

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE TRANSFORMADORES DE
POTENCIAL INDUTIVO: UMA ANÁLISE EXPERIMENTAL.**

HENRIQUE JOSÉ DE FARIA NETO

**Uberlândia
2018**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE TRANSFORMADORES DE
POTENCIAL INDUTIVO: UMA ANÁLISE EXPERIMENTAL.**

HENRIQUE JOSÉ DE FARIA NETO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, perante a Banca Examinadora abaixo, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Antônio Carlos Delaiba, **Dr. (Orientador) – UFU**
Isaque Nogueira Gondim, **Dr. UFU**
Mateus Duarte Teixeira, **Dr. UFPR**

Uberlândia, agosto de 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

F224 Faria Neto, Henrique José de, 1993-
2018 Resposta em frequência de transformadores de potencial indutivo
[recurso eletrônico] : uma análise experimental / Henrique José de Faria
Neto. - 2018.

Orientador: Antônio Carlos Delaiba.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1194>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia elétrica. 2. Distorção elétrica. 3. Energia elétrica -
Controle de qualidade. I. Delaiba, Antônio Carlos (Orient.) II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Maria Salete de Freitas Pinheiro - CRB6/1262

RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE TRANSFORMADORES DE POTENCIAL INDUTIVO: UMA ANÁLISE EXPERIMENTAL.

HENRIQUE JOSÉ DE FARIA NETO

Dissertação apresentada por Henrique José de Faria Neto à
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre
em Ciências.

Prof. Antônio Carlos Delaiba
Orientador

Prof. José Rubens Macedo Jr.
Coordenador da Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Acácia e Reiler, à minha irmã Renata e minha namorada Amanda.

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, pela vida e capacidade de evolução e crescimento.

Ao Prof. Antônio Carlos Delaiba, pela confiança, amizade, ensinamentos, incentivo e comprometimento na orientação durante o andamento deste trabalho.

Aos meus pais, Acácia Fernandes Mendes Soares e Reiler José Soares, pelo apoio incondicional nas minhas decisões e incentivo.

Aos meus avós, Benedita de Oliveira Faria e Henrique José de Faria, Fernandina Fernandes Mendes e José Dias Mendes, esses dois últimos in memoriam, pelo apoio e incentivo.

À minha irmã, Renata Fernandes Mendes Soares, pelo estímulo e incentivo.

À minha namorada, Amanda Alves Faria, pelo apoio, incitação, paciência e companheirismo ao longo destes anos.

Aos Profs. Arnaldo, Isaque, Ivan, José Carlos, José Rubens, José Wilson e Paulo Henrique, pelas horas de conhecimento repassados.

Ao Prof. Mateus Duarte Teixeira, que em momento oportuno participou de forma fundamental no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos Arthur Costa, Eurípedes Caetano, Fabrício Montes, Giordanni da Silva, Guilherme Xavier, Gustavo Gonçalves, João Paulo, Leandro Pains, Leonardo Borges, Lucas Dias, Lucas Tiago, Lucas Dias e Pedro Barra, pelo convívio diário, amizade e compartilhamento de conhecimentos e experiências de vida.

À Cinara Fagundes e Patrícia no esclarecimento dos trâmites burocráticos da secretaria da pós-graduação.

À Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica e ao Programa de Pós-Graduação pela oportunidade de aprendizagem e desenvolvimento.

À CAPES, pelo fomento financeiro.

RESUMO

Diante do demasiado crescimento de componentes eletrônicos com características não lineares incorporados ao sistema elétrico de potência, nota-se paralelamente o surgimento das indesejáveis componentes harmônicas circulando entre as barras do mesmo. Com isso, o nível de distorção harmônica tende a crescer significativamente, comprometendo o funcionamento de vários equipamentos no que diz respeito às características relacionadas com a suportabilidade dielétrica e térmica. Além de desrespeitar as recomendações impostas pelos órgãos regulatórios existentes, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Logo, para que correções que visam atenuar esses efeitos sejam tomadas é necessário obter as medições desses níveis de distorções harmônicas de maneira correta. Entretanto, em tensões mais elevadas é natural utilizar transdutores para realizar a conexão aos equipamentos analisadores de qualidade e neste caso é que se encontram os erros de medição. Em altas frequências, os transformadores de potencial não mantêm suas relações de transformações unitárias, como na frequência fundamental e intrinsecamente são apresentados erros neste processo de transformação da tensão primária para secundária. Portanto, neste contexto, este trabalho agrega a necessidade do levantamento da curva de resposta em frequência dos tipos existentes de Transformadores de Potencial, com o intuito de reduzir interpretações equivocadas dos níveis de distorção harmônicas de barramentos do sistema. Para isso, lançou-se mão da Análise de Resposta em Frequência, comumente conhecida como FRA, a fim de descobrir o comportamento dos transdutores em altas frequências, podendo levar a medições mais confiáveis. Por fim, apresenta-se uma análise de transdutores comerciais sob o ponto de vista de suas curvas de resposta em frequência levantadas através de ensaios experimentais, bem como os erros associados aos mesmos em dois estudos de casos.

Palavras-chave: Distorções Harmônicas, Transformadores de Potencial, Analise de Resposta em Frequência, Erros de Medição.

ABSTRACT

Faced with the growing of electronic components with nonlinear characteristics associated with electrical power systems, its noted the appearance of undesirable harmonics flowing between the busbars, so that the level of harmonic distortion tends to increase. It might compromise the operation of equipment, such as capacitors, electrical machines and transformers. Also, it violates the rules imposed by ANEEL and ONS. Therefore, for the corrections that can mitigate these effects to be taken, it is necessary to get accurate measurements of harmonics levels. However, in high voltages, transductors of potential are typically used to connect quality analyzers. That's when measurement mistakes are found. In high frequencies, potential transformers do not keep their unitary transformation ratio, as it happens in the fundamental frequency. It leads to mistakes in the process of transformation of the primary to secondary voltage. Therefore, the objective of this study is to find the frequency response curve of several kinds of the potential transformers, in order to reduce misinterpretation about the distortions levels. For this purpose, the Frequency Response Analysis (FRA) was used to find the behavior of the transductors in high frequency, leading to reliable results. Finally, a frequency response analysis of the commercial equipment in terms of its practical tests is presented, as well as the associated mistakes.

Keywords: Harmonics Distortions, Voltage Transformers, Frequency Response Analysis, Measurements Mistakes.

SUMÁRIO

Capítulo 1	1
1. Introdução	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Motivação	5
1.3 Estado da Arte	6
1.4 Objetivos da Dissertação	10
1.5 Contribuições	11
1.6 Estrutura da Dissertação	12
Capítulo 2	14
2. Transformadores de Potencial	14
2.1 Considerações iniciais	14
2.2 Transformador de Potencial Indutivo	14
2.2.1 Funcionamento e Conexões	14
2.2.2 Materiais de Construção	17
2.3 Transformadores de Potencial Capacitivo	18
2.3.1 Funcionamento e Conexões	18
2.3.2 Materiais de Construção	20
2.4 Efeitos Associados a Fabricação dos Equipamentos	20
2.5 Especificação do Transdutor de Potencial Indutivo	21
2.5.1 Tensão Primária e Relação Nominal	22
2.5.2 Tensão Máxima do Equipamento e Níveis de Isolação	23
2.5.3 Frequência	24
2.5.4 Exatidão	24
2.5.5 Cargas Nominais, Potência Nominal e Potência Térmica Nominal	26
2.5.6 Grupos de Ligação	28
2.5.7 Carga Simultânea para TPI de dois ou Mais Secundários	28
2.5.8 Uso Interno e Externo	29
2.6 Considerações Finais	29
Capítulo 3	30
3. Resposta em Frequência	30
3.1 Considerações Iniciais	30
3.2 Tipos de Ensaios	32
3.3 Tratamento dos Dados	36
3.4 Interpretação Típica	37
3.5 Considerações Finais	39

Capítulo 4	40
4. Análise Experimental	40
4.1 Considerações Iniciais	40
4.2 Estrutura do Laboratório	40
4.2.1 Ambiente Laboratorial	40
4.3 Equipamentos utilizados	42
4.3.1 Gerador de sinais	42
4.3.2 Osciloscópio	42
4.3.3 Transformadores de Potencial	43
4.3.4 Software Utilizado	44
4.4 Recomendações Para os Procedimentos de Ensaio	44
4.4.1 Conexões e Ensaio	45
4.5 Ensaios no Transformador de 15 kV	46
4.5.1 Efeitos do Aterramento	48
4.5.2 Efeito da Variação da Conexão Para Terra	51
4.6 Unidades de 15 kV Idênticas e de Resposta Divergentes	52
4.7 Transformador de 60 kV	55
4.7.1 TAP de 15 kV	55
4.7.2 TAP de 25 kV	57
4.7.3 Tap de 45 kV	61
4.7.4 Tap de 60 kV	63
4.8 Efeito Sobre o ângulo de Fase	64
4.9 Erro de Relação de Transformação Quantificado	66
4.10 Considerações Finais	68
Capítulo 5	70
5. Estudo de caso	70
5.1 Considerações Iniciais	70
5.2 Limites de Distorções Harmônicas	71
5.3 Estudos de Caso	73
5.4 Sistema 1, Caso 1	73
5.4.1 Características do Sistema	74
5.4.2 Apresentação dos Resultados	75
5.4.3 Análise das Distorções Frente às Recomendações da ANEEL e ONS.	77
5.4.4 Inserção do Erro de Medição do Transformador de Potencial de 60 kV, TAP de 15 kV	81
5.5 Sistema 2, Caso 2	85
5.5.3 Característica do Sistema	85
5.5.2 Apresentação dos Resultados	86
5.5.3 Análise das Distorções Frente às Recomendações da ANEEL e ONS.	87
5.5.4 Inserção do Erro de Medição do Transformador de Potencial de 60 kV, TAP de 25 kV	91
5.6 Nível de Tensão na Baixa dos Transformadores de Potencial	94
5.7 Considerações Finais	98

Capítulo 6	99
6. Conclusões	99
7. Referências Bibliográficas	102

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Evolução da potência solar instalada, em MW, até 23/05/2017	2
Figura 1.2 – Evolução/previsão da potência eólica instalada, em MW, até 2020	3
Figura 2.1 - Circuito magnético do transformador de potencial	16
Figura 2.2 - Circuito elétrico ilustrativo do funcionamento do transformador de potencial ...	16
Figura 2.3 - Transformador de potencial encapsulado com resina epóxi.....	17
Figura 2.4 - Composição elétrica do transformador de potencial capacitivo	18
Figura 3.1 - Exemplo de resposta em frequência de um sistema de segunda ordem.	30
Figura 3.2 - Exemplo de aplicação da análise de resposta em frequência.	31
Figura 3.3 - Exemplo de deformação ocasionada por estresse eletromecânico.	31
Figura 3.4 - Esquema de ligação do ensaio <i>end-to-end open</i>	33
Figura 3.5 - Esquema de ligação do ensaio <i>end-to-end short-circuit</i>	34
Figura 3.6 - Esquema de ligação do ensaio <i>capacite inter-winding</i>	35
Figura 3.7 - Esquema de ligação do ensaio <i>inductive inter-winding</i>	35
Figura 3.8 - Faixa de frequência para interpretação de falhas.....	37
Figura 4.1 - Vista externa do LAC (Laboratório de alta tensão do Institutos LACTEC).	41
Figura 4.2 - Vista frontal do gerador de sinais da Agilent.	42
Figura 4.3 - Vista frontal osciloscópio Tektronix.	43
Figura 4.4 - Esquemático de ligação dos instrumentos de medição e do transdutor de potencial.	45
Figura 4.5 - Exemplo de conexão dos equipamentos em laboratório (ênfase no conexão à terra).....	46
Figura 4.6 - Montagem experimental em um dos transformadores de potencial indutivo de 15 kV	47
Figura 4.7 - Resposta em frequência da impedância do transformador de potencial de 15 kV.	47
Figura 4.8 - Amplitude da função transferência H do transformador de potencial de 15 kV. 48	
Figura 4.9 - Magnitude da impedância, em Ω , do transformador de potencial 15kV, sob efeito da conexão para terra. a) todo espectro de frequência; b) zoom da variação.	49
Figura 4.10 - Comparativo da amplitude, em dB, da resposta em frequência do transformador de potencial de 15kV: a) todo o espectro de frequência; b) zoom da variação.	50
Figura 4.11 - Variação da impedância, em Ω , do transformador de potencial de 15kV, sob troca do condutor de conexão para terra.....	51
Figura 4.12 - Variação da amplitude, em dB, do transformador de potencial de 15kV, sob troca do condutor de conexão para terra: a) todo espectro de frequência; b) zoom da variação.	52
Figura 4.13 - Diferença de resposta em frequência, em dB, de transformadores de fabricação idêntica. a) todo espectro de frequência; b) zoom da variação.....	54
Figura 4.14 - Magnitude da impedância, em Ω , do transformador de potencial de 60 kV, TAP 15kV.	55
Figura 4.15 - Comparação normalizada da resposta em frequência, em PU, entre os transformadores de 15kV e 60 kV (no TAP de 15kV).	56
Figura 4.16 - Ensaio de resposta em frequência do TP de 60 kV (25 kV).	58
Figura 4.17 - Impedância do transformador de 60 kV, tap de 15 kV.....	59

Figura 4.18 - Comparaçao entre as impedâncias, em Ω , dos TAPs do transformador de potencial de 60 kV.....	59
Figura 4.19 - Diferença entre as respostas do TAPs de 15 e 25 kV do transformador de potencial de 60 kV. a) todo espectro de frequêcia; b) zoom da variação.....	60
Figura 4.20 - Diferença em a impedâancia, em Ω , dos TAPs de 15, 25 e 45 kV do transformador de potencial de 60 kV.	61
Figura 4.21 - Diferença entre as respostas do TAPs de 15, 25 e 45 kV do transformador de potencial de 60 kV. a) todo espectro de frequêcia; b) zoom da variação.....	62
Figura 4.22 - Diferença em a impedâancia, em Ω , dos TAPs de 15, 25, 45 e 60 kV do transformador de potencial de 60 kV.	63
Figura 4.23 - Diferença entre as respostas do TAPs de 15, 25, 45 e 60 kV do transformador de potencial de 60 kV. a) todo espectro de frequêcia; b) zoom da variação.	64
Figura 4.24 - a) variação da amplitude e ângulo de fase para o transformador de potencial de 15 kV; b) Variação da amplitude e ângulo de fase para o transformador de 60 kV, TAP 15 kV; c) comparação da variação do ângulo de fase entre os transformadores de 15 e 60 kV.	65
Figura 5.1 - Diagrama do circuito utilizado para a simulaçao dos estudo de caso 1.....	74
Figura 5.2 - Diagrama do circuito utilizado para a simulaçao dos estudo de caso 2.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tensões primárias e secundárias nominais para TPs.....	22
Tabela 2 - Níveis de isolação nominal para equipamentos.....	23
Tabela 3 - Cargas padronizadas para levantamento da exatidão do transdutor.....	27
Tabela 4 - Fatores de sobretensão nominal.	28
Tabela 5 - Relação direta entre as falhas mecânicas e as faixas de frequência.	38
Tabela 6 - Interpretação típica da amplitude do sinal mensurado pelo transdutor de potencial.	39
Tabela 7 - Dados de placa Transformador de Potencial Indutivo classe 15 kV.	43
Tabela 8 - Erro percentual da relação de transformação dos transformadores de potencial para as ordens harmônicas.....	67
Tabela 9 - Limites de distorções harmônicas segundo a ANEEL.	71
Tabela 10 - Limites de distorções harmônicas globais, segundo o ONS.	72
Tabela 11 - Limites de distorções harmônicas individuais, segundo ONS.	72
Tabela 12 - Dados dos elementos do circuito da Figura 5.1.....	75
Tabela 13 - Tensões encontradas pós simulação do sistema 1.	76
Tabela 14 - Tensões harmônicas de ordem par, não múltiplas de três.	77
Tabela 15 - Tensões harmônicas de ordem ímpar.	78
Tabela 16 - Tensões harmônicas múltiplas de três.	79
Tabela 17 - Resumo das tensões encontradas na simulação do sistema 1 sob o aspecto dos limites globais de [36].	80
Tabela 18 - Resultado das tensões simuladas com a inserção do erro do transformador de potencial.	82
Tabela 19 - Resumo das distorções de tensão encontradas com a inserção do erro do transformador.	83
Tabela 21 - Valores dos elementos que compõe o sistema do estudo de caso 2.	86
Tabela 22 - Tensões harmônicas encontradas após simulação do estudo de caso 2.....	87
Tabela 23 - Tensões harmônicas de ordem par, não multiplas de três.	88
Tabela 24 - Tensões harmônicas de ordem ímpar.	89
Tabela 25 - Tensões harmônicas múltiplas de três.	89
Tabela 25 - Resumo das tensões encontradas na simulação do sistema 2 sob o aspecto dos limites globais e individuais de [36].....	90
Tabela 26 - Resultado das tensões simuladas com a inserção do erro do transformador de potencial.	92
Tabela 27 - Resumo das distorções de tensão encontradas com a inserção do erro do transformador.	93
Tabela 28 - Tensões resultantes da simulação do sistema 1, sem erro associado ao transdutor.	95
Tabela 29 - Tensões resultantes da simulação do sistema 2, sem erro associado ao transdutor.	96
Tabela 30 - Tensões resultantes da simulação do sistema 1, com erro associado ao transdutor.	97
Tabela 31 - Tensões resultantes da simulação do sistema 2, com erro associado ao transdutor.	98

