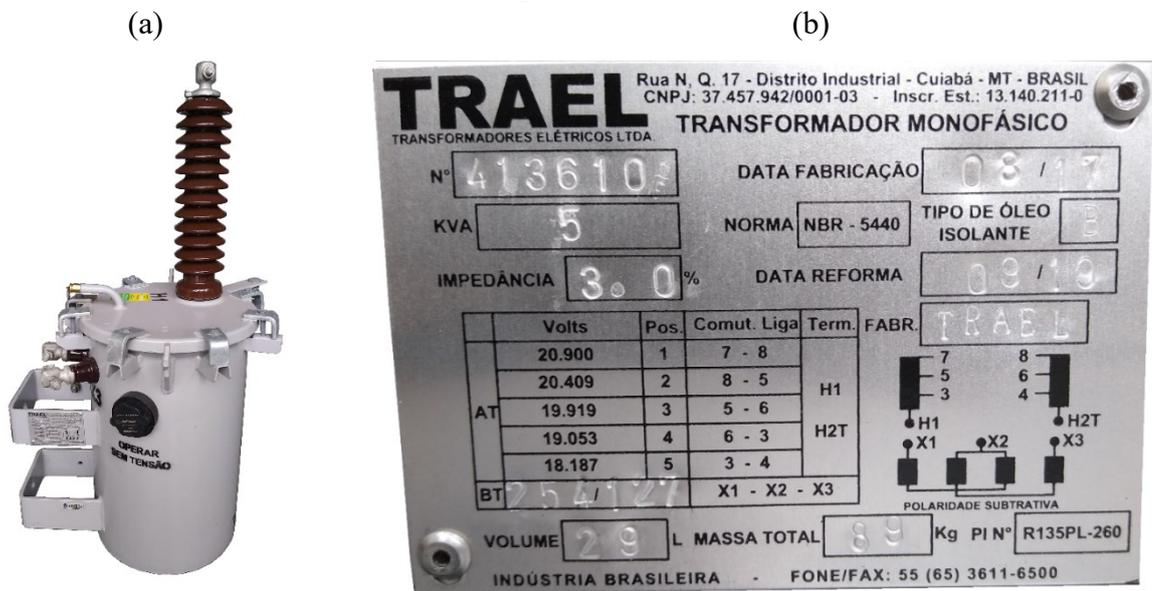
Type	Slew Time (sec)	Delay (sec)	Frequency	VoltageA	Func A	VoltageB	Func B	VoltageC	Func C	Repeat	Start Phase
Frequency Step	0.001	5	100		SINE		SINE		SINE	0	
Frequency Step	0.001	5	200		SINE		SINE		SINE	0	
Frequency Step	0.001	5	300		SINE		SINE		SINE	0	
Frequency Step	0.001	5	400		SINE		SINE		SINE	0	
Frequency Step	0.001	5	500		SINE		SINE		SINE	0	
Frequency Step	0.001	5	600		SINE		SINE		SINE	0	
Frequency Step	0.001	5	700		SINE		SINE		SINE	0	
Frequency Step	0.001	5	800		SINE		SINE		SINE	0	
Frequency Step	0.001	5	900		SINE		SINE		SINE	0	
Frequency Step	0.001	5	1000		SINE		SINE		SINE	0	
Frequency Step	0.001	5	1100		SINE		SINE		SINE	0	
Frequency Step	0.001	5	1200		SINE		SINE		SINE	0	
Frequency Step	0.001	5	1300		SINE		SINE		SINE	0	

Fonte: A autora.

3.2.2 TRANSFORMADOR ELEVADOR

Para realizar o teste com tensão nominal elevada de acordo com as diretrizes do procedimento B (Arranjo B), é necessário o emprego do transformador elevador. A tensão nominal do TPI é de 13,8 kV, o que implica na utilização de um transformador monofásico capaz de alcançar este nível de tensão. O transformador elevador empregado é da marca TRAEL, de potência nominal de 5 kVA e vários ajustes de posição de TAP para a média tensão (20 kV). A Figura 13 (a) mostra o transformador utilizado e a Figura 13 (b) apresenta os dados de placa.

Figura 13 - Transformador monofásico, fabricante TRAEL. (a) Imagem ilustrativa, (b) Dados de placa.



Fonte: A autora.

3.2.3 TRANSDUTOR DE REFERÊNCIA

O transdutor de referência se faz necessário quando o nível de tensão aplicado ao TPI sob teste é muito maior do que a tensão máxima de entrada do instrumento de medição, neste caso, correspondendo ao Arranjo B. O transdutor de referência escolhido para este trabalho foi o DPC (Divisor de Potencial Capacitivo), visto que o equipamento tem como atributo de interesse a linearidade no domínio da frequência [5].

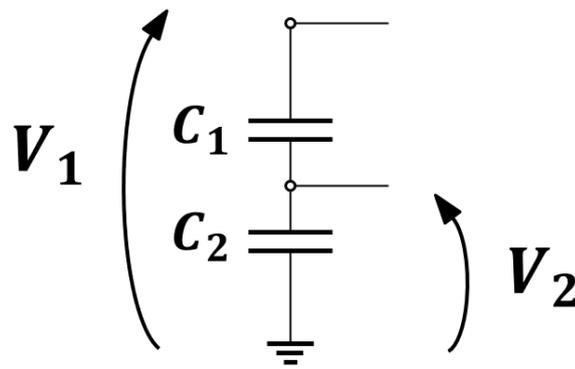
O DPC é constituído por duas unidades capacitivas ligadas em série, assim como mostrado na Figura 14, sendo a primeira denominada unidade capacitiva de alta tensão e a segunda unidade capacitiva de baixa tensão. Na Figura 14, tem-se que V_2 (terminal de baixa

tensão) é proporcional a V_1 (terminal de alta tensão) e que C_1 e C_2 são as capacitâncias conectadas em série.

Além disso, relação entre as tensões V_1 e V_2 do divisor de potencial capacitivo se dá pela relação entre as duas capacitâncias pela Equação 1.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (1)$$

Figura 14 - Circuito Equivalente de um DPC.



Fonte: Adaptado de [11]

Assim, o equipamento é altamente recomendado nos documentos [11] e [12] como transdutor de referência devido à sua linearidade ao longo do espectro de frequência. A Figura 15 e a Tabela 1 mostram o DPC utilizado, do fabricante IMG, e seus dados de placa, respectivamente.

Figura 15 - Imagem ilustrativa do DPC, fabricante IMG.



Fonte: A autora.

Tabela 1 - Dados de placa do DPC

Dados de placa - DPC	
Tipo	DT 50/500
Tensão nominal	50 kV
Frequência	50 – 400 Hz
C1	497 pF
C2	216191 pF

Fonte: A autora.