LISTA DE SIMBOLOGIAS E SIGLAS

TP – Transformador de potencial;

TPs – Transformadores de potencial;

TPI – Transformador de potencial indutivo;

ASEA – Atual ABB (Asea Brown Boveri);

TPC – Transformador de potencial capacitivo;

TPCs – Transformadores de potencial capacitivo;

V_{pri} – Tensão de entrada da rede;

V_{sec} – Tensão secundária fornecida;

N_1 – Número de espiras no primário do transformador;

N_2 – Número de espiras no secundário do transformador;

i_{ex} – Corrente de excitação;

$\varphi(t)$ – Fluxo magnético que percorre o núcleo do transformador;

E_1 – Força contra eletromotriz induzida no primário do transformador;

E_2 – Força eletromotriz induzida no secundário do transformador;

ϕ_m – Fluxo magnético máximo, de pico, que percorre o núcleo do transformador;

ω – frequência angular, rad/s;

$\frac{\partial \varphi}{\partial t}$ – Taxa de variação do fluxo magnético no tempo, Weber/s;

r_1 – Resistência do enrolamento de alta do transformador;

r_2 – Resistência do enrolamento de baixa do transformador;

x_1 – Reatância de dispersão do enrolamento de alta do transformador;

x_2 – Reatância de dispersão do enrolamento de alta do transformador;

c_1 – Capacitância superior do divisor capacitivo;

c_2 – Capacitância inferior do divisor capacitivo;

X_{C1} – Reatância capacitância superior do divisor capacitivo;
 X_{C2} – Reatância capacitância inferior do divisor capacitivo;
 I – Corrente que percorre a malha de alta do divisor capacitivo;
 K_p – Relação entre as tensões nominais de alta e baixa;
 $V_{pri(n)}$ – Tensão nominal primária do equipamento;
 $V_{sec(n)}$ – Tensão nominal secundária do equipamento;
 K_r – Relação entre as tensões medidas de alta e baixa;
 $|\vec{V_{pri}}|$ – Tensão primária do transformador, via diagrama fasorial;
 FCR_p – Fator de correção de relação. É a razão entre K_r e K_p ;
 ε – Erro de relação;
FRA – Análise de Resposta em Frequência;
dB – Decibel;
 $V_{pri(f)}$ – Tensão aplicada pelo gerador de frequência variável;
 $V_{sec(f)}$ – Tensão medida pelo osciloscópio, também com frequência variável;
 θ_{sec} – Ângulo de fase medido no secundário do TP;
 θ_{pri} – Ângulo de fase medido no primário do TP;
 θ_{res} – Ângulo de fase resultante;
TAPs – Derivação de tensão do transformador;
GPIB – Protocolo de comunicação *General Purpose Interface Bus*;

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A começar pelo advento da eletrônica de potência, em meados do século passado, a quantidade de componentes eletrônicos desenvolvidos a partir deste período fora de suma importância para o desenvolvimento de tecnologias utilizadas até os dias de hoje. Desde os simples semicondutores como os transistores e diodos até as chaves sólidas, pode-se destacar o emprego maciço destes componentes na construção de equipamentos voltados para as diversas áreas da Engenharia Elétrica, principalmente no que diz respeito a chaveamentos envolvendo processos que demandam condução e controle das grandezas elétricas como tensão e corrente.

A aplicabilidade destes componentes eletrônicos é vasta e engloba todos os seguimentos dentro das áreas relacionadas à Engenharia Elétrica, que variam desde a geração de energia elétrica até alcançar o interior das plantas industriais.

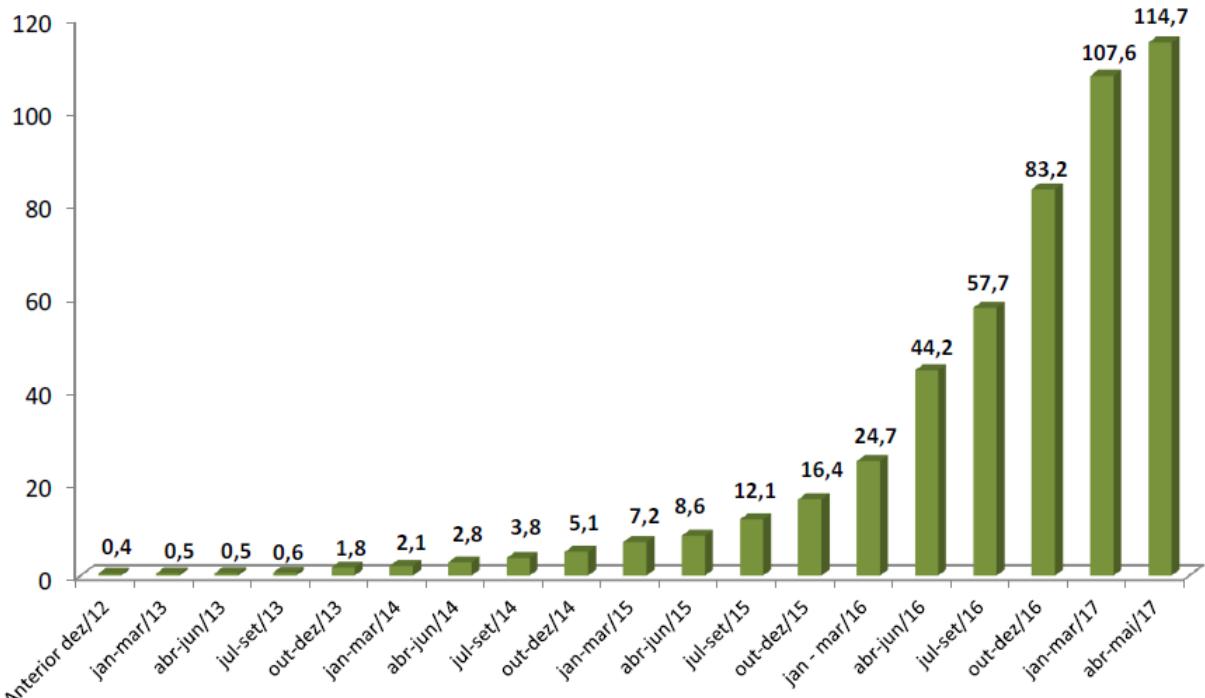
Um exemplo rápido, mas de bastante importância e complexidade, pode ser elucidado pelos conversores estáticos, que envolvem valores acentuados das grandezas elétricas já mencionadas. Nota-se, para tanto, uma larga utilização destes componentes provenientes da eletrônica de potência compondo boa parte da confecção e aplicação destes conversores. A atratividade dos mesmos efetiva-se devido à capacidade de atrelar alta potência concomitantemente a possibilidade de chaveamentos com grande velocidade e bruscas variações de tensão e/ou corrente, [1].

Dentro do mesmo contexto, a concepção de conversores de corrente alternada para corrente contínua e vice-versa, há aplicações de pequeno porte, por exemplo, em fontes chaveadas para eletrodomésticos e computadores, voltadas para escala residencial e em vários casos industriais, seja de pequeno porte ou, até mesmo, em grandes retificadores alocados em indústrias siderúrgicas com demanda de energia elétrica bem mais elevada, [2].

Complementarmente, da indispensabilidade pela busca por novas tecnologias para geração limpa e renovável de energia elétrica, em função da crescente demanda existente nos dias de hoje, bem como da não dependência à energia gerada somente por fontes hídricas, pesquisas e aplicações práticas [3] tem difundido cada vez mais a utilização de conversores de tensão para aproveitar ao máximo o potencial de geração de energia proveniente destas fontes renováveis. Estes tipos de conversores utilizados, baseiam-se nos princípios de controle e condução de tensão e/ou correntes elétricas e tem como principais componentes os pertencentes à eletrônica de potência.

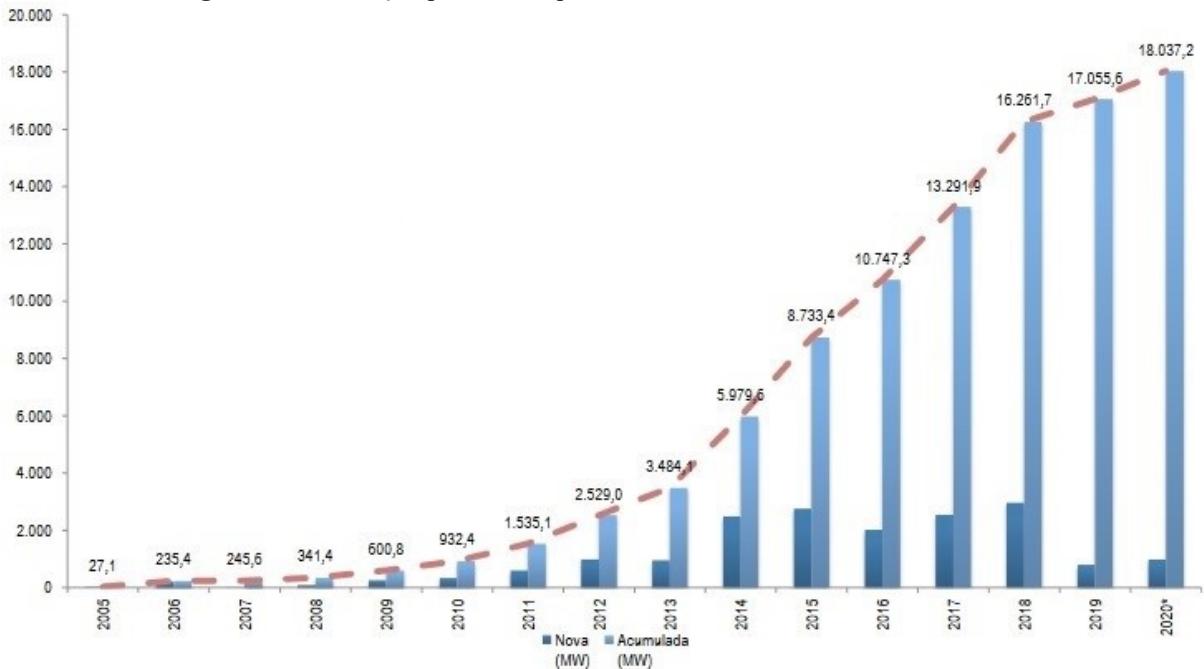
As Figuras 1.1 e 1.2 retratam o forte crescimento das fontes renováveis nos últimos 5 anos e concomitantemente reforçando a inserção dos conversores supracitados.

Figura 1.1 - Evolução da potência solar instalada, em MW, até 23/05/2017



Fonte: Nota Técnica 056/2017, [6].

Figura 1.2 – Evolução/previsão da potência eólica instalada, em MW, até 2020.



Fonte: Banco de informações da Geração ANEEL e ABEEólica, [7,8].

Em resumo, pode-se notar que em todos os ramos relacionados à energia elétrica, existe, se não na sua totalidade, uma grande parcela de utilização dos componentes eletrônicos já mencionados sendo empregados com o objetivo de reduzir os problemas relacionados ao aproveitamento energético da geração de energia por parte das fontes renováveis.

Entretanto, até o presente momento foram evidenciadas apenas os aspectos vantajosos que envolvem o surgimento destes componentes. Mas o fato é que, intrinsecamente a constituição desses dispositivos eletrônicos, existe uma contrapartida em alocá-los em pontos do sistema elétrico. Ou seja, a resposta à aplicação de tensão senoidal aos terminais destes elementos não tem por consequência direta o surgimento de uma corrente elétrica de mesmas características da tensão variando no tempo, como ocorre em elementos lineares – por exemplo, as resistências.

Desse modo, a resposta a não linearidade vem caracterizada pela deformação da forma de onda da tensão na proximidade elétrica de onde eles se encontram. Estas distorções são caracterizadas pela presença de valores de tensão e corrente múltiplos inteiros da frequência fundamental, 60Hz, e provocadas pela injeção de correntes harmônicas produzidas por estes componentes quando em operação, [2] [4,5]. Seus efeitos são diversos e podem comprometer o funcionamento de diversos equipamentos situados na proximidade destas barras, bem como comprometer a sua operação sob o ponto de vista da suportabilidade térmica, dielétrica e mecânica, [5].

Assim, é mais do que natural se deparar com questionamentos acerca do real efeito da resposta de não linear dos mesmos, quando inseridos no sistema elétrico. Quer dizer que, espera-se consequências ao sistema, quando da operação destes elementos/conversores baseados nas tecnologias eletrônicas supramencionadas.

Ao serem submetidos à tensão do sistema onde estão alocados, estes equipamentos tendem a drenar corrente com frequência fundamental e, simultaneamente, injetar no mesmo uma corrente elétrica formada por outras frequências múltiplas de 60 Hz. Tal fato faz com que haja distúrbios inerentes a inserção dessas novas fontes geradoras de energia no sistema elétrico que vão desde o surgimento de frequências de chaveamento desses conversores, fenômenos relacionados a flutuação de tensão e principalmente o surgimento de harmônicos [9].

Quando os equipamentos são expostos a níveis mais elevados de distorções harmônicas, seja de corrente e, ou consequentemente, tensão, os mesmos ficam sujeitos a exceder seus limites nominais estipulados pelos fabricantes. Isso é valido, uma vez que na presença de componentes múltiplas da fundamental, o valor eficaz e de pico, de tensão e corrente são maiores do que os valores se existissem apenas as componentes de frequência fundamental inseridas na rede.

Por conseguinte, fenômenos como sobrecorrentes e sobretensões ocasionados por ressonâncias, série e/ou paralela, [2], podem danificar os equipamentos ao ponto da necessidade de serem substituídos.

Além da preocupação advinda dos fabricantes com seus equipamentos conectados ao sistema elétrico, tem-se por responsabilidade atender as recomendações vigentes em documentos de caráter normativos disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que tratam de estabelecer limites operacionais para estas distorções em função dos níveis de tensão encontrados dentro do nosso território.

Tais limites, apesar de não serem apresentados neste presente momento por conta da familiaridade, podem ser encontrados em documentos como o Submódulo 2.8 – Gerenciamento dos Indicadores de Desempenho da Rede Básica e de Seus Componentes, do ONS, e no Módulo 8 – PRODIST - Qualidade da Energia Elétrica, da ANEEL. Posteriormente, no capítulo 5 associado com os estudos de caso, será pertinente apresentá-los e quantificá-los.

Assim, diante de tudo o que se relatou anteriormente, destaca-se um problema relacionado à confiabilidade de realizar medições do nível de distorção harmônica de tensão, já em função dos limites regulamentados pelos órgãos responsáveis. Logo, os transdutores responsáveis pela aferição dos valores de tensão, no caso os transformadores de potencial, merecem ser analisados com atenção e cuidados especiais, a fim de se obter respostas de medições cada vez mais próxima do valor verdadeiro.

Portanto, todo o problema relacionado a operação dos equipamentos eletrônicos, além das consequências danosas a eles próprios ou ao sistema elétrico e seus componentes, de modo geral, carece da interpretação adequada das medições realizadas por transdutores de potencial utilizados, levando a medidas corretivas sem ônus acentuados.