Da Equação 1, tem-se:

$$\frac{50 \times 10^3}{V_2} = \frac{497 \times 10^{-12} + 216,191 \times 10^{-12}}{497 \times 10^{-12}}$$

Tal que:

$$V_2 = 114,681 \text{ V}$$

e

$$\text{Relação de Transformação} \approx 435,992$$

Nota-se que a relação de transformação do DPC e a do TPI são diferentes. Esse fato não influenciou a realização do teste de resposta em frequência, mas foi levado em consideração nos cálculos feitos durante o tratamento dos dados.

3.2.4 OSCILOSCÓPIO (COMPARADOR)

Para a comparação dos sinais de tensão em termos de módulo e de ângulo do TPI medidos nos secundários, tanto em relação ao transdutor de referência, quanto a tensão medida no primário do TPI, Procedimentos A e B, descritos na IEC 61869-103 [11], sugerem a utilização do comparador. No arranjo laboratorial realizado neste trabalho, utilizou-se um osciloscópio para realizar essa função. O instrumento escolhido é da marca Fluke, modelo 190-104/S ScopeMeter® [16] e é ilustrado na Figura 16. Este osciloscópio possui quatro canais eletricamente isolados, largura de banda de 100 MHz, taxa de amostragem de até 1,25 Giga Samples/segundo e uma memória de 10000 amostras por forma de onda de canal, o que permite uma alta resolução dos sinais amostrados.

Figura 16 - Imagem ilustrativa do osciloscópio.



Fonte: A autora.

Do Arranjo A, apresentado na Figura 7, tem-se que um dos canais do osciloscópio é ligado ao secundário do TPI e a tensão aplicada ao terminal de alta tensão do TPI (primário) é medida pelo osciloscópio diretamente, sem a necessidade do DPC, uma vez que esta tensão

aplicada não é maior do que àquela suportada pelas ponteiros do osciloscópio. Já no Arranjo B apresentado na Figura 8, percebe-se que os canais do osciloscópio foram conectados aos terminais de baixa tensão (secundários) tanto do TPI ensaiado quanto do DPC.

Além disso, também se utilizou no Arranjo B, um analisador de qualidade com o papel de verificar se o percentual de harmônicos, medidos no lado de alta tensão do transformador elevador se manteve entre 2% e 10%, pois o transformador elevador pode atenuar ou amplificar os harmônicos que foram inicialmente programados na fonte controlada de tensão. O instrumento escolhido é da marca Fluke, modelo 435 série II [14] e é ilustrado na Figura 17.

Este analisador é classe A, com 0,1% de precisão de tensão de acordo com a IEC 61000-4-30 [15], possuindo quatro canais para a leitura simultânea de tensões e de corrente de fases e de neutro. Além disso, mede e registra harmônicos e inter-harmônicos até a 50ª ordem, sendo possível acessar o seu valor de Distorção Harmônica Total (DHT) e a contribuição percentual de cada ordem harmônica em relação ao sinal fundamental de tensão.

Figura 17 - Imagem ilustrativa do analisador de qualidade.



Fonte: A autora.

Um dos canais do analisador foi conectado ao terminal de baixa tensão (secundário) do DPC.

3.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS

Esta seção apresenta os procedimentos desenvolvidos para realizar o teste de resposta em frequência nos dois ensaios descritos nas seções 2.4 e 2.5, além da metodologia computacional para o tratamento dos dados adquiridos pelo osciloscópio. O propósito é seguir com as recomendações sugeridas pelas normas brasileiras, avaliar os resultados dos ensaios e, se necessário, corrigir os possíveis erros de medição de tensão harmônica, quando da utilização desse TPI para medição de distorções harmônicas.

3.3.1 ENSAIO A

O Ensaio A refere-se ao Procedimento A deste trabalho, recomendado pela IEC 61869-103 [11], em que o transdutor de potencial a ser ensaiado é alimentado por uma tensão cujo valor está abaixo do nominal e sob frequências harmônicas sem a presença da tensão fundamental. O arranjo empregado neste segundo ensaio é o Arranjo A da Figura 7.

Para este Ensaio A, a norma recomenda variação de frequência de 15 Hz a 3 kHz, mas não existe uma definição para o passo de frequência. Dessa forma, o passo de frequência utilizado no ensaio foi de 60 Hz, com as faixas de frequência de 60 Hz até 3 kHz (50ª ordem), ou seja, não houve aplicação de sub-harmônicos e inter-harmônicos, uma vez que não é o foco do estudo. A respeito da magnitude de tensão, não existe a definição do percentual da tensão nominal que deve ser aplicada ao TPI, apenas a exigência de que a tensão no secundário do transdutor tenha um nível que possa ser precisamente mensurado.

Dessa forma, aplicou-se um valor de 300 Vrms diretamente ao primário do TPI, ou seja, aproximadamente 2% da tensão nominal. Neste ensaio, não há necessidade de usar o DPC, uma vez que as ponteiros do osciloscópio suportam um nível de tensão de até 600 V. Além de aplicar a tensão de 300 Vrms através da fonte controlada, conectada diretamente ao TPI, deve-se variar a frequência das formas de onda assim como mostrado na Figura 10.

A partir dos procedimentos descritos, foram obtidas as formas de onda de tensão do secundário TPI e do DPC durante 120 ms, o que corresponde aos 7 ciclos de capacidade de armazenamento do osciloscópio, para cada forma de onda imposta ao TPI.

A coleta desses dados pelo osciloscópio foi realizada de maneira automatizada pois o equipamento possui a função de capturar os dados medidos repetidamente, a partir de um intervalo de tempo desejado pelo usuário. Nesse caso, o intervalo de tempo correspondeu aos mesmos 5 segundos de duração da imposição das formas de onda pela fonte controlada.

3.3.2 ENSAIO B

O Ensaio B refere-se ao Procedimento B deste trabalho, recomendado pela IEC 61869-103 [11], em que o transdutor de potencial a ser ensaiado é alimentado por uma tensão próxima ou igual à nominal e acrescida de componentes harmônicas. O arranjo empregado neste ensaio é o Arranjo B da Figura 8.

A norma recomenda variação de frequência de 15 Hz a 3 kHz, mas não existe uma definição para o passo de frequência. Dessa forma, o passo de frequência utilizado no ensaio foi de 60 Hz, com as faixas de frequência de 60 Hz até 3 kHz (50ª ordem harmônica), ou seja, não houve aplicação de sub-harmônicos e inter-harmônicos, uma vez que não é o foco do estudo. Também é dito que os percentuais de distorção harmônica de tensão aplicada ao TPI dependem da tensão nominal do equipamento. Como é um transdutor de 13,8 kV, de média tensão, o valor das componentes harmônicas, impostos sobre a tensão fundamental, deve estar na faixa entre 2% e 10% da fundamental.

Como os valores de ordem harmônica foram impostos no lado de baixa tensão do transformador elevador e este equipamento tem a característica de poder atenuá-los ou elevá-los, a depender da ordem harmônica imposta, foram também medidos os valores de tensão harmônica do lado de alta tensão através do DPC. À medida em que houve aumento da frequência da componente harmônica, também aconteceu o aumento do seu percentual no lado de alta tensão do transformador elevador. Entretanto, o percentual da componente distorcida não chegou a ultrapassar os 10% permitidos pela norma para nenhuma das ordens. No entanto, para a 49ª e 50ª, devido às limitações da fonte controlada, o percentual de distorção não chegou a atingir os 2% recomendados. A Figura 18 mostra os resultados medidos pelo analisador de qualidade no primário (ou lado de alta tensão) do transformador elevador através do DPC.