Entretanto, para estabelecer veracidade à afirmativa de que os transdutores não são capazes de apresentar fielmente os valores reais da rede, é necessário conhecer qual, ou quais, são as respostas relacionadas aos mesmos quando são expostos a medição de tensões que não possuem somente a componente fundamental, 60 Hz.

Para tanto é imprescindível lançar mão da ferramenta de Análise de Resposta em Frequência (FRA – *frequency response analysis*, em inglês) – bastante utilizada. Tal técnica, difundida em várias pesquisas relacionadas a avaliação de transformadores de potência após efeitos associados à deformações em suas estruturas, aplica-se de maneira substancial ao levantamento da curva de resposta destes transformadores de potencial quando sujeitos a sinais de alta frequência.

Uma explanação mais detalhada acerca do método de Análise de Resposta em Frequência será atribuída em um capítulo separado, visto que é essencial para compreender de forma mais adequada o objetivo desta dissertação ao avaliar as distorções de tensão auxiliada pela ferramenta mencionada.

1.2 MOTIVAÇÃO

Dando seguimento a linha de raciocínio comentada nas considerações iniciais deste capítulo introdutório, é de se esperar que os cuidados relacionados à extração dos limites impostos por fabricantes e órgãos de fiscalização tornem-se cada vez mais necessários sob o ponto de vista da qualidade da energia produzida e inserida no sistema elétrico.

Dentro desse contexto, uma preocupação a mais aparece: como é possível estabelecer métodos para correção dos efeitos causados pelas distorções acima dos limites impostos, sem saber ao menos se os mesmos se apresentam quantificados de maneira correta através dos equipamentos de medição. Pois, posto que se tem os valores encontrados a partir de medições em um ponto do sistema elétrico e tais amplitudes encontradas denotam-se além dos limites desejáveis para tal nível de tensão, é essencial que medidas corretivas sejam tomadas para atenuar de forma mais eficaz os efeitos causados com as distorções fora do adequado.

Como consequência, gastos relevantes para realizar a solução do problema podem ser demandados de maneira errônea, levando em conta um levantamento inadequado dos valores obtidos no mesmo ponto de análise. Não obstante, o oposto também é válido. É possível que haja necessidade de correção das distorções harmônicas mas medidas não são tomadas em função dos valores equivocados de medições.

Assim sendo, uma vez que as recomendações vigentes dizem respeito à tensão elétrica, vem a dúvida se realmente os equipamentos utilizados para mensurar a mesma representam de forma fidedigna os valores encontrados nos barramentos sem nenhum, ou pelo menos algum, erro admissível.

Portanto, amparado nos possíveis equívocos de medição encontrados durante campanhas ou medições esporádicas dos níveis de tensão nos barramentos do sistema elétrico, torna-se a principal motivação desta dissertação a investigação da real credibilidade apresentada nos resultados de medição apresentados pelos transformadores de potencial indutivo, os TPI's.

1.3 ESTADO DA ARTE

Apesar de ser uma temática não muito explorada na área acadêmica, nota-se uma grande importância para fins práticos o levantamento da curva de resposta em frequência de transformadores de potencial. Em contrapartida, ao atentar-se para as literaturas disponíveis que envolvem pesquisas relacionadas ao tema, nota-se que o mesmo perfaz uma preocupação antiga no meio acadêmico.

E os cuidados relativos aos erros de medição também são abordados desde então. Quaisquer equipamentos utilizados para a aferição das grandezas elétricas, sempre estarão sujeitos à imprecisões, sejam eles inerentes ao tipo de transdutor, presença ou não de distorções harmônicas, construção, nível de tensão e outros fatores que conduzem a equívocos.

Em meio a essa premissa, o estudo conduzido em [10] mostrou-se preocupado com a interação da tensão fundamental e das componentes harmônicas em medições realizadas. Aponta-se divergências nos resultados de medição para um teste com a presença de um sinal de tensão distorcido, quando se utiliza dois tipos de instrumentos: o divisor capacitivo e o Divisor de Fortescue. Ambos apresentam respostas divergentes entre os próprios equipamentos sobre a magnitude do valor real para as harmônicas de 3^a, 5^a e 7^a ordem.

Além disso, do ponto de vista físico e construtivo de um transformador de potencial indutivo, não se pode negligenciar o efeito capacitivo associado às espiras do mesmo. Por exemplo, se um desses transdutores de tensão for projetado para operar com tensão nominal de 13,8 kV, é fato que possui um número X de bobinas na parte de alta. Logo, para um nível de 138 kV, continuando o exemplo, o transformador terá, se não, 10 vezes mais bobinas, acarretando na amplificação do efeito capacitivo das bobinas.

Na Nova Zelândia, mais precisamente em 1985, o estudo [11] realizou um levantamento da condição harmônica de um barramento de 220 kV no extremo-sul da ilha visando avaliar a performance de equipamentos de medição de potencial diante de distorções de tensão. Na ocasião havia um link de corrente continua instalado no local e causava perturbação na rede.

O instrumento escolhido tratava-se de um transformador de potencial capacitivo, produzido pela Arteche que em função da sua característica física construtiva, poderia trabalhar com a unidade magnética desacoplada, permitindo o uso como tão somente um divisor capacitivo ou sendo conectado à um divisor resistivo, produzindo assim um divisor capacitivo resistivo.

Uma consideração interessante levantada neste trabalho faz menção a confiabilidade de se obter a curva de resposta em frequência deste tipo de transdutor impondo uma tensão terminal muito abaixo da nominal. Em campo, testes constataram a necessidade de um ambiente controlado, longe de instabilidades elétricas evidenciadas pela dinâmica do sistema que poderiam acarretar em ruídos nos sinais impostos ao equipamento. Além disso, limitações do aparato de captação dos sinais, existentes na época, descaracterizaram toda a tentativa de se obter medidas confiáveis do teste em campo.

Já em ambiente laboratorial, as três alternativas de conexão do dispositivo foram exploradas. O divisor capacitivo e a junção capacitiva com uma parcela resistiva obtiveram resultados com erros baixos até a 9^a ordem harmônica se comparada às medidas de referência

baseadas em um divisor resistivo da ASEA. Já com a unidade magnética acoplada, nota-se uma grande diferença da resposta em frequência encontrada à baixa tensão das respostas estabelecidas com tensões próximas da nominal.

Tal fato corresponde a característica intrínseca ao transformador de potencial capacitivo. Quando submetido ao teste com tensão reduzida, espera-se que o fluxo magnético estabelecido no núcleo da unidade indutiva imponha uma indutância de magnetização diferente da nominal. Assim, a interação entre esse parâmetro e as unidades capacitivas alteram para outra característica de resposta em frequência.

Em teses como [12] é possível observar uma narrativa acerca das distorções harmônicas e resposta em frequência bem contextualizada para a época. Um apanhado geral que envolve não somente os transformadores de potencial, mas também os de corrente fora detalhada sob os aspectos construtivos dos transdutores. Sugestões de modelagens computacionais envolvendo as características lineares e, também, não lineares, associadas ao núcleo do equipamento e complementarmente uma apresentação de resultados relevante sobre a utilização dos três modelos foram implementados ao longo do documento.

No que se refere à apresentação das constituições físicas de cada um dos equipamentos é interessante notar que, apresenta-se um conteúdo embasado em normas e erros associados à escolha do tipo de transdutor, principalmente os de potencial. O que leva a uma preocupação substancial da capacidade dos mesmos serem dotados de boas características que não corroboram com erros de transformação.

Além disso, vê-se o levantamento de uma função de transferência encontrada por meio da conexão entre métodos experimentais e analíticos, afim de obter-se os valores de capacitâncias parasitas entre as massas do equipamento, o tanque e núcleo, e seus respectivos enrolamentos de alta e baixa, bem como a capacitância parasita perfazendo a ligação entre os dois níveis de tensão. Em [13] apresenta-se uma discussão resumida, clara e objetiva, acerca da influência destes elementos circuitais na concepção da melhor resposta em frequência dos transformadores de potencial possível. A falta dos mesmos no circuito conduz à respostas extremamente insatisfatórias, do ponto de vista de altas frequências, não mantendo nenhuma similaridade do experimental com a simulação computacional.

Uma análise que aborda a utilização de unidades transformadoras de potencial capacitivo e indutivo em um sistema de alta tensão na Noruega encontra-se em [14]. Uma das

subestações do sistema conta com a presença de dois transdutores de potencial capacitivo de fabricantes diferentes. Em uma fase está alocada uma unidade da ABB e nas outras duas da Micafil. Testes realizados apontam para uma amplificação de doze vezes o valor da tensão mensurada para frequência harmônica de 13^a ordem nos TPCs. Enquanto que para os TPCs de outros fabricantes não excediam o valor de 1,5 vezes o nominal até a casa da 25^a harmônica. Lembrando que, neste caso a frequência fundamental é de 50 Hz.

Ainda acerca do trabalho [14], no tocante aos TPIs constata-se o levantamento da curva característica de resposta em frequência de vários destes equipamentos. Alguns fabricados pela ABB, outros pela Heafely Vetor, mas ambos para o nível de tensão de 132 kV. Pode-se observar uma resposta com erros bem discretos até a 29^a ordem. Porém, para ordens mais altas, em torno da 46^a, há uma amplificação de cerca de 4,5 vezes a tensão nominal.

Como observado, a preocupação com os erros relacionados às medições provenientes dos transformadores, seja os de potencial capacitivo ou indutivo, faz com que outros métodos sejam implementados. Os custos da inserção de alternativas aos equívocos de aferição também são levados em consideração. Enquanto um grande TPI tem custos significativos para altos níveis de tensões, a solução financeira em torno de um divisor capacitivo parece adequada, a priori. O trabalho realizado em [15] apresenta uma solução bem prática para a concepção do grau de distorção de um barramento através da utilização da bucha de um transformador de corrente.

Geometricamente, a isolação proveniente em uma bucha de alta tensão apresenta-se como uma capacidade vista entre a parte exposta à tensão e a carcaça do equipamento. Isto posto, surge a ideia de implementação de um mecanismo similar encontrado em divisores capacitivos. Toda a teoria incorporada nessa técnica consta no trabalho e tem relação direta com substituição do resistor de aterramento dos TPs, uma vez que os mesmos promovem a amplificação da distorção de tensão advinda da sequência zero.

Entretanto, apesar de uma solução prática e de custo inferior, [15] apresentam dados das medições realizadas, mas não fazem a confrontação destes resultados com uma medida de referência para ter-se uma avaliação mais segura quanto a precisão desse arranjo. Contudo, vê-se uma atenuação grande da amplitude das tensões harmônicas, se comparado com um TPC.

Dentre os variados trabalhos encontrados na literatura relacionada à resposta em frequência dos transdutores de potencial, [16] mostra-se o mais consistente sob o ponto de vista

experimental. A quantidade de transdutores utilizados para analisar o conjunto de fatores responsáveis pela alteração da resposta dos equipamentos é considerável.

No que tange aos fatores de influência direta da resposta em frequência, encontram-se: as características de construção, condições de operação e interferência direta da metodologia de medição experimental.

Além disso, chama-se a atenção para a correlação direta entre os resultados finais e a interação dos transdutores com os analisadores de qualidade. Assim, apesar de os medidores de qualidade de energia serem munidos de tecnologia necessária para estratificar ao máximo as medições de distorções de tensão, de nada adiantará se os mesmos receberem valores equivocados provenientes dos transformadores de medição. Logo, é interessante e de suma importância ressaltar este percalço à ser transposto.

De modo complementar o trabalho referenciado como [16], [17] teve por objetivo, além do levantamento da resposta em frequência dos transdutores de potencial diversos, realizar uma análise mais aprofundada acerca da relação direta entre o nível de tensão e características físicas e de isolamento do projeto destes equipamentos com a diferença de resposta dos mesmos. Apresenta-se não apenas a parte quantitativa, relacionada com a amplitude da tensão mensurada como também, mesmo que de maneira sucinta, o ângulo de fase.

Os dados apresentados fazem menção ao termo citado como frequência crítica. É nesta frequência onde se observa o primeiro ponto de ressonância do transformador. Para fins de análise, os dados mostram que a frequência crítica é intimamente ligada aos dois fatores supramencionados.

Em outros trabalhos como em [18,19], é possível encontrar mais estudos pertinentes ao tema evidenciado e que complementam ainda mais os aspectos abordados durante o processo de medição de tensões harmônicas.

1.4 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Diante das constatações mencionadas, esta dissertação tem por objetivo geral o levantamento das curvas de resposta em frequência de alguns tipos de transdutores de tensão disponibilizados no mercado por diversos fabricantes. Especificamente, a abordagem principal está confinada aos transformadores de potencial, mais especificamente os de potencial indutivo.

O que limita, mas não extingue, as considerações relacionadas aos transformadores de potencial capacitivo.

Complementarmente, objetiva-se atingir os seguintes pontos:

- ✓ Apresentar de maneira direta e dinâmica o comportamento dos transdutores ensaiados diante da variação da frequência imposta aos mesmos;
- ✓ Estabelecer uma comparação entre as respostas encontradas para os equipamentos ensaiados, nas mesmas condições experimentais, mas que tem por dados de placa ou especificidades de fabricação diferentes entre si;
- ✓ Apresentar uma análise matemática, mesmo que sucinta, através de um estudo de caso, das complicações evidenciadas nos erros das medições;
- ✓ Exibir os erros relacionados com os ângulos de fase também mensurados de maneira a considerar o efeito da frequência sobre o equipamento;
- ✓ Apresentar e desenvolver, através de dois estudos de casos, um modelo computacional para a realização da comparação dos resultados computacionais encontrados com aqueles obtidos nos ensaios experimentais.

1.5 CONTRIBUIÇÕES

Diante do que fora ilustrado, é notório a relevância do tema referente à medição das componentes harmônicas com a devida precisão. Com essa finalidade, as contribuições encontradas nesse trabalho corroboram para tal objetivo e estão apresentadas abaixo:

- ✓ Alertar para os erros encontrados no processo de aferição, na tentativa de chamar a atenção dos profissionais pela busca da atenuação;
- ✓ Constatar a existência da dissimilaridade de resposta em frequência de transdutores advindos de fabricação idêntica;
- ✓ Apresentar o efeito da malha de aterramento sob os ensaios experimentais realizados;
- ✓ Evidenciar que há discrepância, não só da amplitude das tensões mensuradas como também do ângulo de fase dos transdutores de potencial quando existe a presença de componentes harmônicas na rede;
- ✓ Apresentar os resultados baseados em ensaios experimentais, desenvolvidos em um ambiente laboratorial controlado e também muito utilizado para ensaios de rotina e de tipo nos principais equipamentos do sistema elétrico de potência.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além o presente capítulo, denominado como introdutório, a disposição dos outros capítulos segue a estrutura apresentada a seguir:

CAPÍTULO 2 – TRANSFORMADORES DE POTENCIAL

Este capítulo tem por finalidade realizar uma apresentação acerca dos transformadores de potencial comumente utilizado em medições elétricas. A exposição abrange desde o equacionamento e funcionamento de transdutores de potencial indutivo e capacitivo, passando pela construção física dos mesmos, bem como os materiais que constituem seus enrolamentos, núcleo e carcaças até os efeitos elucidados pela estruturação destes equipamentos. Complementarmente, apresenta-se também as características levadas em consideração quando da especificação de tais dispositivos, amparados pela resolução normativa NBR 6855.

CAPÍTULO 3 – RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

O capítulo 3, por sua vez, apresenta uma introdução acerca do contexto que a análise de resposta em frequência engloba. Estudos que começam a utilizar tal método são inseridos dentro de plantas abarcadas pelos sistemas de controle e também na caracterização de falhas mecânicas em transformadores de potência. Além disso, mostra-se também os procedimentos padrões para o levantamento da curva de resposta em frequência, baseado em metodologias internacionais, assim como as recomendações existentes para o tratamento e exposição dos dados retirados dos ensaios. Não obstante, manifesta-se a interpretação típica da resposta do transdutor frente aos ensaios de resposta em frequência.

CAPÍTULO 4 – ANÁLISE EXPERIMENTAL

Esse presente capítulo tem por finalidade elucidar toda parte experimental relativa aos ensaios dos transdutores de potencial. Para tanto, visualiza-se a construção do ambiente de ensaio, envolvendo as conexões dos equipamentos de medição e aquisição dos sinais com os transdutores. Ademais, tem-se diversos resultados envolvendo os efeitos do comportamento da resposta do transformador em função da frequência aplicada. Fatores como nível de tensão, efeitos inerentes a malha de

terra, avaliação de unidades iguais apresentando respostas distintas e uma análise do erro associado ao ângulo de fase também contemplam o desenvolvimento desse capítulo.