Figura 18 - Resultados das medições no DPC.

Ordem	%fundamental	Ordem	%fundamental
1	100,00%	26	8,40%
2	5,00%	27	8,68%
3	4,93%	28	8,95%
4	5,04%	29	9,20%
5	5,06%	30	9,38%
6	5,12%	31	9,50%
7	5,16%	32	9,54%
8	5,22%	33	9,47%
9	5,28%	34	9,31%
10	5,37%	35	9,05%
11	5,46%	36	8,72%
12	5,55%	37	8,33%
13	5,66%	38	7,90%
14	5,79%	39	7,47%
15	5,92%	40	7,01%
16	6,07%	41	6,57%
17	6,24%	42	6,16%
18	6,41%	43	5,79%
19	6,61%	44	5,42%
20	6,82%	45	5,08%
21	7,05%	46	4,77%
22	7,30%	47	4,48%
23	7,56%	48	4,21%
24	7,84%	49	1,59%
25	8,12%	50	1,49%

Fonte: A autora.

A partir dos procedimentos descritos, foram obtidas as formas de onda de tensão tanto do primário quanto do secundário TPI no mesmo período do procedimento anterior, de 120 ms, o que corresponde aos 7 ciclos de capacidade de armazenamento do osciloscópio. A coleta dos dados pelo osciloscópio também foi realizada de maneira automatizada.

3.4 TRATAMENTO DOS DADOS DOS ENSAIOS

A finalidade do tratamento de dados dos ensaios é encontrar os fatores de correção para os módulos e os ângulos que foram medidos por um analisador de qualidade da energia para cada ordem harmônica de tensão, por intermédio do TPI ensaiado.

3.4.1. ENSAIO A

A etapa inicial envolve o cálculo das componentes da série de Fourier a fim de obter as magnitudes e os ângulos das ordens harmônicas. Para tal, foi disponibilizado um algoritmo computacional desenvolvido no software Matlab pelos pesquisadores do NQEE para fazer o cálculo da Transformada Discreta de Fourier (TDF). O osciloscópio Fluke tem a capacidade de armazenamento de 7 ciclos, logo, aplicou-se a TDF para cada um dos 7 ciclos, obtendo-se 7 valores de magnitudes e de ângulos de fase, para cada ordem harmônica. Assim, foi possível calcular a média dessas duas grandezas, resultando em um único valor de módulo e de ângulo por ordem harmônica, para a tensão medida nos lados primário e secundário do TPI. Com esses dados, calculou-se a relação de transformação real do TPI, definida pela Equação 2.

$$RT_{TPI(f)} = \frac{V_{PRI-TPI(f)}}{V_{SEC-TPI(f)}} \quad (2)$$

Sendo:

$RT_{TPI(f)}$: Relação de transformação do TPI para determinada frequência f (do ensaio);

$V_{PRI-TPI(f)}$: Tensão no primário do TPI para determinada frequência f (do ensaio), feita pela média dos 7 ciclos medidos diretamente utilizando o osciloscópio;

$V_{SEC-TPI(f)}$: Tensão no secundário do TPI para determinada frequência f (do ensaio), feita pela média dos 7 ciclos do osciloscópio.

Daí tem-se o fator de correção de relação de transformação do TPI, dado pela Equação 3.

$$FCR_{TPI(f)} = \frac{RT_{TPI(f)}}{RT_{TPI(NOMINAL)}} \quad (3)$$

Sendo:

$FCR_{TPI(f)}$: Fator de correção de relação de transformação do TPI para determinada frequência f do ensaio;

$RT_{TPI(f)}$: Relação de transformação do TPI para determinada frequência f do ensaio;

$RT_{TPI(NOMINAL)}$: Relação de transformação nominal do TPI para a frequência fundamental (medida em laboratório).

Para conseguir a magnitude da tensão corrigida para cada ordem harmônica, multiplica-se o fator de correção de relação de transformação do TPI, pelo módulo da tensão medido pelo analisador de qualidade.

Para fazer a correção do ângulo, tem-se a Equação 4.

$$FCA_{TPI(f)} = AF_{PRI-TPI(f)} - AF_{SEC-TPI(f)} \quad (4)$$

Sendo:

$FCA_{TPI(f)}$: Fator de correção do ângulo do TPI para determinada frequência f do ensaio;

$AF_{PRI-TPI(f)}$: Ângulo de fase da tensão medida no primário do TPI para determinada frequência f do ensaio, sendo a média entre os 7 valores medidos;

$AF_{SEC-TPI(f)}$: Ângulo de fase da tensão medida no secundário do TPI para determinada frequência f do ensaio, sendo a média entre os 7 valores medidos.

Calculado o fator de correção de ângulo, basta somá-lo ao valor do ângulo da tensão medido pelo analisador de qualidade, para cada ordem harmônica, para obter os valores corrigidos de ângulo de fase. Assim conclui-se os valores de módulo e ângulo corrigidos para as 50 ordens harmônicas obtidas no Ensaio A.

3.4.2. ENSAIO B

Analogamente à subseção 3.4.1, a etapa inicial envolve o cálculo das componentes da série de Fourier a fim de obter as magnitudes e os ângulos de fase das ordens harmônicas para as formas de onda medidas no secundário do TPI e no secundário do DPC. Assim, é possível

obter os valores de módulo e ângulo de fase de cada ordem harmônica através do mesmo algoritmo computacional utilizado no Ensaio A.

Dos 7 valores de magnitude e de ângulo coletados pelo osciloscópio, é possível calcular através de média aritmética um único valor para estas duas grandezas. A relação de transformação real é, então, dada pela Equação 5.

$$RT_{TPI(f)} = \frac{V_{SEC-DPC(f)} \times RT_{DPC}}{V_{SEC-TPI(f)}} \quad (5)$$

Sendo:

$RT_{TPI(f)}$: Relação de transformação do TPI para determinada frequência f (do ensaio);

$V_{SEC-DPC(f)}$: Tensão no secundário do DPC para determinada frequência f (do ensaio), feita pela média dos 7 ciclos do osciloscópio;

RT_{DPC} : Relação de transformação nominal do DPC;

$V_{SEC-TPI(f)}$: Tensão no secundário do TPI para determinada frequência f (do ensaio), feita pela média dos 7 ciclos do osciloscópio.

Daí, tem-se o fator de correção de relação de transformação do TPI, dado pela Equação 6.

$$FCR_{TPI(f)} = \frac{RT_{TPI(f)}}{RT_{TPI(NOMINAL)}} \quad (6)$$

Sendo:

$FCR_{TPI(f)}$: Fator de correção de relação de transformação do TPI para determinada frequência f do ensaio;

$RT_{TPI(f)}$: Relação de transformação do TPI para determinada frequência f do ensaio;

$RT_{TPI(NOMINAL)}$: Relação de transformação nominal do TPI para a frequência fundamental (medida em laboratório).

Finalmente, para conseguir a magnitude da tensão corrigida para cada ordem harmônica, multiplica-se o fator de correção de relação de transformação do TPI, $FCR_{TPI(f)}$, pelo módulo da tensão medido pelo analisador de qualidade.

Já para fazer a correção do ângulo, tem-se a Equação 7.

$$FCA_{TPI(f)} = AF_{DPC(f)} - AF_{TPI(f)} \quad (7)$$

Sendo:

$FCA_{TPI(f)}$: Fator de correção do ângulo do TPI para determinada frequência f do ensaio;

$AF_{DPC(f)}$: Ângulo de fase da tensão medida no secundário do DPC para determinada frequência f do ensaio, sendo a média entre os 7 valores medidos;

$AF_{TPI(f)}$: Ângulo de fase da tensão medida no secundário do TPI para determinada frequência f do ensaio, sendo a média entre os 7 valores medidos.

Novamente, após calculado o fator de correção de ângulo, $FCA_{TPI(f)}$, é necessário somá-lo ao valor do ângulo da tensão medido pelo analisador de qualidade para cada ordem harmônica. Assim pode-se obter os valores de módulo e ângulo corrigidos para as 50 ordens harmônicas obtidas no Ensaio B.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através das medições realizadas para cada um dos ensaios de acordo com os procedimentos descritos e do devido tratamento matemático dos dados obtidos, foi possível encontrar os valores dos fatores de correção para a relação de transformação e para o ângulo de fase do TPI para cada ensaio. Desse modo, este capítulo do trabalho tem por objetivo apresentar os resultados, suas análises e possíveis questionamentos a respeito de cada ensaio.

4.4. ENSAIO A

Aplicou-se as Equações (2) e (3), obtendo os valores da relação de transformação e dos fatores de correção para a relação de transformação do TPI ao longo do espectro de frequências, mostrados na Tabela 2. A Figura 19 mostra o gráfico dos fatores de correção da relação de transformação para o Ensaio A, com o fator de correção não ultrapassando a sugestão de $\pm 5\%$ da relação de transformação nominal de 1 pu, para instrumentos PQ1, com maior classe de precisão [11].

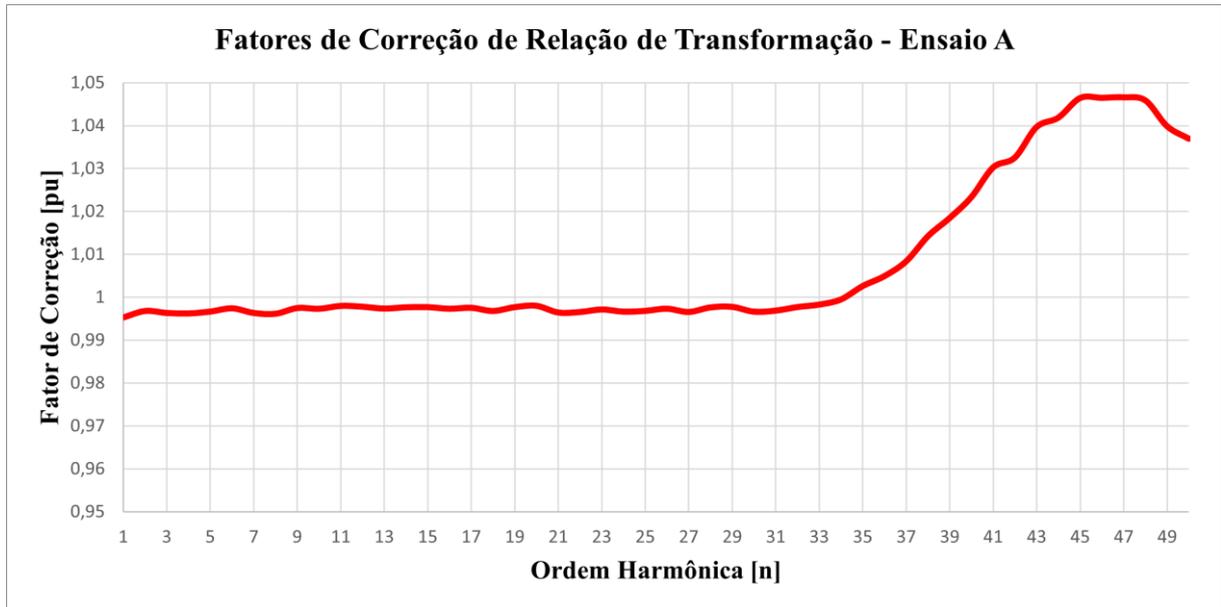
Tabela 2 - Valores de relação de transformação e de fator de correção da relação de transformação - Ensaio A.

Ordem	$RT_{TPI(f)}$	$FC_{RTPI(f)}$
1	53,12428001	0,995246731
2	53,20471457	0,996753617
3	53,17977347	0,996286363
4	53,17412869	0,996180612
5	53,19718165	0,996612493
6	53,23775822	0,997372667
7	53,17973802	0,996285699
8	53,17020091	0,996107027
9	53,24175013	0,997447453
10	53,2319516	0,997263884
11	53,26811903	0,997941456
12	53,25790378	0,99775008
13	53,23492149	0,997319523
14	53,25090021	0,997618873
15	53,25242796	0,997647494
16	53,23260611	0,997276146
17	53,24430342	0,997495287
18	53,20482139	0,996755618
19	53,2525569	0,99764991

20	53,26864664	0,99795134
21	53,18562174	0,996395926
22	53,19210005	0,996517293
23	53,22314734	0,997098942
24	53,19652402	0,996600173
25	53,20571836	0,996772422
26	53,23303155	0,997284116
27	53,19224236	0,996519959
28	53,24943432	0,997591411
29	53,25578009	0,997710294
30	53,19609374	0,996592112
31	53,20919224	0,996837503
32	53,25353439	0,997668223
33	53,28419675	0,998242661
34	53,34822371	0,999442162
35	53,51483286	1,002563469
36	53,63861536	1,004882449
37	53,82288154	1,008334549
38	54,13523177	1,014186215
39	54,36211197	1,018436659
40	54,62298446	1,023323925
41	54,99201127	1,030237387
42	55,11477519	1,032537285
43	55,49486161	1,039657942
44	55,61140185	1,041841243
45	55,85612625	1,046425985
46	55,8584041	1,046468659
47	55,86493322	1,046590978
48	55,82664872	1,045873744
49	55,50522484	1,03985209
50	55,34912068	1,036927586

Fonte: A autora.

Figura 19 - Fatores de Correção de Relação de Transformação - Ensaio A.



Fonte: A autora.