CAPÍTULO 5 – ESTUDO DE CASO

O penúltimo capítulo tem como objetivo realizar uma análise computacional de dois estudos de casos, a fim de evidenciar os erros relativos às medições de tensões harmônicas com transformadores que apresentam, ora amplificação do sinal medido, outras vezes atenuação do mesmo de acordo com a frequência mensurada. Um sistema elétrico com cargas não lineares foi proposto e a simulações realizada, assim dizendo, pelo fato de não ser possível realizar a medição prática do circuito, representa um caso onde os erros de medição podem mascarar os valores reais de distorção de tensão de um barramento qualquer do sistema.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

Por fim, o último capítulo dessa dissertação realiza o fechamento do conteúdo apresentado, agregando as conclusões gerais e contribuições da mesma bem como as possíveis perspectivas futuras para outros trabalhos.

CAPÍTULO 2

2. TRANSFORMADORES DE POTENCIAL

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De acordo com [20], entende-se por transformador de potencial como sendo um instrumento constituído por enrolamentos primário, conectado em derivação com o circuito de média ou alta tensão, e secundário, ligado diretamente às bobinas de potencial de equipamentos de medição, controle, faturamento ou proteção de sistemas elétricos.

Logo, nota-se que os mesmos possuem papel indispensável em todo o sistema elétrico de potência. Desde a aferição de tensões para averiguação dos seus limites, medições voltadas para o faturamento em níveis mais altos de tensão, até o auxílio para que sistemas de proteção atuem de maneira correta e adequada.

Partindo do princípio da grande necessidade de utilização desse tipo de equipamento, é interessante ressaltar as características básicas de construção, seleção e operação destes dispositivos frente às diversas necessidades. Além de correlacionar esses atributos intrínsecos com a necessidade de obter uma curva de resposta em frequência desses equipamentos.

2.2 TRANSFORMADOR DE POTENCIAL INDUTIVO

2.2.1 FUNCIONAMENTO E CONEXÕES

Sabe-se que os transformadores, em sua totalidade, são confeccionados de modo a apresentar dois circuitos elétricos magneticamente acoplados por meio de um núcleo – se tratando de uma configuração mais simples, monofásica. O primeiro circuito é denominado de primário e é submetido a tensão de entrada da rede, V_{pri} . Complementarmente, o segundo circuito, chamado de secundário, fornece tensão de mesma frequência e forma de onda que a de entrada às cargas a jusante do seu enrolamento, V_{sec} . Porém, em magnitudes diferentes, devido ao fato de cada enrolamento ser composto por um número desigual de espiras primárias, N_1 , e secundárias, N_2 .

Ainda de [20], tem-se o princípio fundamental de funcionamento. Ao se energizar o enrolamento primário, circula uma corrente elétrica, chamada de corrente de excitação, i_{ex} . Essa, por sua vez, da origem ao fluxo $\varphi(t)$ que percorre todo o circuito magnético do núcleo do equipamento, induzindo assim uma tensão E_1 no enrolamento primário e E_2 no secundário, denominadas de força eletromotriz auto-induzida e induzida, respectivamente. O valor associado à essas forças eletromagnéticas são dadas a seguir:

$$E_1 = -N_1 \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (1)$$

$$E_2 = -N_2 \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (2)$$

$$\varphi(t) = \emptyset_m \cdot \operatorname{sen}(\omega t) \quad (3)$$

Onde:

N_1 : Número de espiras do enrolamento primário;

N_2 : Número de espiras do enrolamento secundário;

$\frac{\partial \varphi}{\partial t}$: Variação do fluxo magnético no tempo, Weber/s;

$\varphi(t)$: Fluxo magnético que varia no tempo, em Webers;

ω : Frequência angular, em rad/s;

\emptyset_m : Amplitude máxima do fluxo magnético, em Webers.

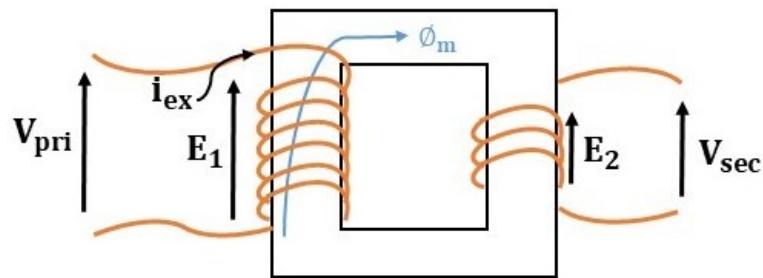
Substituindo (3) em (1) e (2), e obtem-se o valor eficaz das tensões,

$$E_1 = N_1 \cdot \omega \cdot \frac{\emptyset_m}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

$$E_2 = N_2 \cdot \omega \cdot \frac{\emptyset_m}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

A Figura 2.1 ilustra, de forma simples, a constituição magnética do núcleo de um TP e o surgimento do fluxo que enlaça os enrolamentos primário e secundário.

Figura 2.1- Circuito magnético do transformador de potencial



Fonte: Autor.

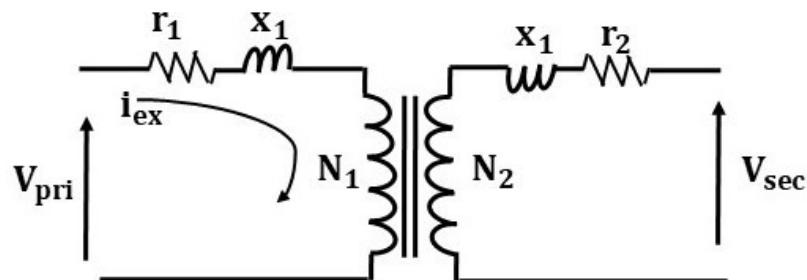
Por aproximação, desconsiderando a queda de tensão na reatância de dispersão de ambos os lados do transformador, a tensão induzida em ambos os lados do transformador é aproximadamente a própria tensão da rede, para a entrada, e a tensão que alimenta a carga (voltímetro, wattímetro ou analisador de qualidade) no secundário. Portanto, dividindo (4) por (5),

$$\frac{V_{\text{pri}}}{V_{\text{sec}}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (6)$$

Para transformadores de potencial indutivo, via de regra, a quantidade de espiras primárias é bastante elevada se comparado com o número de espiras secundárias, podendo propiciar altos níveis de tensão do lado primário e, pela relação de espiras, níveis de tensão mais inferiores no secundário. Por outro lado, os transformadores de potencial não possuem significativa robustez, considerando que a impedância dos equipamentos de medição é alta. Simplificando, são considerados transformadores abaixadores de tensão.

Eletricamente, a Figura 2.2 apresenta a disposição do circuito elétrico do TP, como suas respectivas resistências primária e secundária, r_1 e r_2 . Assim como as reatâncias primária e secundária, x_1 e x_2 .

Figura 2.2 - Circuito elétrico ilustrativo do funcionamento do transformador de potencial



Fonte: Autor.

2.2.2 MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Do ponto de vista de construção desses equipamentos, tem-se uma evolução ao longo dos anos em relação aos materiais empregados na estruturação dos mesmos. O encapsulamento, que corresponde a carcaça desses transdutores, o material utilizado na confecção dos enrolamentos, a isolação, além do meio dielétrico que interage internamente e a constituição do núcleo magnético, são fatores que devem ser abordados, pois, indiretamente, todos esses elementos influenciam no funcionamento, principalmente, quando se trata de medições de tensões harmônicas.

Em termos de encapsulamento e isolação, ou seja, estrutura física e isoladores, a utilização de alguns materiais como as resinas epóxi ciclo alifáticas é antiga, [21], e deve-se ao fato da possibilidade de aplicação aos equipamentos para exposição externa, visto que possui boa resistência à umidade, radiação ultravioleta e a ação de poluentes químicos espalhados pelo ar. Além da resistência mecânica e boas propriedades dielétricas, a resina epóxi adere facilmente á materiais sólidos e permanece com suas características inalteráveis até aproximadamente 130 °C, [21,22].

Figura 2.3 - Transformador de potencial encapsulado com resina epóxi.



Fonte: Imagem retirada do site da Rehtom¹

Avanços tecnológicos desses materiais no início deste século propiciaram a inserção de uma versão hidrofóbica deste mesmo componente. A resina denominada de epóxi ciclo alifático hidrofóbico é aplicável em ambientes externos e evita que a água crie superfícies condutivas, o que contribui para o surgimento do fenômeno de “*flash-over*”, [23]. Além disso, há considerações relativas a exposição desses compostos quando em ambientes insalubres, como na presença de poluições desencadeadas por atmosferas ácidas, [24].

¹ Disponível em: www.rehtom.com.br

Os condutores empregados na confecção dos enrolamentos são geralmente de cobre, com 99,9% de pureza, e classe H, com temperatura de 130 °C acima da ambiente e máxima de 180 °C, [25].

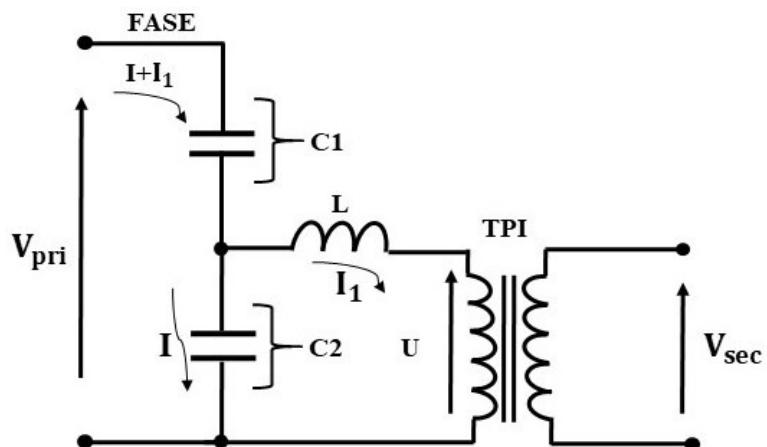
No que se refere ao núcleo do transdutor, o material de fabricação é do mesmo padrão para os transformadores convencionais, onde emprega-se a junção de várias chapas de aço silício suficientemente laminadas, a fim de diminuir as perdas relacionadas com as correntes parasitas, e com alta permeabilidade magnética possível.

2.3 TRANSFORMADORES DE POTENCIAL CAPACITIVO

2.3.1 FUNCIONAMENTO E CONEXÕES

Já os transformadores de potencial que utilizam outros princípios de transdução, como é o caso dos transformadores de potencial capacitivo, por exemplo, apresentam um funcionamento um pouco diferente.

Figura 2.4 - Composição elétrica do transformador de potencial capacitivo



Fonte: Autor.

Como pode ser observado na Figura 2.4, o equipamento, fisicamente, é formado por um conjunto de unidades capacitivas associadas em série, que por sua vez constituem um divisor capacitivo de tensão. Os elementos denominados C1 e C2 são, respectivamente, o equivalente das capacitâncias fora e dentro do divisor. A saída de tensão desse divisor é, usualmente, da ordem de 5 a 15 kV e é chamada de tensão intermediária. A bobina intitulada como L, é projetada pelo fabricante da unidade de medição de modo que a reatância do conjunto satisfaça a condição de igualdade estabelecida pela equação 7, citada abaixo.

$$L\omega = \frac{1}{(C1 + C2)\omega} \quad (7)$$

Isto posto, o equacionamento levado em consideração para se obter a relação entre a tensão primária e secundária tem por base as correntes que circulam pelas malhas formadas pela conexão do transformador de potencial indutivo conectado à derivação existente entre as capacitâncias C1 e C2. De [20],

$$V_{\text{pri}} = -\frac{j(I + I_1)}{C1\omega} - \frac{jI}{C2\omega} \quad (8)$$

$$U = -\frac{JI}{C2\omega} - jL\omega I_1 \quad (9)$$

Substituindo (7) em (9),

$$U = -\frac{JI}{C2\omega} - \frac{j}{(C1 + C2)\omega} \cdot I_1 \quad (10)$$

Dividindo a expressão (8) por (10) tem-se,

$$\frac{V_{\text{pri}}}{U} = \frac{C1 + C2}{C1} \quad (11)$$

Essa expressão mostra que a relação existente entre as tensões de entrada do TPC não tem relação direta com as correntes solicitadas da rede quando o TPI intermediário estiver presente. Ou seja, se o mesmo estiver em vazio, a corrente I_1 é a mesma que a I . Logo, trata-se apenas de uma malha a ser analisada e a tensão U é a própria tensão de saída do divisor de potencial capacitivo.

Contudo, para os fins de equalização da tensão de saída desse divisor, nota-se uma demanda adicional em adequar esse potencial aos níveis encontrados em equipamentos de medição, proteção e afins. Logo, utiliza-se uma unidade indutiva de potencial para finalizar o processo.

O que parece ser redundante, utilizar dois transdutores para uma medição, nada mais é que uma estratégia para amortizar os custos referentes a utilização de um transformador de potencial indutivo para níveis de tensão mais altos. Transformadores de potencial capacitivo são largamente empregos em medições de média, alta e extra alta tensão devido ao custo mais atrativo se comparado com um TPI de mesma classe de isolação de tensão, [20].

Na prática, é comum encontrar esses equipamentos com princípios capacitivos em grandes subestações com altos níveis de tensão, voltados tão somente para fins de medição com

vistas em faturamento ou proteção, pelo simples fato de mensurar com boa precisão níveis de tensão com frequência fundamental. Uma vez que, para aferição de tensões harmônicas, os mesmos se mostram bem ineficiente, [14,26].

Além disso, o emprego de transformadores de potencial capacitivo, estende-se a transmissão de sinais de alta frequência em linha de transmissão. Pelo fato do valor das capacitâncias que compõem esse divisor serem da ordem de pF, para os sinais de alta frequência faz com que elas atuem como se fossem um filtro, possibilitando a comunicação entre o transmissor e o receptor da linha.

2.3.2 MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Alguns outros transdutores, como é o caso dos de potencial capacitivo, possuem constituição um pouco diferente com relação a isolação. Emprega-se, em parte, esse tipo de equipamento para medições com níveis de tensão bem mais elevados e usualmente se encontram em áreas externas.

Assim, utiliza-se como isolação o papel-óleo, que conta com boa qualidade, maior compactação e menor espessura, contribuindo para maior robustez do equipamento e agregando maior rigidez dielétrica. Contudo, o meio que impregna o papel é quem dita o comportamento das propriedades elétricas. Neste caso, o óleo.

Além do mais, também, há vantagens financeiras com referência ao custo se comparado com a isolação em resina. Salvo a composição dos seus isoladores, fabricados em porcelana. Essa, por sua vez, é constituída de matéria orgânica que desempenha três características fundamentais: bom aspecto térmico, dielétrico e mecânico. Respectivamente, o quartzo, o feldspato e a argila com caolim são quem garantem essas propriedades, [21].

2.4 EFEITOS ASSOCIADOS A FABRICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Adicionalmente, em [10,27] mostra-se que o efeito pronunciado pelas indutâncias dos enrolamentos não é único e o surgimento de capacitâncias ditas parasitas desempenha papel no mínimo curioso, além de intervir na característica do equipamento. Essas capacitâncias aparecem de diversas formas possíveis devido a diferença de potencial encontrada entre espiras de um próprio enrolamento, ou mesmo na relação das partes de isolação com os níveis de tensão – das buchas isolantes, do núcleo e o enrolamento de baixa e do enrolamento de alta para a carcaça do transdutor.

Outro exemplo citado em [10] faz menção à corrente de excitação à vazio que circula no primário de transformadores de medição de alta tensão. Devido ao grande número de espiras que perfazem o transdutor, o efeito inerente a capacidade parasita torna-se grande ao ponto de exceder o valor nominal da corrente de excitação e fazer com o fator de potência do equipamento fique capacitivo, quando da ausência de carga.

Enfim, a existência destas capacidades desperta interesse de estudo já que elas influenciam diretamente no funcionamento do transformador e pode afetar sua operação quando da interação das mesmas com componentes harmônicas de tensão existente no sistema elétrico. Tal fato será discutido com mais ênfase nos capítulos seguintes.