Para a conseguir o fator de correção para o ângulo de fase, aplicou-se a Equação (4), resultando nos valores mostrados na Tabela 3. A Figura 20 mostra o gráfico dos fatores de correção do ângulo para o Ensaio A. Para este ensaio, percebe-se que o limite sugerido para instrumentos PQ1 pela norma [11] é respeitado, uma vez que nenhum dos valores ultrapassa $\pm 5^\circ$.

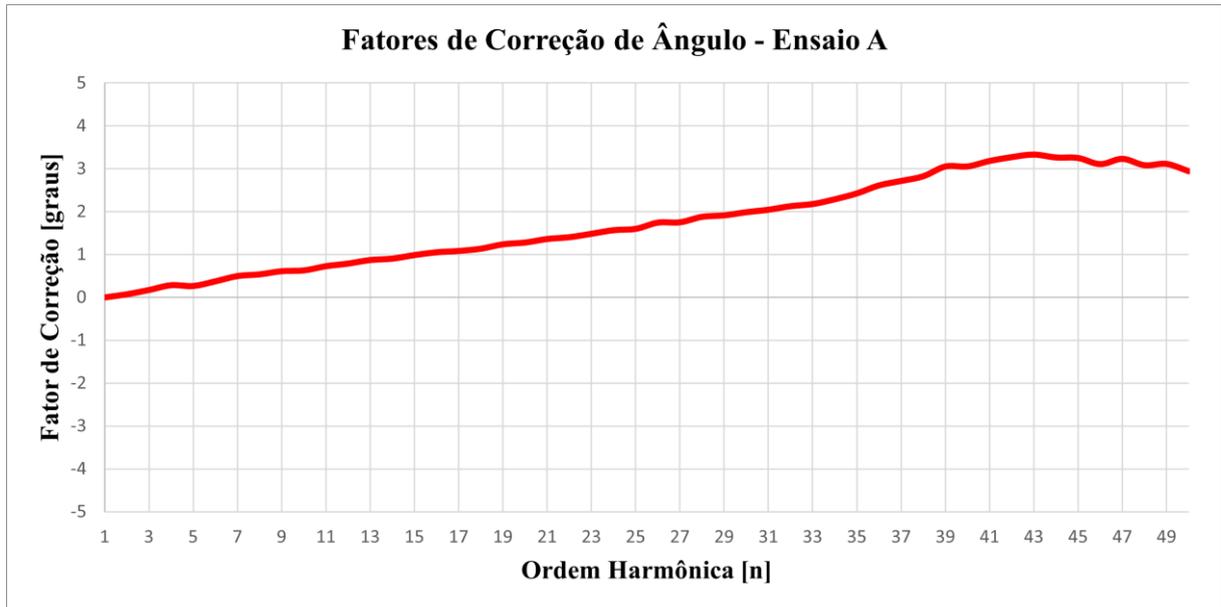
Tabela 3 – Fatores de Correção de Ângulo do Ensaio A.

Ordem	$FCA_{TPI(f)}$
1	0
2	0,072423642
3	0,173371543
4	0,284691885
5	0,265824744
6	0,37528055
7	0,498099908
8	0,537427643
9	0,612265587
10	0,629835298
11	0,72876456
12	0,78977785
13	0,872218885
14	0,904448577
15	0,987717434
16	1,053934419

17	1,083243206
18	1,136707487
19	1,23965571
20	1,280981253
21	1,363850671
22	1,405385094
23	1,485161798
24	1,569277653
25	1,59995422
26	1,745709392
27	1,753488046
28	1,881280776
29	1,915258458
30	1,989758265
31	2,046757343
32	2,129339194
33	2,179495717
34	2,291285796
35	2,428639098
36	2,614818043
37	2,718682482
38	2,828748225
39	3,056820537
40	3,057715533
41	3,186041205
42	3,274813303
43	3,334418431
44	3,265905844
45	3,253987562
46	3,110944596
47	3,2341773
48	3,085538509
49	3,115772009
50	2,945126833

Fonte: A autora.

Figura 20 - Fatores de correção de ângulo do Ensaio A.



Fonte: A autora.

4.5. ENSAIO B

Análogo ao Ensaio A, aplicadas as Equações (5) e (6), foram obtidos, respectivamente, os valores da relação de transformação e dos fatores de correção para a relação de transformação do TPI ao longo do espectro de frequências, mostrados na Tabela 4. A Figura 21 mostra o gráfico dos fatores de correção da relação de transformação para o Ensaio B, no qual é perceptível que a partir da 45ª ordem harmônica, o fator de correção ultrapassou a sugestão de $\pm 5\%$ da relação de transformação nominal de 1 pu.

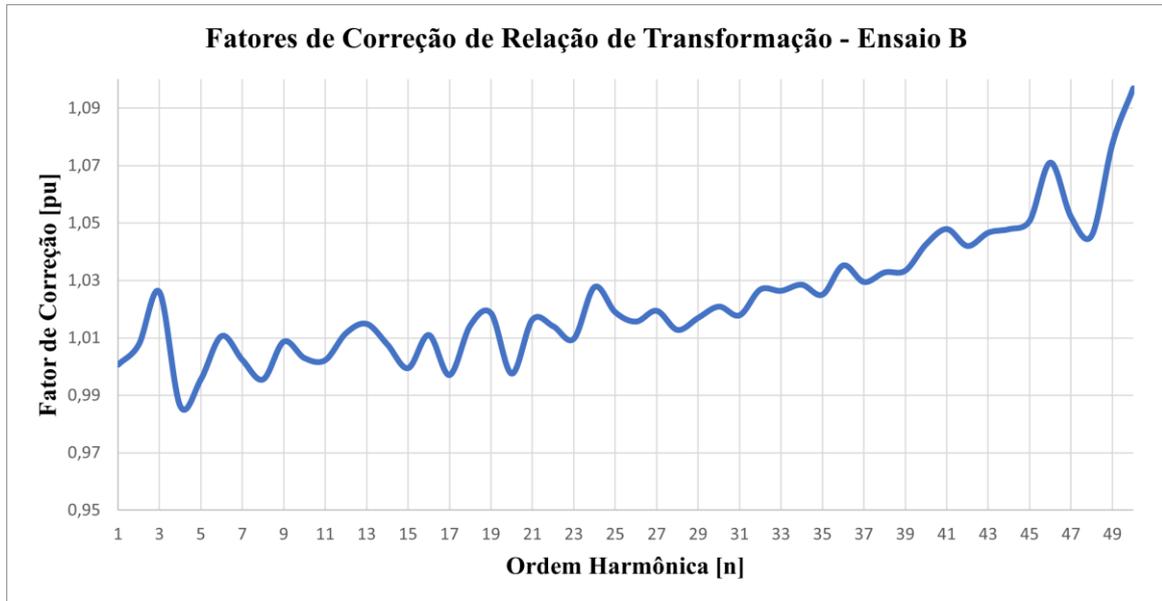
Tabela 4 - Valores de relação de transformação e de fator de correção da relação de transformação - Ensaio B.

Ordem	$RT_{TPI(f)}$	$FC_{RTPI(f)}$
1	53,40968456	1,000593588
2	53,78397461	1,007605654
3	54,7630011	1,02594704
4	52,64633909	0,986292838
5	53,13888949	0,99552043
6	53,94519908	1,010626083
7	53,50155129	1,002314648
8	53,13773288	0,995498761
9	53,8414005	1,008681489
10	53,53484837	1,002938446
11	53,4961349	1,002213176

12	53,996399	1,011585279
13	54,17093126	1,01485502
14	53,78829182	1,007686534
15	53,34808045	0,999439478
16	53,96401751	1,010978634
17	53,21999428	0,997039872
18	54,14171973	1,014307762
19	54,3710601	1,018604296
20	53,24629999	0,997532691
21	54,25085621	1,016352359
22	54,1279067	1,014048985
23	53,89429426	1,009672417
24	54,85731094	1,02771387
25	54,38722695	1,018907171
26	54,21285788	1,015640486
27	54,41408837	1,019410401
28	54,05891154	1,012756408
29	54,28277312	1,0169503
30	54,49221066	1,020873968
31	54,33077947	1,017849666
32	54,80986474	1,026824998
33	54,78518269	1,026362597
34	54,89917533	1,02849817
35	54,71470477	1,025042242
36	55,25777465	1,035216281
37	54,94896102	1,029430871
38	55,12751561	1,032775968
39	55,16105501	1,033404305
40	55,65066096	1,042576735
41	55,93323898	1,047870639
42	55,61870493	1,041978061
43	55,86604235	1,046611757
44	55,93117732	1,047832015
45	56,08707442	1,05075264
46	57,16846818	1,071011806
47	56,15473139	1,052020147
48	55,81807962	1,045713208
49	57,52922836	1,077770399
50	58,55028011	1,096899099

Fonte: A autora.

Figura 21 - Fatores de correção de relação de transformação do Ensaio B.



Fonte: A autora.

Já para a obtenção do fator de correção para o ângulo de fase, aplicou-se a Equação (7), resultando nos valores mostrados na Tabela 5. A Figura 22 mostra o gráfico dos fatores de correção do ângulo para o Ensaio B. Percebe-se que, na 49ª ordem harmônica, o fator de correção de ângulo não está dentro da sugestão de $\pm 5^\circ$.

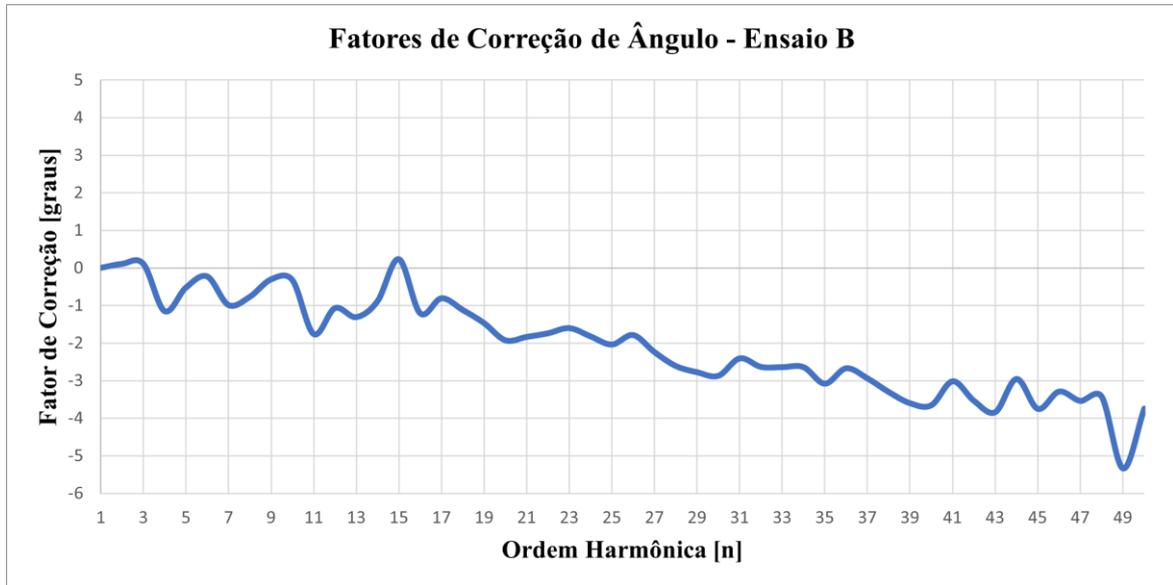
Tabela 5 - Fatores de Correção de Ângulo do Ensaio B.

Ordem	$FCA_{TPI(f)}$
1	0
2	0,105118238
3	0,10863826
4	-1,151390843
5	-0,52732621
6	-0,228037134
7	-0,987439727
8	-0,771516917
9	-0,305995822
10	-0,324729399
11	-1,761051851
12	-1,070822196
13	-1,311044066
14	-0,884821108
15	0,231008457
16	-1,209139949
17	-0,809141453
18	-1,119866258

19	-1,468790744
20	-1,926799021
21	-1,836174404
22	-1,740699456
23	-1,602777278
24	-1,822824807
25	-2,039470518
26	-1,787452047
27	-2,240036678
28	-2,610042106
29	-2,775465428
30	-2,871290568
31	-2,408523897
32	-2,634444083
33	-2,640820211
34	-2,641031907
35	-3,080102751
36	-2,671554468
37	-2,939512123
38	-3,301608666
39	-3,600651348
40	-3,655086485
41	-3,016136806
42	-3,537122114
43	-3,838567724
44	-2,954613726
45	-3,75048829
46	-3,290439786
47	-3,539235354
48	-3,428336461
49	-5,335077438
50	-3,742308192

Fonte: A autora.

Figura 22 - Fatores de correção de ângulo do Ensaio B.



Fonte: A autora.