Concomitantemente, outro aspecto construtivo que chama atenção para o funcionamento dos transformadores de potencial e que está atrelada aos objetivos deste trabalho é a questão relacionada com o nível de tensão para o qual foi projetado. Estudos anteriores, [16,17]], mostram o comportamento de transformadores com classes de tensão diferentes e que, a medida com a tensão nominal é elevada, tem sua resposta em frequência mais discrepante da relação de transformação unitária, logo depois de algumas centenas de hertz.

Outro fator associado à fabricação dos equipamentos está diretamente relacionado a divergência de respostas de transformadores fabricados com características idênticas. Mesmo que sucintamente, [16,28] evidencia comportamentos diferentes de transdutores com as mesmas especificações elétricas. Fazendo com que a resposta em frequência realizada para equipamento não sirva a outra unidade, até dentro do mesmo lote de fabricação. Esse aspecto técnico é experimentalmente constatado no Capítulo 4.

2.5 ESPECIFICAÇÃO DO TRANSDUTOR DE POTENCIAL INDUTIVO

A NBR6855, [27], apresenta os critérios para seleção do transdutor de potencial indutivo ideal de acordo com as necessidades de cada instalação. Para tanto, tem-se a seguir:

- ✓ a(s) tensão(ões) primária(s) nominal(is) e relação(ões) nominal(is);
- ✓ a tensão máxima do equipamento e níveis de isolação;
- ✓ frequência;
- ✓ a(s) carga(s) nominal(is);
- ✓ a(s) classe(s) de exatidão;
- ✓ a potência térmica nominal;
- ✓ o grupo de ligação;

- ✓ a carga simultânea para TPI de dois ou mais secundários;
- ✓ o uso: interno ou externo.

2.5.1 TENSÃO PRIMÁRIA E RELAÇÃO NOMINAL

A referida norma [27] apresenta uma tabela contendo uma vasta gama de tensões primárias existentes, bem como suas respectivas relações de transformação. Além disso, as mesmas são encontradas em função do tipo de ligação, se entre fases ou da fase para terra.

A título de ilustração, a Tabela 1 identifica os valores mais usuais das grandezas elétricas citadas.

Tabela 1 - Tensões primárias e secundárias nominais para TPs.

Tensões primárias e secundárias nominais						
Ligação entre fases		Ligação entre fases e terra				
Tensão primária nominal (V)	Relação nominal	Tensão primária nominal (V)	Relação nominal			Tensão secundária nominal (V)
			115/3	115/ $\sqrt{3}$	115	
115	1:1	-	-	-	-	-
230	2:1	-	-	-	-	-
402,5	3,5:1	-	-	-	-	-
460	4:1	-	-	-	-	-
2300	20:1	2300/ $\sqrt{3}$	36:1	20:1	12:1	
3450	30:1	3450/ $\sqrt{3}$	52,5:1	30:1	17,5:1	
4025	35:1	4025/ $\sqrt{3}$	60:1	35:1	20:1	
4600	40:1	4600/ $\sqrt{3}$	72:1	40:1	24:1	
6900	60:1	6900/ $\sqrt{3}$	105:1	60:1	35:1	
8050	70:1	8050/ $\sqrt{3}$	120:1	70:1	40:1	
11500	100:1	11500/ $\sqrt{3}$	180:1	100:1	60:1	
13800	120:1	13800/ $\sqrt{3}$	210:1	120:1	70:1	
23000	200:1	23000/ $\sqrt{3}$	360:1	200:1	120:1	
34500	300:1	34500/ $\sqrt{3}$	525:1	300:1	175:1	
46000	400:1	46000/ $\sqrt{3}$	720:1	400:1	240:1	
69000	600:1	69000/ $\sqrt{3}$	1050:1	600:1	350:1	
		138000/ $\sqrt{3}$	2100:1	1200:1	700:1	
		230000/ $\sqrt{3}$	3600:1	2000:1	1200:1	
		345000/ $\sqrt{3}$	-	3000:1	1800:1	
		440000/ $\sqrt{3}$	-	4000:1	2300:1	
		500000/ $\sqrt{3}$	-	4500:1	2500:1	
		525000/ $\sqrt{3}$	-	4500:1	2600:1	

Fonte: NBR 6855, [27].

2.5.2 TENSÃO MÁXIMA DO EQUIPAMENTO E NÍVEIS DE ISOLAÇÃO

Ainda amparada na [27], tem-se os níveis de isolação nominal para os transformadores de potencial. A classificação remete à níveis de tensão bem elevados.

Similarmente, tem-se a Tabela 2, que mostra os valores usuais.

Tabela 2 - Níveis de isolação nominal para equipamentos.

Níveis de isolação nominal para equipamento com tensão ≤ 242 kV			
Tensão máxima do equipamento (kV)	Tensão suportável nominal à frequência industrial durante 1min (kV)	Tensão suportável nominal de impulso atmosférico (kV crista)	
0,6	4	-	
1,2	10	20	
7,2	20	40	
		60	
15	34	95	
		110	
24,2	50	125	
		150	
36,2	70	150	
		170	
		200	
72,5	140	350	
92,4	185	450	
145	230	550	
	275	650	
242	360	850	
	395	950	
Níveis de isolação nominal para equipamento com tensão ≥ 362 kV			
Tensão máxima do equipamento (kV)	Tensão suportável nominal à frequência industrial durante 1min (kV)	Tensão suportável nominal de impulso de manobra (kV)	Tensão suportável nominal de impulso atmosférico (kV crista)
362	450	850	950
		950	1050
			1050
			1175
460	620	1050	1425
550	650	1050	1425
		1175	1550
	740	1300	1675
800	870	1425	1950
	960	1550	2100

Fonte: NBR 6855, [27].

2.5.3 FREQUÊNCIA

Em sua maioria, os equipamentos de transdução de potencial são especificados para trabalhar em regime permanente com frequência fundamental da rede, 60 Hz. Isso deve-se ao fato de serem mais utilizados para medição de faturamento ou proteção. Entretanto, em campo, não é de se esperar que exista apenas a componente fundamental da frequência da rede, pelo contrário, a quantidade de parcelas múltiplas da frequência base na rede é, em alguns casos, bem além do esperado.

Em [27], não há considerações relacionadas à especificação desses transdutores quando da presença de componentes harmônicas na rede. Embora o assunto seja de extrema relevância para cenário atual e importância nos objetivos deste trabalho.

2.5.4 EXATIDÃO

Antes de entrar no mérito da exatidão do equipamento de transdução é necessário destacar algumas relações encontradas em literaturas acerca de equipamentos elétricos e nas normas relacionadas a esses elementos, [20,27].

Subentende-se por Relação Nominal (K_p) a razão entre a tensão primária, para a qual o transformador foi projetado, pela tensão secundária, onde ambas tensões são as nominais. Por recomendações normativas, [27], esta relação deve ser disponibilizada pelo fabricante nos dados de placa. Usualmente é também conhecida como relação de transformações nominal ou relação de transformação.

$$K_p = \frac{V_{pri(n)}}{V_{sec(n)}} \quad (12)$$

Complementarmente, existe outra relação entre as tensões primária e secundária. Tal designação é conhecida como Relação Real (K_r) e representa a razão entre as tensões que aparecem nos lados de alta e baixa do transformador. Pelo fato da operação não ser a mesma em condições diferente de excitação – porém, com tensões muito próximas – é de se esperar valores diferentes de relação real.

Além disso, como a tensão primária é, na maioria dos casos, elevada, encontra-se a magnitude da mesma através do diagrama fasorial do equipamento. Logo, a Relação Real é dada por:

$$K_r = \frac{|\vec{V}_{\text{pri}}|}{V_{\text{sec}}} \quad (13)$$

Por fim, e talvez mais importante, existe o chamado Fator de Correção de Relação (FCR_p). Esse, por sua vez, perfaz a relação entre a Relação Real e a Relação Nominal.

$$FCR_p = \frac{K_r}{K_p} \quad (14)$$

Todo esse equacionamento remete ao surgimento de erros de transdução. Ou seja, é de se esperar que nem sempre a tensão secundária estará refletindo de maneira fiel a encontrada do lado de alta do transformador. Isso deve-se, a formação da tensão no secundário quando sob carga. A corrente drenada pelos instrumentos instalados no TP é quem dita a magnitude da tensão e o ângulo de defasagem entre a alta e a baixa. Para um TP ideal, esses erros seriam zero. Entretanto, na prática isso não acontece.

O Erro de Relação (ε), em uma base por unidades ou percentual, se multiplicado por 100%, é dada por:

$$\varepsilon = \frac{K_p V_{\text{sec}} - |\vec{V}_{\text{pri}}|}{|\vec{V}_{\text{pri}}|} \quad (15)$$

Diante dessas relações apresentadas, a classe de exatidão padronizada para transformadores de potencial indutivos para medição está diretamente atrelada ao conceito do Fator de Correção de Relação, Erros de Relação e do Ângulo de Fase. Sendo distribuída em três classes normalizadas, ou seja:

- ✓ Classe de exatidão 0,3;
- ✓ Classe de exatidão 0,6;
- ✓ Classe de exatidão 1,2.

Tais classes correspondem a capacidade do erro de transdução se encontrar dentro de um paralelogramo traçado para essas três classes citadas. Para estabelecer a classe, o equipamento é submetido a ensaios à vazio e com cargas padronizadas no seu secundário, uma de cada vez, sob os seguintes níveis de tensão:

- ✓ Tensão nominal;
- ✓ 90% de tensão nominal;
- ✓ 110% de tensão nominal.

Estas tensões de ensaio cobrem uma faixa provável da condição de operação dos transformadores nas instalações elétricas.

Excepcionalmente, as classes de exatidão padronizadas para transformadores de potencial para proteção são designadas pelo máximo erro de relação permissível para a classe considerada, de 5% de tensão nominal à tensão de limite superior. Isto é, a tensão que corresponde a tensão nominal vezes o fator de sobrepressão 1,2, 1,5 ou 1,9.

São elas:

- ✓ Classe de exatidão de 3%;
- ✓ Classe de exatidão de 6%.

2.5.5 CARGAS NOMINAIS, POTÊNCIA NOMINAL E POTÊNCIA TÉRMICA NOMINAL

Cargas nominais, potência nominal e térmica nominal são termos relevantes na especificação dos transdutores de potencial e são detalhados em [27].

As cargas nominais são as cargas nas quais se baseiam os requisitos de exatidão dos transformadores. São como cargas de prova utilizadas para levantar a exatidão e identificar os limites do paralelogramo de exatidão.

A potência nominal, especificada, é dada como o valor da potência aparente, em VA, já com o fator de potência especificado, que o transformador deve suprir com tensão nominal e com carga nominal conectada a ele, proporcionando a exatidão especificada nos ensaios.

A Tabela 3 abaixo estabelece os requisitos de impedância, potência e fator de potência, ou seja cargas normalizadas para especificação das potências nominal e térmica.

Tabela 3 - Cargas padronizadas para levantamento da exatidão do transdutor

Cargas normalizadas com fator de potência unitário					
60 Hz e 120 V					
Designação	Potência Aparente	Resistência Ω	Reatância indutiva Ω	Impedância Ω	
P5	5	2880	0	2880	
P10	10	1440	0	1440	
P15	15	960	0	960	
60 Hz e 69,3 V					
P5	5	960,5	0	960,5	
P10	10	480	0	480	
P15	15	320	0	320	
Cargas normalizadas com fator de potência diferente do unitário					
60 Hz e 120 V					
Designação	Potência Aparente	Fator de potência	Resistência Ω	Reatância indutiva Ω	Impedância Ω
P25	25	0,70	403,2	411,3	576
P35	35	0,20	82,2	412,7	411
P75	75	0,85	163,2	101,1	192
P100	100	0,85	115,2	86,4	144
P200	200	0,85	61,2	37,9	72
60 Hz e 69,3 V					
P25	25	0,70	134,4	137,3	192
P35	35	0,20	27,4	134,4	137
P75	75	0,85	54,4	33,7	64
P100	100	0,85	38,1	28,6	47,6
P200	200	0,85	20,4	12,3	24

Fonte: NBR 6855, [27].

Por outro lado, a potência térmica nominal é caracterizada pela maior potência aparente que o TP pode fornecer, porém, sem responsabilidade alguma com os limites estabelecidos com os erros, em regime continuo, sob tensão e frequência nominal, contudo sem exceder os limites de temperatura. É dado pelo produto do fator de sobretensão contínuo ao quadrado pela maior carga especificada. Geralmente esse fator relaciona-se com sistemas susceptíveis a curtos e não implica que o TP pode operar com tensão acima da nominal.

Tabela 4 - Fatores de sobretensão nominal.

Fatores de sobretensão nominal			
Grupo de ligação	Fator de sobretensão nominal	Duração	Forma de conexão do enrolamento primário e condições do sistema de aterramento
1	1,2	Contínuo	Entre fases de qualquer sistema
2	1,2	Contínuo	Entre fases e terra de um sistema com neutro eficazmente aterrado
	1,5	30 s	
3a	1,2	Contínuo	Entre fase e terra de um sistema de neutro não eficazmente aterrado, com remoção automática da falha
	1,9	30 s	
3b	1,2	Contínuo	Entre fase e terra de um sistema de neutro não eficazmente aterrado, sem remoção automática da falha
	1,9	Coníntuo	

Fonte: NBR 6855, [27].

2.5.6 GRUPOS DE LIGAÇÃO

Os grupos de ligação estão diretamente relacionados com a disposição de instalação em campo e se classificam por três grupos, quais sejam:

- ✓ Grupo de ligação 1;
- ✓ Grupo de ligação 2;
- ✓ Grupo de ligação 3.

O Grupo de ligação 1 é caracterizado pela configuração externa do dispositivo propiciar a conexão entre duas fases da rede elétrica. Para tanto, a tensão de isolação das bobinas deve ser projetada de maneira adequada, além da especificação correta por parte do comprador.

Os elementos do Grupo de ligação 2 são projetados para aferição da tensão entre fase e terra. Assim, é necessário observar os requisitos de aterramento da malha elétrica. Uma vez que é imprescindível que o sistema de aterramento seja extremamente eficaz.

Por fim, os elementos do Grupo de ligação 3, assim como o do grupo 2, são planejados para a aferição de tensão fase e terra. Porém, não se faz essencial que a malha de aterramento seja de grande eficiência.

2.5.7 CARGA SIMULTÂNEA PARA TPI DE DOIS OU MAIS SECUNDÁRIOS

Para a especificação de um TPI com dois ou mais secundários, segundo [27], é interessante sempre levar em consideração que tanto a potência nominal, quanto a potência térmica nominal deve ser distribuída de maneira a não ultrapassar a capacidade nominal do

transformador. Ou seja, caso a especificação fique além da capacidade operativa do transdutor, haverá consequências negativas relacionadas ao desempenho do mesmo frente à sua exatidão.

2.5.8 USO INTERNO E EXTERNO

A localização de instalação onde o transformador de potencial será alocado sempre será de fundamental importância. Fatores associados a atmosfera, temperatura, umidade, altitude, entre outros aspectos do ambiente, devem ser analisados com cautela, pois a constituição física do TP pode não ser tão apropriada ao local onde ele será instalado.

Assim como fora citado anteriormente, o isolamento do equipamento pode conter limitações que inviabilizam a instalação. Logo, faz-se necessário a escolha pela acomodação interna ou externa do mesmo para que não haja problemas técnicos.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer do capítulo desenvolveu-se, desde o equacionamento teórico do funcionamento do transformador de potencial, até suas respectivas particularidades relacionadas à sua operação, distinguindo-se os dois tipos mais comumente utilizados de transdutores de potencial, os indutivos e os capacitivos.

Complementarmente, baseado em [27], atribuiu-se os principais fatores de seleção do equipamento ideal para medição, mais precisamente, enfatizando a questão da classe de exatidão, o nível de tensão ao qual o mesmo ficaria submetido, bem como as condições de cargas agregadas ao secundário do transdutor.

Outro aspecto pouco evidenciado em literaturas anteriores ou mesmo em trabalhos passados, mas que pode ser fator de destaque na alteração da composição da resposta em frequência dos transformadores, está diretamente associado à constituição física, material, do objeto em questão. As resinas responsáveis pelo encapsulamento, a composição interna e os requisitos de isolamento abordados são de grande relevância para a especificação deste equipamento.

Portanto, as características inerentes aos transformadores de potencial, levantadas neste capítulo, foram apresentadas de uma forma resumida, e focando principalmente os aspectos fundamentais relativos à essa dissertação. Todavia, deve-se esclarecer que o assunto é bastante conhecido e difundido no meio acadêmico e profissional, portanto, dispensa maiores aprofundamentos técnicos e teóricos.

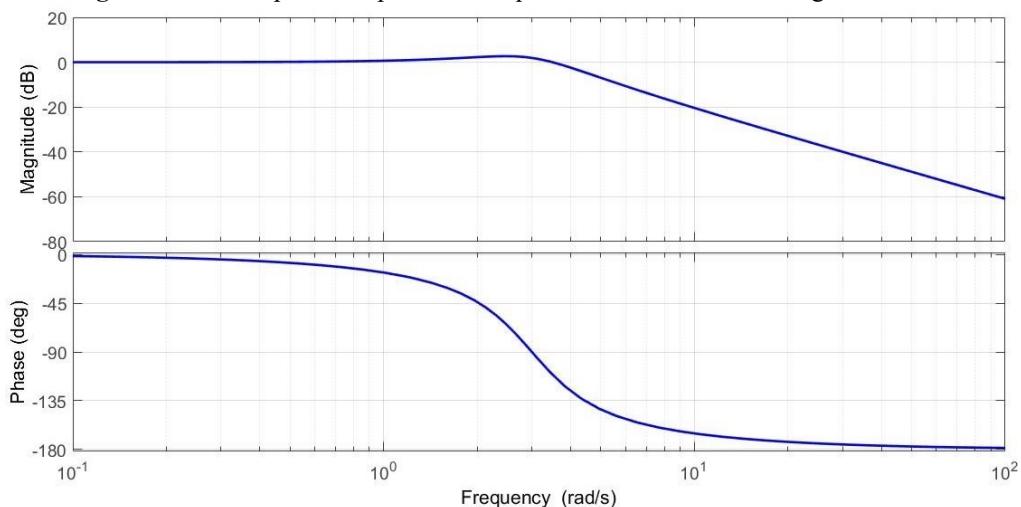
CAPÍTULO 3

3. RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Utilizada como uma ferramenta de estudo em algumas áreas da Engenharia Elétrica, a Analise de Resposta em Frequência (FRA) contempla o diagnóstico do comportamento de sistemas quando submetidos à entrada de sinais de excitação. Aplicações voltadas para sistemas de controle, por exemplo, estão diretamente relacionadas com o levantamento de uma função transferência de uma planta. Nestes casos, estes sistemas quando sujeitos a um sinal de entrada podem descrever o comportamento/desempenho ao longo de um espectro de frequência bastante amplo, descritos através de uma amplitude e fase. A composição dessas duas grandezas é denominada Resposta em Frequência, [29]. Um exemplo comum pode ser aplicado a análise do desempenho de um filtro de 2^a ordem. A Figura 3.1 abaixo ilustra o comportamento da mesma em uma certa faixa de frequências.

Figura 3.1 - Exemplo de resposta em frequência de um sistema de segunda ordem.



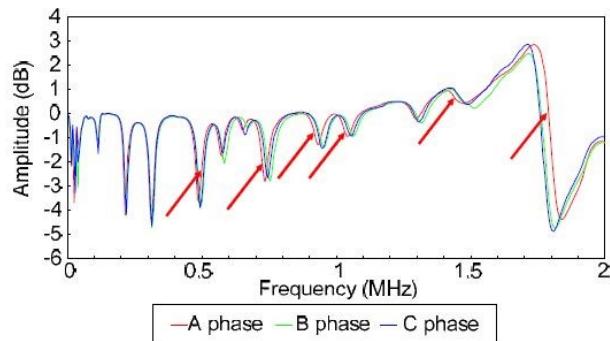
Fonte: Adaptado de [29].

Já em outra área da Engenharia Elétrica, os princípios da Análise de Resposta em Frequência veem sendo utilizada ao longo de pesquisas relacionadas a detecção de falhas em transformadores de potência. Por se tratar de um elemento vital para o sistema elétrico, é natural que tal preocupação seja relevante.

A origem dessas falhas está relacionada diretamente com o meio de funcionamento dos transformadores e englobam defeitos, tais como: falhas dielétrica, térmicas, mecânicas e químicas, decorrentes de curtos-circuitos passantes, energizações, descargas atmosféricas e fenômenos relacionados com a rigidez dielétrica do meio isolante, [28,30-32].

A Figura 3.2 ilustra a aplicação da técnica de resposta em frequência na pré avaliação da deformação de um transformador de potência, visto na Figura 3.3.

Figura 3.2 - Exemplo de aplicação da análise de resposta em frequência.



Fonte: Adaptado de [28].

Figura 3.3 - Exemplo de deformação ocasionada por estresse eletromecânico.



Fonte: Adaptado de [28].

Neste contexto, os ensaios realizados através da técnica de FRA visam a avaliação completa do estado físico do transformador, uma vez que, os métodos de ensaio encontrados em [28] permitem o levantamento individual da resposta de cada componente e estruturas do

equipamento. Entretanto, esse tipo de avaliação, com vistas em diagnóstico de falhas é válida somente quando existe uma resposta inicial do transformador. Ou seja, logo na saída do mesmo da fábrica faz-se necessário os ensaios para uma avaliação mais precisa da sua condição elétrica e mecânica ao longo da vida útil.

Assim, partindo-se do princípio da grande aplicabilidade e importância deste método, idealizou-se a possibilidade de aplicá-lo na aquisição da Curva de Resposta em Frequência (CRF) de transformadores de medição utilizados para mensurar tensões harmônicas.

3.2 TIPOS DE ENSAIOS

O procedimento de teste é de compreensão simples e baseia-se na injeção de um sinal de tensão com amplitude fixa aos terminais de um dos lados do transformador, seja o lado de baixa ou de alta. Usualmente, por questões de segurança, aplica-se tensão no lado de alta, pois, pela relação de transformação, tem-se uma tensão menor do lado de baixa, proporcionando mais segurança na execução dos procedimentos. Mas, não há restrição para à prática experimental do lado oposto.

De modo geral, a amplitude de tensão utilizada é bem abaixo da tensão nominal. Dessa forma, é natural existir a preocupação com a validade dos resultados encontrados. Porém, [16-17], mostra evidências empíricas de que a magnitude do sinal de entrada não oferece erros relevantes a fim de comprometer a interpretação dos resultados. Por outro lado, a frequência utilizada é escalonada em unidades de Hertz até cerca de MHz.

É importante salientar que, para as frequências superiores a frequência de 60 Hz, tem-se os efeitos pronunciados devido a constituição do núcleo magnético do transformador, bem como a interferência da reatância capacitiva inerente as características dos transformadores, [12].

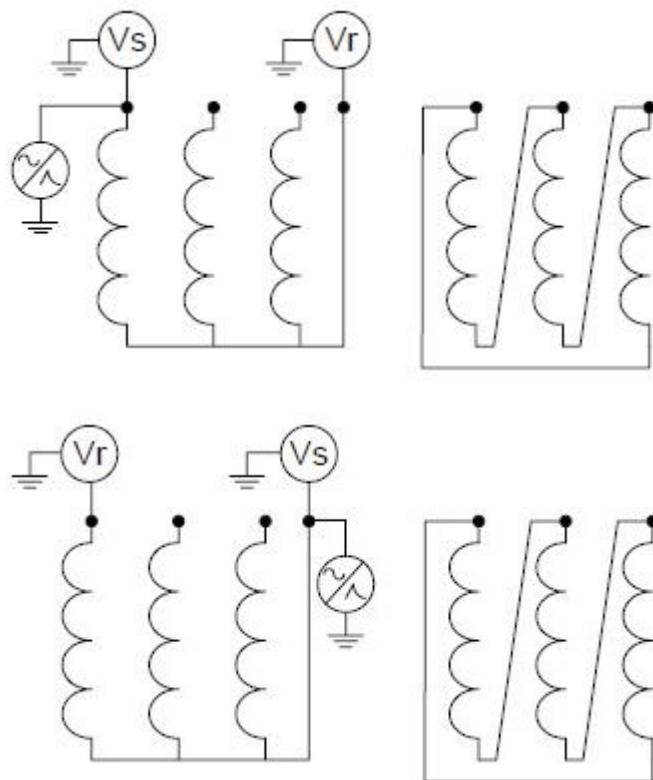
Para os transformadores de potencial, seja eles indutivos ou capacitivos, tem-se comportamentos totalmente diferentes e aleatórios. Para tanto, é imprescindível levar em conta todos os fatores associados ao teste e suas peculiaridades relacionadas ao aumento gradativo da frequência.

Na avaliação criteriosa do estado físico dos transformadores de potência por meio do FRA, encontra-se em [28] quatro tipos de testes mais comumente realizados. Cada qual possui

uma avaliação distinta das partes do transformador e pode ser empregada da maneira mais conveniente à necessidade.

- ✓ **End-to-end open:** este teste, em específico, consiste no levantamento da curva de resposta em frequência (CRF) de cada enrolamento. O efeito da impedância de magnetização é mais pronunciado para esta disposição de teste. Além disso, é o mais usual dentro os outros testes relacionados a resposta em frequência, visto que permite observar a característica de cada bobina, individualmente. Caso haja indisponibilidade ou pressa na aquisição dos testes, recomenda-se que este seja efetuado primeiro, caso não haja mais tempo para realizar os outros que seguem. Para a realização deste, aplica-se tensão em uma extremidade do enrolamento e mede-se a outra. Pode ser aplicado tensão no neutro do transformador e medir a tensão na entrada do enrolamento, deixando a conexão do secundário em aberto. A conexão por ser visualizada pela Figura 3.4.

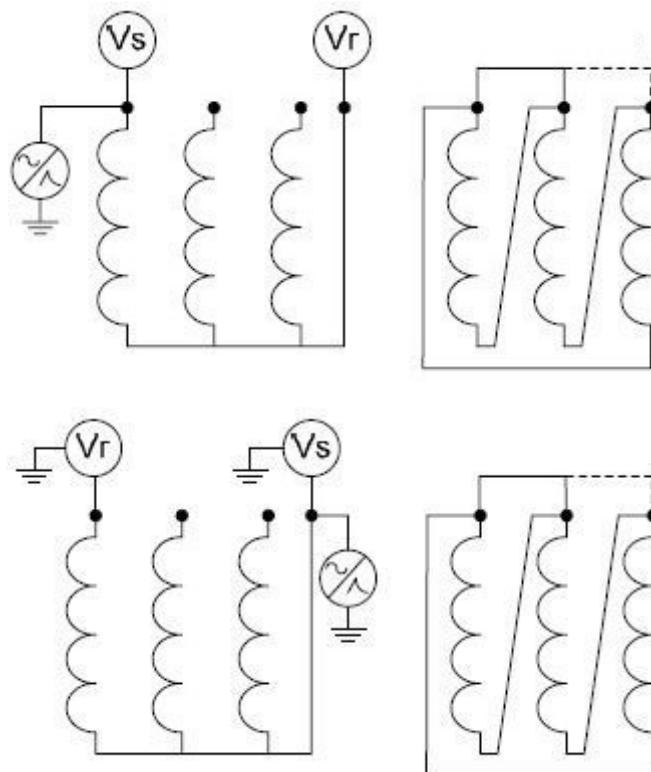
Figura 3.4 - Esquema de ligação do ensaio *end-to-end open*.



Fonte: Adaptado de *Brochure 342*, [28].

- ✓ **End-to-end short-circuit:** de maneira análoga ao teste anterior, aplica-se tensão na extremidade do enrolamento e mede a resposta na outra ponta. A inversão de sentido na aplicação da tensão também pode ser feita. Todavia, do outro lado do transformador, na baixa, caso o sinal seja aplicado no lado de alta, a fase correspondente a ensaiada deve ser curto-circuitada. Neste caso, o efeito pronunciado é intrínseco a indutância de dispersão dos enrolamentos. A conexão por ser visualizada pela Figura 3.5.

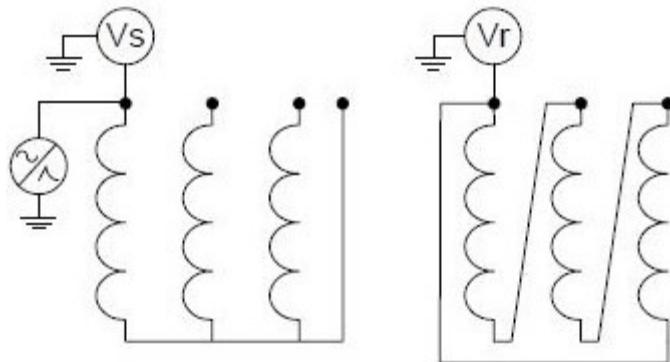
Figura 3.5 - Esquema de ligação do ensaio *end-to-end short-circuit*.



Fonte: Adaptado de *Brochure 342*, [28].

- ✓ **Capacitive inter-winding:** neste caso, aplica-se uma tensão aos terminais de alta, geralmente, e mede-se a tensão no terminal de baixa, da mesma fase. Com isso, encontra-se uma impedância bastante exacerbada para as baixas frequências, que diminui como o aumento gradativo da frequência, caracterizando assim o efeito da capacidade entre a baixa e alta do transformador. Avalia-se a capacidade de isolamento existente entre os níveis de tensão. Via de regra, o efeito capacitivo existente em meio a presença massiva de enrolamentos destaca-se sempre da variação da frequência. A conexão por ser visualizada pela Figura 3.6.

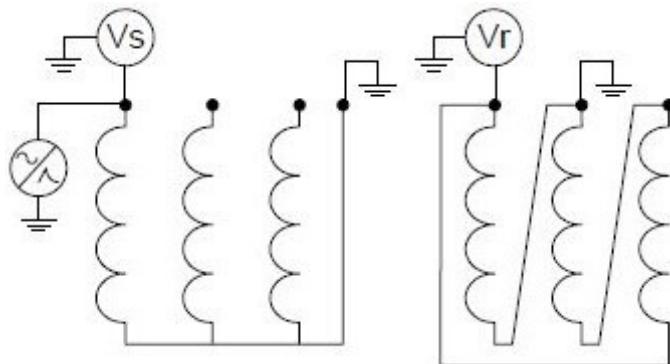
Figura 3.6 - Esquema de ligação do ensaio *capacite inter-winding*.



Fonte: Adaptado de *Brochure 342*, [28].

- ✓ **Inductive inter-winding:** a conexão do equipamento é feita de maneira adequada, assegurando a eficácia dos pontos de aterramento do dispositivo à terra. Aplica-se tensão aos terminais de um dos lados do transformador, estando o mesmo aterrado no ponto apropriado, e mede-se a amplitude do outro lado, no terminal correspondente, onde este lado também deve estar devidamente aterrado. A resposta de baixa frequência é determinada pela relação de transformação do equipamento. Este teste é a base dos testes realizados no capítulo experimental. A conexão por ser visualizada pela Figura 3.7.

Figura 3.7 - Esquema de ligação do ensaio *inductive inter-winding*.



Fonte: Adaptado de *Brochure 342*, [28].

É de suma importância destacar neste ponto do trabalho que, esse último teste supracitado, “*inductive inter-winding*”, fora de substancial importância na realização de todos os ensaios contidos no decorrer do capítulo experimental apresentado mais adiante, já que o mesmo tem por objetivo levantar a relação de transformação do equipamento ao longo de uma faixa de frequência de interesse.

3.3 TRATAMENTO DOS DADOS

Não menos importante que a realização do teste, propriamente dito, é a visualização dos resultados de maneira a propiciar fácil entendimento. Para tanto, [16-17,28,32,33] apresentam equacionamentos capazes de tratar os dados resultantes do ensaio.