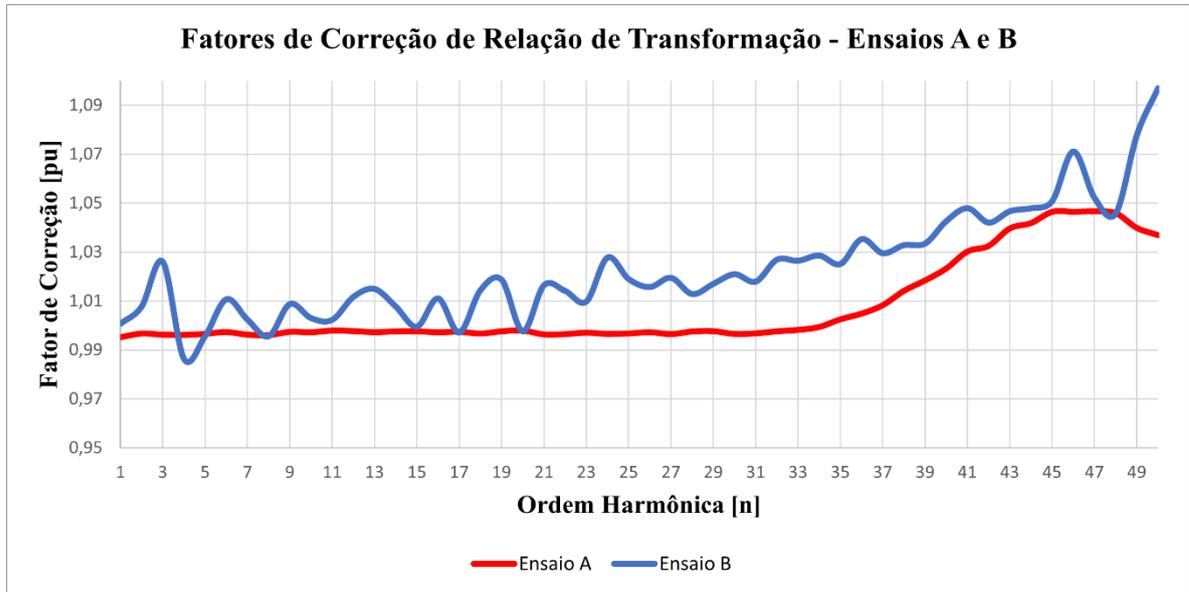
4.6. COMPARAÇÃO E CONSIDERAÇÕES GERAIS

Nesta subseção, são apresentados os resultados em forma de gráficos sobrepostos a fim de indicar os pontos de diferença entre os resultados dos dois ensaios.

A Figura 23 mostra os fatores de correção de relação de transformação para os dois ensaios. Percebe-se que o Ensaio B apresentou uma relação de transformação que, para as ordens harmônicas 45^a, 46^a, 47^a, 49^a e 50^a, o fator de correção ultrapassou o valor sugerido de $\pm 5\%$ da relação de transformação nominal de 1 pu para instrumentos classe PQ1. Já o Ensaio A manteve-se dentro dos valores sugeridos, sendo o seu maior valor alcançado em 1,046590978 pu na 47^a ordem harmônica.

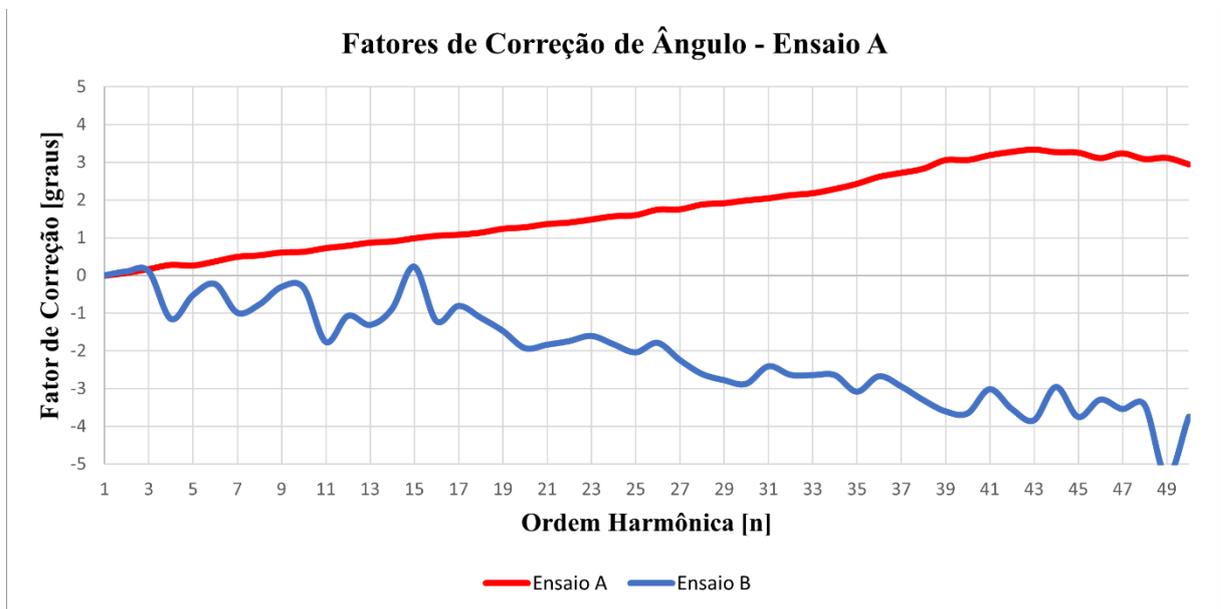
Na Figura 24, que mostra a comparação os fatores de correção de ângulo para os dois ensaios, limitou-se o eixo dos fatores de correção de ângulo para $\pm 5^\circ$ para tornar nítida a diferença entre os ensaios. O Ensaio B apresentou um fator de correção de $-5,335077438$ para a 49^a ordem harmônica, ultrapassando o valor sugerido de $\pm 5^\circ$, enquanto no Ensaio A, conforme já mencionado, nenhuma ordem ultrapassou os valores propostos.

Figura 23 - Comparação dos fatores de correção de relação de transformação.



Fonte: A autora.

Figura 24 - Comparação dos fatores de correção de ângulo.



Fonte: A autora.

As prováveis explicações para a divergência entre as duas respostas em frequência incluem, em primeiro lugar, a presença da tensão fundamental nominal no Ensaio B. Assim, pode-se dizer que a resposta em frequência do TPI analisado sofreu influência da presença da tensão fundamental. A outra possibilidade encontra-se no fato de o valor de tensão harmônica aplicada no Ensaio B (5% a 10%) ser maior do que no Ensaio A (2%) ao longo do espectro

harmônico, entretanto, esse não parece ser o fator principal, pois as amplitudes das harmônicas são muito menores que a tensão fundamental nominal do equipamento. Considerando as sugestões da IEC 61869-103 [11], para instrumentos classe PQ1, existe a necessidade de correção de relação de transformação para as últimas ordens harmônicas do espectro, sendo elas a 45^a, 46^a, 47^a, 48^a e 50^a ordens.

A respeito da correção do ângulo de fase, a IEC/TR 61869-103 [11] sugere que os transdutores de potencial classe PQ1, com a intenção de serem utilizados em medições de qualidade da energia, apresentem o erro de ângulo na faixa de $\pm 5^\circ$. Assim, é necessária a correção para a 49^a ordem.

A realização de dois procedimentos diferentes para levantamento da resposta em frequência de TPIs foi importante para demonstrar que estes equipamentos sofrem influência da tensão fundamental nominal na obtenção da sua resposta em frequência. Portanto, apesar do Ensaio A ser mais atrativo do ponto de vista técnico, para realização tanto em laboratório quanto em campo, pois não requer a imposição de tensão nominal fundamental no equipamento, verifica-se que este pode apresentar discrepâncias quando comparado com o Ensaio B, mesmo para TPIs de média tensão. Conforme as pesquisas e estudos disponíveis na literatura, a influência da tensão fundamental nominal tende a ser ainda maior conforme aumenta-se a classe de tensão do TPI.