Assim como mencionado no início deste capítulo, o método FRA também é empregado em sistema de controle, onde é possível levantar uma função transferência do sistema/planta objeto de estudo. Desse modo, o resultado do equacionamento sempre é função da razão entre a tensão aplicada na entrada do sistema e o sinal de saída. Complementarmente, escolhe-se a escala logarítmica para abranger uma quantidade maior de pontos no espectro de frequência em função da magnitude da resposta. Por conseguinte, o equacionamento mais utilizado para expor os resultados obtidos para a magnitude do sinal pode ser dada por:

$$\text{Amplitude (dB)} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_{\text{sec}(f)}}{V_{\text{pri}(f)}} \right) \quad (16)$$

Onde:

$V_{\text{sec}(f)}$: Tensão mensurada no secundário do TP, em função da frequência;

$V_{\text{pri}(f)}$: Tensão mensurada no primário do TP, em função da frequência;

Já com relação a resposta do erro ocasionado pelo ângulo de fase, tem-se que:

$$\theta_{\text{res}} (\circ) = \theta_{\text{sec}} - \theta_{\text{pri}} \quad (17)$$

Onde:

θ_{sec} : Ângulo de fase medido no secundário do TP;

θ_{pri} : Ângulo de fase medido no primário do TP;

θ_{res} : Ângulo de fase resultante.

Outros autores como [16,20] preferem apresentar seus resultados após a normalização desses sinais de tensão. De fato, tal exibição oferece vantagens sob a perspectiva do objetivo deste trabalho e também será empregada na apresentação de parte dos dados obtidos neste trabalho. A normalização da curva de resposta em frequência faz com que mesma se torne mais prática e consequentemente fácil de ser interpretada, ou seja, ao se apresentar os resultados para um sistema por unidade (pu), estabelece uma relação direta com os dados nominais dos equipamentos ensaiados além de possibilitar a confrontação entre eles, já que possuem classes

de tensão diferentes e se comparados por tensão atingiriam patamares distintos em um gráfico de comparação.

Isto posto, tem-se a equação (18):

$$\text{Amplitude (pu)} = \sqrt{\frac{V_{\text{sec}(f)}}{V_{\text{pri}(f)}}} \sqrt{\frac{V_{\text{sec}(n)}}{V_{\text{pri}(n)}}} \quad (18)$$

Onde:

$V_{\text{sec}(n)}$: Tensão nominal do secundário do TP, dado de placa;

$V_{\text{pri}(n)}$: Tensão nominal do primário do TP, dado de placa.

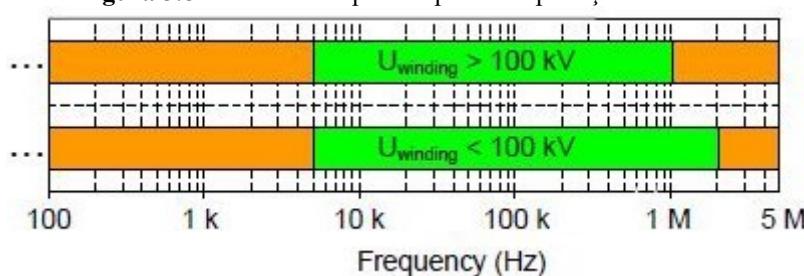
3.4 INTERPRETAÇÃO TÍPICA

A **título de ilustração** e de acordo com a finalidade do teste de FRA, realiza-se a interpretação mais adequada para os gráficos obtidos.

No que se refere ao diagnóstico de falhas, existe uma correlação direta entre a alteração dos parâmetros elétricos e mecânicos do transformador com as variações notadas da resposta original se comparada com a suspeita ou incidência de falha.

Nestas circunstâncias, a mudança da característica de resposta pode se apresentar em uma faixa específica ou ao longo de todo o espectro de frequência. Isto deve-se da interação entre o fenômeno causador da falha com a estrutura elétrica do transformador. O comprometimento de enrolamentos ou estruturas de sustentação, até mesmo a isoliação elétrica, provoca mudanças na resposta, o que tende a constatação do problema pontualmente, antes mesmo da parada de funcionamento do instrumento. A Figura 3.8 identifica as faixas de interpretação das frequências obtidas com aquela frequência do sinal aplicado.

Figura 3.8 - Faixa de frequência para interpretação de falhas.



Fonte: Adaptado de *Brochure 342*, [28].

Em [33] consta um estudo realizado, com o auxílio de um modelo formulado por [34], que traduz os defeitos pela modificação das especificações elétricas como resistência, indutância e capacidade. Além desse, outros trabalhos também se baseiam na FRA para interpretação prévia dos problemas ocasionados pelas falhas nos transformadores de força.

Tabela 5 - Relação direta entre as falhas mecânicas e as faixas de frequência.

Faixas de Frequência (ff)	Variações de Parâmetros	Suposta Falhas
$ff < 3 \text{ kHz}$	Núcleo, conexões e indutância de dispersão	Deformação no núcleo, circuitos abertos e espiras curto-circuitadas
$3 \text{ kHz} \leq ff < 20 \text{ kHz}$	Impedância shunt	Movimento entre enrolamentos e estruturas de sustentação
$20 \text{ kHz} \leq ff < 400 \text{ kHz}$	Enrolamentos	Deformação entre enrolamentos
$400 \text{ kHz} \leq ff < 1 \text{ MHz}$	Enrolamentos e isolação	Movimento entre enrolamentos, variação de impedância para terra

Fonte: Adaptado de [33].

Por outro lado, no que tange a Análise de Resposta em Frequência para os Transdutores de Potencial tem-se a preocupação tão somente da interpretação dos erros resultantes da interação de frequências harmônicas com esses equipamentos.

Assim, as curvas podem ser interpretadas via ponderação dos efeitos decorrentes dos erros. Quer dizer que, se a tensão retratada no secundário do transformador amplifica o sinal vigente no primário, significa que a distorção total de tensão está além da realidade, não colaborando para a apresentação correta dos indicadores de qualidade. Todavia, caso a tensão elucidada no secundário do instrumento sofra uma atenuação do sinal em virtude do equipamento, tem-se um problema ainda maior, pois os efeitos derivados da elevação da distorção de tensão na barra mascara a real condição do sistema.

Finalmente, caso haja relação unitária da Equação 3 ao longo de um amplo espectro de frequência, não há com que se preocupar com relação ao indicador de distorção harmônico. Obviamente, caso esteja dentro dos limites permitidos em [35,36].

A Tabela 6, mostrada logo em seguida transcreve essa interpretação de maneira mais didática e fornece a relação direta da magnitude do sinal medido com a relação de efeito prático associada a distorção de tensão.

Tabela 6 - Interpretação típica da amplitude do sinal mensurado pelo transdutor de potencial.

Amplitude (pu) < 1	Amplitude (pu) = 1	Amplitude (pu) > 1
Valor real é maior do que o amostrado. Pode haver violação dos limites.	Valor mensurado é ideal. Não há erros de transdução entre primário e secundário.	Valor real é menor que o amostrado. Decisões equivocadas podem ser tomadas sem necessidade.

Fonte: Autor.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A apresentação inicial deste capítulo, tratou-se de contextualizar as referências onde se aplicaram os testes de FRA, paralelamente, ou como objetivo principal de outros trabalhos, buscando evidenciar a finalidade do emprego do teste no diagnóstico das falhas em transformadores de potência. Não obstante, comenta-se algumas aplicações voltadas para a área de sistemas de controle.

Por conseguinte, foram abordados os tipos mais usuais de testes realizados nos equipamentos, tomando-se como base a padronização imposta em [28]. Isto posto, evidenciou-se a utilização de um do ensaio denominado de “*inductive inter-winding*” como o principal deste trabalho. Porém, sem deixar de lado o mérito de cada um dos outros testes.

Em seguida, o tratamento dos dados obtidos pós ensaios haveriam de ser dispostos de forma eficaz, e uma abordagem amparada não somente em referências sólidas, mas com certa sagacidade apresentou-se de maneira coerente a necessidade do tema. Este fato será confirmado quando da apresentação dos resultados alcançados nos testes experimentais desenvolvidos no capítulo 4.

Por fim, fez-se essencial a explanação acerca da interpretação dos resultados. Ora dentro do plano interligado às falhas diante das faixas de frequência, ora relacionando-a na perspectiva da capacidade de mostrar à amplificação, atenuação ou constância da resposta dos transdutores de potencial frente distorções harmônicas de tensão.

Portanto, espera-se ter agregado a crucial importância da aplicação da técnica de Análise de Resposta em Frequência para a confiabilidade dos dados mensurados por esses instrumentos e, posteriormente, repassadas aos analisadores de qualidade de energia elétrica.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os transformadores, de modo geral, fazem a integração de todo sistema elétrico de potência de uma maneira única e equivalente. No que diz respeito aos de potência, conseguem promover a conversão dos níveis das tensões e correntes elétricas desde a geração até os consumidores finais, diminuindo perdas e promovendo mais segurança. Por outro lado, os transformadores de potencial são utilizados em larga escala em aplicações voltadas para as medições de tensões elétricas situadas a níveis não correspondentes aos equipamentos encontrados no mercado de hoje.

Logo, eles promovem a integração da tensão elétrica existente, que está ora em grandes magnitudes, para valores mais compatíveis com os medidores de faturamento, proteção e medições de rotina. Além de propiciar mais segurança a quem os manipulam.

Assim sendo, diante da necessidade de assegurar a confiabilidade e a veracidade das medições feitas através de transdutores de potencial, fez-se necessário ensaios voltados ao levantamento da curva de resposta em frequência dos mesmos.

4.2 ESTRUTURA DO LABORATÓRIO

4.2.1 AMBIENTE LABORATORIAL

Viabilizou-se, por meio da unidade LAC, dos Institutos LACTEC, em Curitiba-PR, os ensaios para levantamento das curvas de resposta em frequências de alguns transformadores de potencial. O ambiente utilizado foi o do laboratório de alta tensão, que possui instalações bem equipadas e com equipamentos de última geração, visando a obtenção de resultados precisos e confiáveis. Alguns serviços realizados pelo laboratório envolvem ensaios elétricos de equipamentos como isoladores, chaves seccionadoras, religadores e reguladores de tensão, transformadores de potência e potencial, bem como a calibração de equipamentos em alta tensão.

Adicionalmente, também executam serviços de consultoria nas áreas de diagnósticos de sistemas elétricos, desenvolvem diversos ensaios em campos e também voltados à área da qualidade de energia elétrica.

De estrutura física, o laboratório possui um pé direito útil de cerca de 21 m de altura com área de 768 m² e manejo de cargas de até 150 toneladas. Os ensaios supramencionados podem ser realizados até a classe de tensão de 550 kV, salvo os ensaios de impulso atmosférico, que podem ir até aproximadamente 3200 kV. A Figura 4.1 mostra a estrutura física do laboratório LAC vista lado externo.

Outro fator preponderante para a obtenção de boas medições está diretamente vinculado ao sistema da malha de aterramento do laboratório. Essa, por sua vez, possui grande estabilidade e baixíssima resistência, garantindo boas respostas e o mínimo de ruído aos equipamentos de aquisição de sinais. Este fato é de grande importância para a resposta em frequência, uma vez que os ensaios em um local em que o sistema de aterramento não é dos melhores, os erros ocasionados podem interferir de maneira negativa na obtenção e na análise dos resultados gerando, por exemplo, ruídos ao longo de todos espectro de frequência, e levar a um erro na interpretação dos resultados.

Figura 4.1 - Vista externa do LAC (Laboratório de alta tensão do Institutos LACTEC).



Fonte: Imagem retirada do site do Institutos LACTEC².

4.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

4.3.1 GERADOR DE SINAIS

Como os princípios dos ensaios de análise de resposta em frequência se baseiam na imposição de um sinal de amplitude fixa e frequência variável, é necessário utilizar uma fonte confiável, similar a da Figura 4.2, que forneça esse tipo de sinal com precisão.

Para isso, empregou-se o gerador de sinais Agilent 33220A da Keysight Technologies com os seguintes recursos e especificações:

- ✓ Forma de onda senoidais e quadradas com frequência até 20 MHz;
- ✓ Formas de onda em rampa, triangulares, ruídos e geração de pulsos com borda variável e ondas CC;
- ✓ Modulação AM, FM e PWM (varreduras lineares e logarítmicas);
- ✓ Software próprio para criação e edição de sinais;

Figura 4.2 - Vista frontal do gerador de sinais da Agilent.



Fonte: Imagem retirada do site da Keysight³.

4.3.2 OSCILOSÓPIO

Para a medição dos sinais das tensões no primário e secundário, foi necessário um osciloscópio para realizar a captação dos sinais.

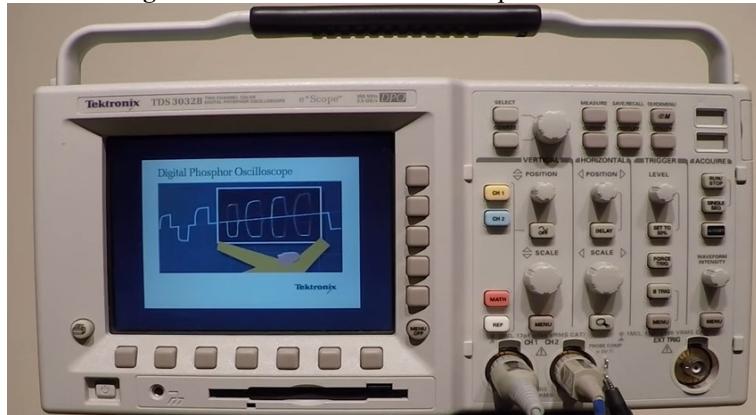
² Disponível em: <http://www.institutoslactec.org.br/>

³ Disponível em: <https://www.keysight.com/br/pt/home.html>.

O equipamento empregado foi o osciloscópio digital TDS3032 da Tektronix, similar ao da Figura 4.3. O mesmo possui as seguintes características:

- ✓ Dois canais de medição – o suficiente para captar a tensão de entrada e saída;
- ✓ Possibilidade de operação remota através de uma interface compatível;
- ✓ Banda de frequência de até 300 MHz;
- ✓ 2,5 GS/s – gigasamples por segundo (taxa de digitalização);

Figura 4.3 - Vista frontal osciloscópio Tektronix.



Fonte: Retirado do site da Tektronix⁴.

4.3.3 TRANSFORMADORES DE POTENCIAL

Foram utilizados para a realização dos ensaios três transformadores de potencial que se encontravam dentro das instalações do instituto LAC (os mesmos não estavam em operação, constavam no almoxarifado). Dentre eles, duas unidades eram de mesma fabricação, da Balteau, bastante utilizados no mercado e a terceira unidade era unicamente para fins laboratoriais. Para as unidades da Balteau, a Tabela 7 apresenta os dados de placa.

Tabela 7 - Dados de placa Transformador de Potencial Indutivo classe 15 kV.

Uso	Norma	Frequência	Grupo de ligação	Exatidão	Fator de sobretensão
Externo	NBR 6855	60 Hz	2	0,3P75	1,2 (continuo) 1,5 (30s)
Tensão de Isolação	Nível de Isolação	Potência Térmica	Tensão primária	Tensão secundária	Massa
15 kV	110 kV	500 VA	13800/ $\sqrt{3}$ V	230 V	20 kg

Fonte: Adaptado dos catálogos da Balteau⁵.

⁴ Disponível em: <https://www.tek.com/>.

⁵ Disponível em: <http://www.balteau.com.br/balteau/pb/>.

Para a unidade laboratorial, tem-se:

Uso	Norma	Frequência	Grupo de ligação	Exatidão	Fator de sobretensão
Interno	6855	60 Hz	2	0,3P	1,2 (continuo) 1,5 (30s)
Tensão de Isolação	Nível de Isolação	Potência Térmica	Tensão primária	Tensão secundária	Massa
72,5 kV	350 kV	500 VA	15/25/45/60 kV	110 V	100 kg

Ambos os TAPs da unidade de transformação laboratorial foram ensaiados, e as respostas são ilustradas no item 4.7 deste capítulo.

4.3.4 SOFTWARE UTILIZADO

Além dos equipamentos, é de suma importância utilizar procedimentos para otimizar ao máximo os ensaios com o intuito de ganhar tempo e automatizar o processo. Diante dessa necessidade, o instituto LACTEC criou um software que, através da interface de comunicação GPIB (General Purpose Interface Bus), largamente utilizada para operação de aparelhos em modo remoto, [37], é capaz de fazer a aquisição dos sinais de tensão mensurados pelo osciloscópio bem como realizar a configuração do gerador de sinais, impondo a faixa na qual o mesmo irá operar durante cada ensaio separadamente.

É importante enfatizar que, para a aquisição dos dados ponto a ponto, o Software desenvolvido no Instituto LACTEC fez-se de grande valia. De modo geral, o gerador de sinal operando juntamente com o osciloscópio consegue realizar automaticamente o teste. A faixa de variação das frequências aplicadas durante a realização de todos os ensaios foi de 20 Hz até 2 MHz, podendo ser alterada no ato da configuração do teste antes de executá-lo.