5. CONCLUSÃO

O trabalho procurou aprofundar os conhecimentos sobre as técnicas de levantamento de resposta em frequência de transformadores de potencial. O objeto de estudo foi o transformador de potencial indutivo (TPI), uma vez que é conhecida na literatura a não linearidade deste equipamento ao longo do espectro de frequência, resultando em relações de transformação diferentes da nominal. Também foi evidenciada divergências a respeito do melhor procedimento para realizar o levantamento da resposta em frequência para esses TPIs, sendo consultados e tomados como base para o ensaio os documentos disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e a IEC/TR 61869-103. Dessa forma, como descrito no Capítulo 2 deste documento, foram selecionados os dois procedimentos denominados Procedimento A e Procedimento B e um espectro de frequências de 60 Hz a 3 kHz, ou seja, da 1ª a 50ª ordem harmônica.

Para realizar essa investigação, foram necessários ensaios laboratoriais, feitos no Laboratório de Ensaio de Transformadores, no bloco 1P da UFU. O Procedimento A, chamado de Arranjo A neste trabalho, consiste naquele em que se aplica um nível de tensão inferior ao nominal do TPI através do gerador de sinais, e é recomendado ser realizado em transdutores que não tem a sua resposta em frequência afetada pela tensão nominal fundamental do equipamento.

Já o Procedimento B, chamado de Arranjo B neste trabalho, é caracterizado pelo teste envolvendo a tensão fundamental nominal acrescida de componentes harmônicas, ou seja, deve-se levar em consideração a influência da resposta em frequência diante da tensão fundamental nominal.

A respeito dos resultados, é nítido que o denominado Ensaio B apresentou maior não linearidade tanto em módulo quanto em ângulo de fase, o que se deve, possivelmente, à presença da tensão fundamental e a sua influência na obtenção da resposta em frequência do TPI, conforme esperado. Portanto, dentre os procedimentos orientados no Capítulo 2, a menos que se comprove que a resposta em frequência do transdutor que se deseja realizar o ensaio não é influenciada pela presença da tensão fundamental e de variações de carga, o Procedimento B é o mais adequado para garantir as medições corretas no que diz respeito a distorções harmônicas. Contudo, sabendo da dificuldade de execução deste teste em campo, muitas vezes o Procedimento A é realizado. Os resultados obtidos neste ensaio mostraram indicadores dentro da faixa estabelecida, mas não compreenderam toda a manifestação dos efeitos do fenômeno de distorções harmônicas, podendo implicar em perda da confiabilidade de medição.

Percebe-se que o trabalho teve seus objetivos de estudos, realização de ensaios e análise dos resultados dos procedimentos atingidos, sendo possível verificar a não linearidade do TPI e apontar a necessidade da aplicação de fatores de correção para determinadas ordens harmônicas. O objetivo dessas correções concentra-se no fato de que a não linearidade do TPI pode impactar nos indicadores de distorção harmônica, uma vez que as medições de tensão no secundário podem carregar os erros da resposta não linear do TPI. Dentre outros propósitos, também foi possível levantar as curvas de resposta em frequência e analisar os resultados de acordo com os indicadores propostos pela IEC/TR 61869-103 para os dois ensaios.

Dessa forma, o trabalho teve como contribuição a implementação laboratorial, realização e comparação dos dois ensaios para levantamento de resposta em frequência de TPs recomendados pelas normativas nacionais a fim de se obter um direcionamento sobre qual procedimento é o mais adequado a depender das informações disponíveis do equipamento, do contexto em que o TPI se encontra, das considerações a respeito dos aspectos construtivos do equipamento e da estrutura laboratorial disponível. A fim de se atingir um maior aprofundamento nas técnicas de levantamento de resposta em frequência e, assim, observar os impactos ao longo do espectro de frequências nas campanhas de medição de QEE, sugere-se para trabalhos futuros a realização dos Procedimentos A e B, discutidos ao longo do trabalho, utilizando TPIs com maiores níveis de tensão, como por exemplo 69 kV e 138 kV, a fim de comparar os resultados e verificar a influência da tensão fundamental nominal na obtenção da resposta em frequência em TPIs de maiores níveis de tensão.

REFERÊNCIAS

- [1] DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. **Electrical Power Systems Quality**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [2] ARRILLAGA, J., **Power System Harmonics**. 2 ed. West Sussex; Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.
- [3] LEÃO, Ruth Pastôra Saraiva; SAMPAIO, Raimundo Furtado; ANTUNES, Fernando Luiz Marcelo. **Harmônicos em sistemas elétricos**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- [4] ONS, **Submódulo 9.7 - Indicadores de qualidade de energia elétrica da Rede Básica**, Rio de Janeiro, RJ, 2021.
- [5] ONS NT 009/2016 - REV. 03: 3: **Instruções para realização de estudos e medições de QEE relacionados aos acessos à Rede Básica ou aos barramentos de fronteira com a Rede Básica para parques eólicos, solares, consumidores livres e distribuidoras**, Rio de Janeiro, RJ, 2019.
- [6] S. Zhao, “**Design and Implementation of a Frequency Response Test System for Instrument Voltage Transformer Performance Studies**” PhD Thesis – University of Manchester (2013).
- [7] K. Kunde, H. Däumling, R. Huth, H. W. Schlierf and J. Schmid, “**Frequency response of instrument transformers in the kHz range**”. *elektrotechnik & automation - etz* (2012), Vol. 6, pp. 1-4.
- [8] M. Klatt, J. Meyer, M. Elst and P. Schegner, “**Frequency Responses of MV voltage transformers in the range of 50 Hz to 10 kHz**” 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power -ICHQP (2010), pp. 1-6.
- [9] D. Slomovitz, G. Aristoy, A. Santos, M. Brehm and L. Trigo, “**Behavior of voltage transformers under distorted waveforms**”, *Journal of Physics: Conference Series* (2014), Vol. 975.
- [10] ONS, **Submódulo 2.9 - Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica**, Rio de Janeiro, RJ, 2022.
- [11] IEC/TR, 61869-103 **Instrument Transformers - The use of Transformer Instruments for Power Quality**, 2015.
- [12] ONS. RE 2.1-028/2005-Rev.4 - **Definição das Metodologias e Procedimentos Necessários às Campanhas de Medição dos Indicadores de Desempenho**. 2005.
- [13] California Instruments – Ametek Programmable Power, “**CSW series AC power source user manual**”. Disponível em: <https://www.programmablepower.com/products/ac-power-sources/csw-series>. Acessado em 06 de junho de 2023.
- [14] Fluke 434/435 “**Three Phase Power Quality Analyzer Users Manual**”. Disponível em: https://assets.fluke.com/manuals/434_435_umeng0300.pdf. Acessado em 08 de junho de 2023.

[15] IEC/TR 61000-4-30 **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods**, 2003.

[16] ScopeMeter® Test Tool 190 Series II, “**Users Manual**”. Disponível em: https://damassets.fluke.com/s3fs-public/190_104_umeng0200_2.pdf. Acessado em 08 de junho de 2023.