A saída dos dados de ensaio é de arquivos separados por vírgula do Excel e contém os valores de tensão aplicada no terminal primário, medida no secundário, módulo da impedância do transformador, bem como a função transferência do mesmo dada pela relação entre a tensão de saída pela tensão aplicada na entrada, como visto na Equação 1, do Capítulo 3.

4.4 RECOMENDAÇÕES PARA OS PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

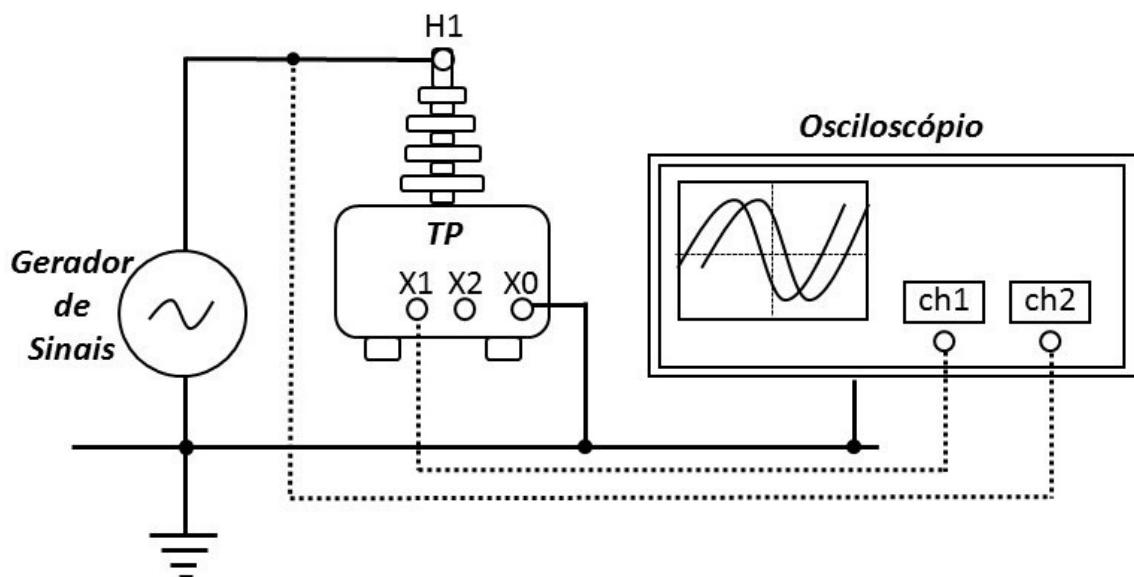
Com o intuito de realizar os testes sem influência externa, existem cuidados relevantes a serem tomados, desde a configuração dos equipamentos auxiliares como geradores de função,

osciloscópio e cabos, até a própria manipulação dos resultados. Esse último fator já foi comentado no Capítulo 3, dedicado ao FRA.

4.4.1 CONEXÕES E ENSAIO

O desenho do diagrama de ligação dos equipamentos ensaiados é mostrado na Figura 4.4. O gerador de sinais aplica uma tensão senoidal com nível de tensão, cerca de 5 Volts pico-a-pico de magnitude e com frequência variável de 20 Hz até 2 MHz, como configurado no software. As ponteiras dos canais do osciloscópio são conectadas nos terminais primários e secundários dos transformadores e nenhum amplificador de tensão é colocado depois do gerador de sinais, visto que não haveria erros significativos nas amplitudes captadas pelo osciloscópio.

Figura 4.4 - Esquemático de ligação dos instrumentos de medição e do transdutor de potencial.



Fonte: Autor.

Descrito os detalhes dos equipamentos manuseados é de suma importância informar acerca dos procedimentos de montagem. Como pode ser observado na Figura 4.5, as conexões de aterramento entre os pontos comuns, do transformador de potencial mostrado bem como do gerador de sinais e do osciloscópio foram fixadas ao ponto de terra do galpão por meio de uma lâmina de cobre.

Figura 4.5 - Exemplo de conexão dos equipamentos em laboratório (ênfase no conexão à terra).



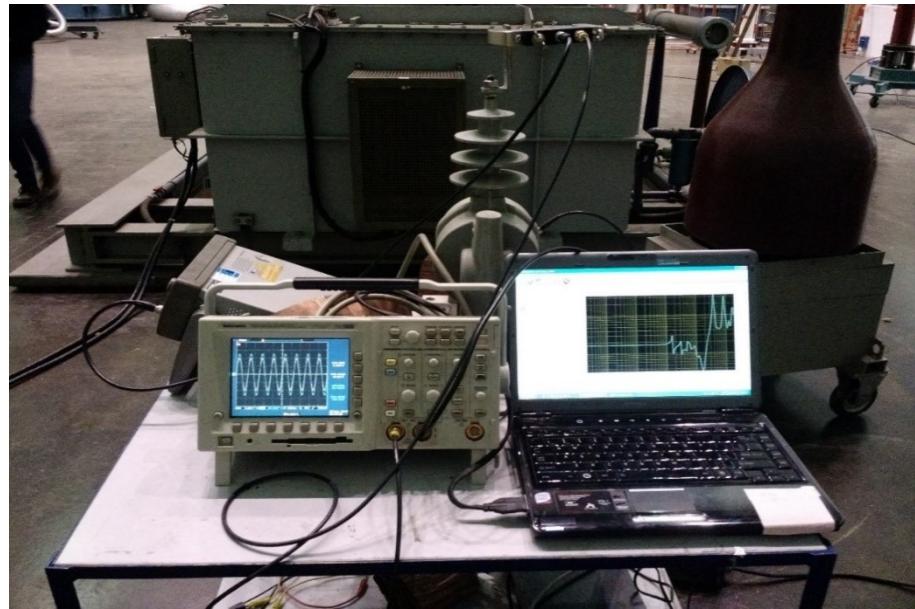
Fonte: Autor.

Para fins de segurança, a tensão sempre fora aplicada no lado primário do transformador. Uma vez que, uma amplitude tensão baixa imposta aos terminais do secundário, levaria a níveis de tensão elevados no lado de alta.

4.5 ENSAIOS NO TRANSFORMADOR DE 15 KV

O primeiro transformador de potencial utilizado foi uma das unidades de transformação de 15 kV da Balteau. Para este ensaio, foram realizadas duas medições em situações distintas. Na primeira, o terminal dado como “X2” no secundário do transformador estava conectado ao ponto de terra juntamente com os outros elementos e com o outro terminal de aterramento do lado de alta.

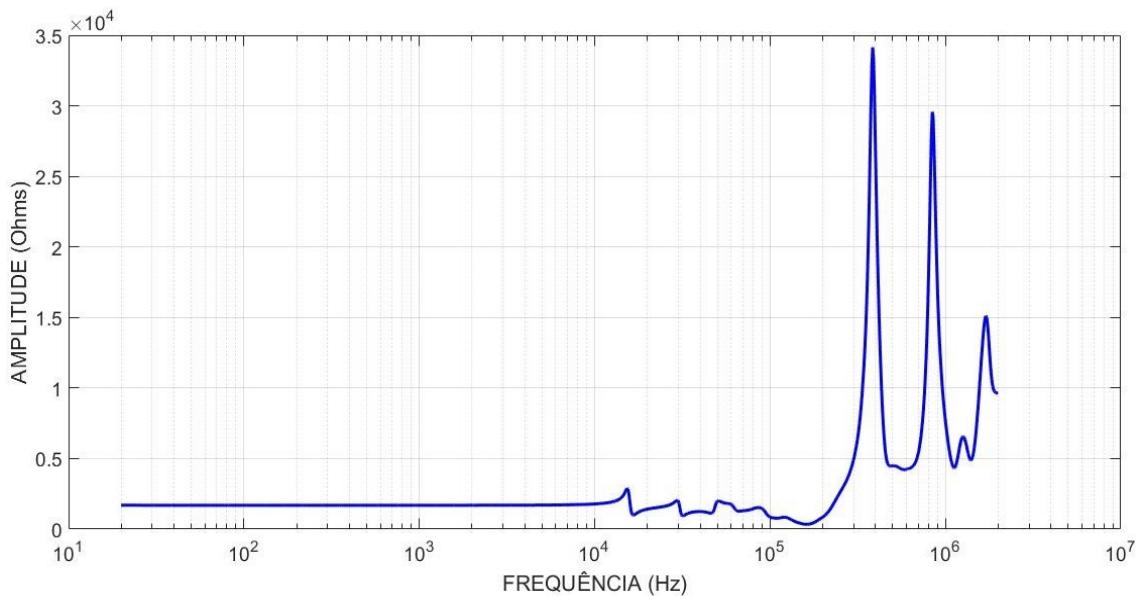
Figura 4.6 - Montagem experimental em um dos transformadores de potencial indutivo de 15 kV



Fonte: Autor

Como resultado do primeiro ensaio, após o tratamento dos dados gerados, pode-se observar na Figura 4.7 a seguir, a resposta em frequência da impedância do transformador.

Figura 4.7 - Resposta em frequência da impedância do transformador de potencial de 15 kV.



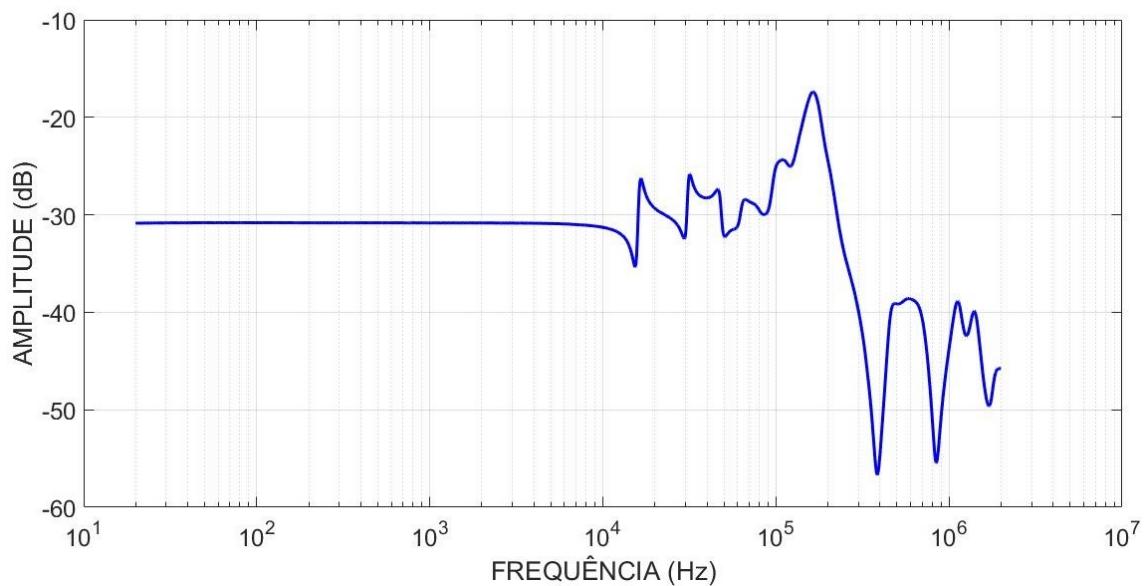
Fonte: Autor

Analisando o gráfico de resposta em frequência da impedância do transformador em questão, é possível notar certa constância da magnitude da impedância do mesmo até 13 kHz, após este ponto de frequência nota-se um comportamento não mais constante. O efeito da interação existente entre as estruturas internas que formam o equipamento como enrolamentos,

meio dielétrico e material isolante começa a ser sensibilizado pelo efeito das altas frequências, gerando assim picos de ressonância a medida que a frequência vai aumentando.

Paralelamente, ao verificar o resultado do ensaio sob o ponto de vista da tensão aplicada no terminal do primário do transdutor, temos um comportamento quase que inverso da curva anterior. Uma parcela de resposta bem constante até o mesmo ponto de 13 kHz e com os mesmos pontos ressonantes para as frequências harmônicas.

Figura 4.8 - Amplitude da função transferência H do transformador de potencial de 15 kV.

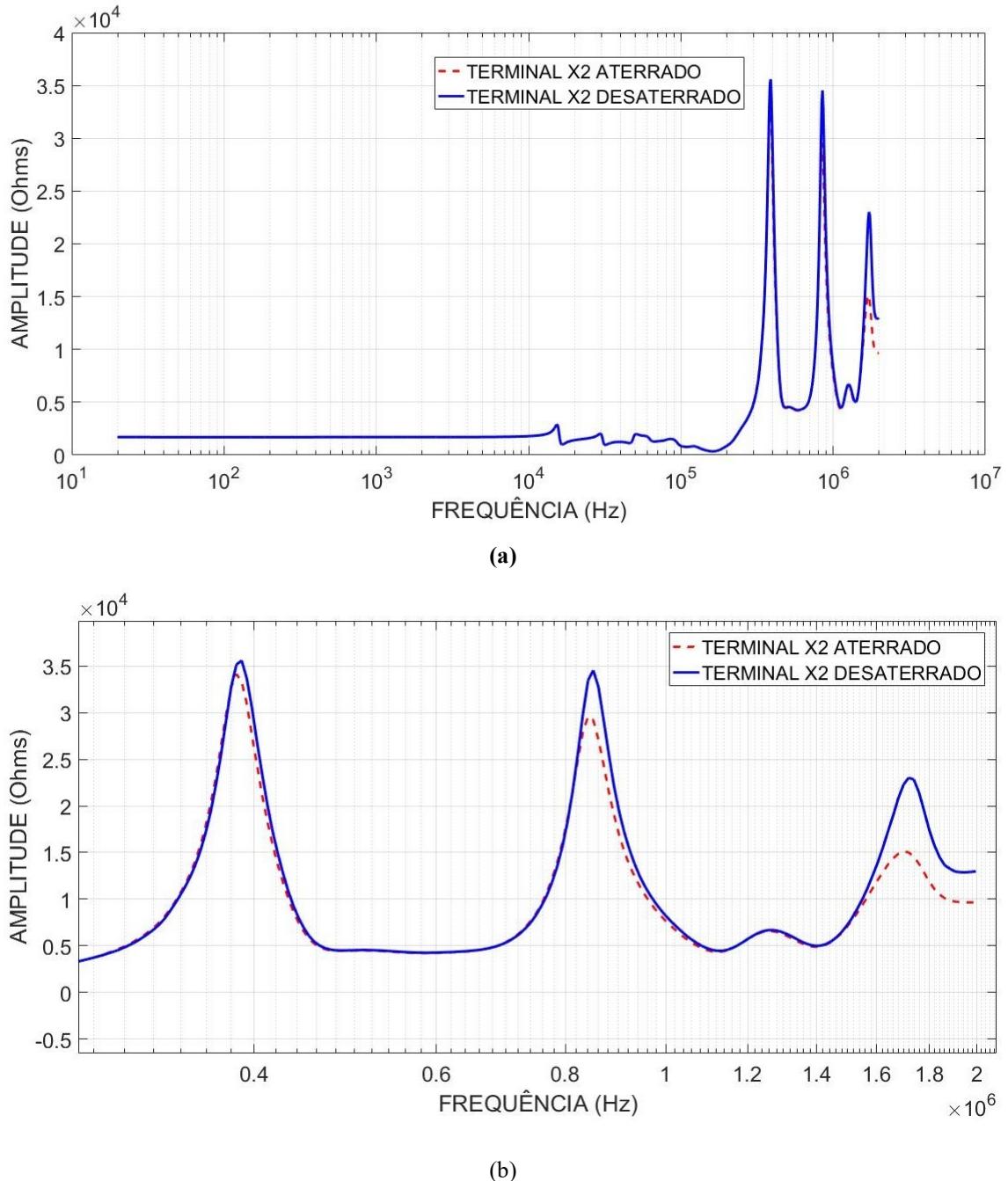


Fonte: Autor.

4.5.1 EFEITOS DO ATERRAMENTO

Os ensaios seguintes são semelhantes ao anterior, porém desta vez a conexão do transformador foi alterada para o terminal “X2” sem estar conectado à terra.

Figura 4.9 - Magnitude da impedância, em Ω , do transformador de potencial 15kV, sob efeito da conexão para terra. a) todo espectro de frequência; b) zoom da variação.

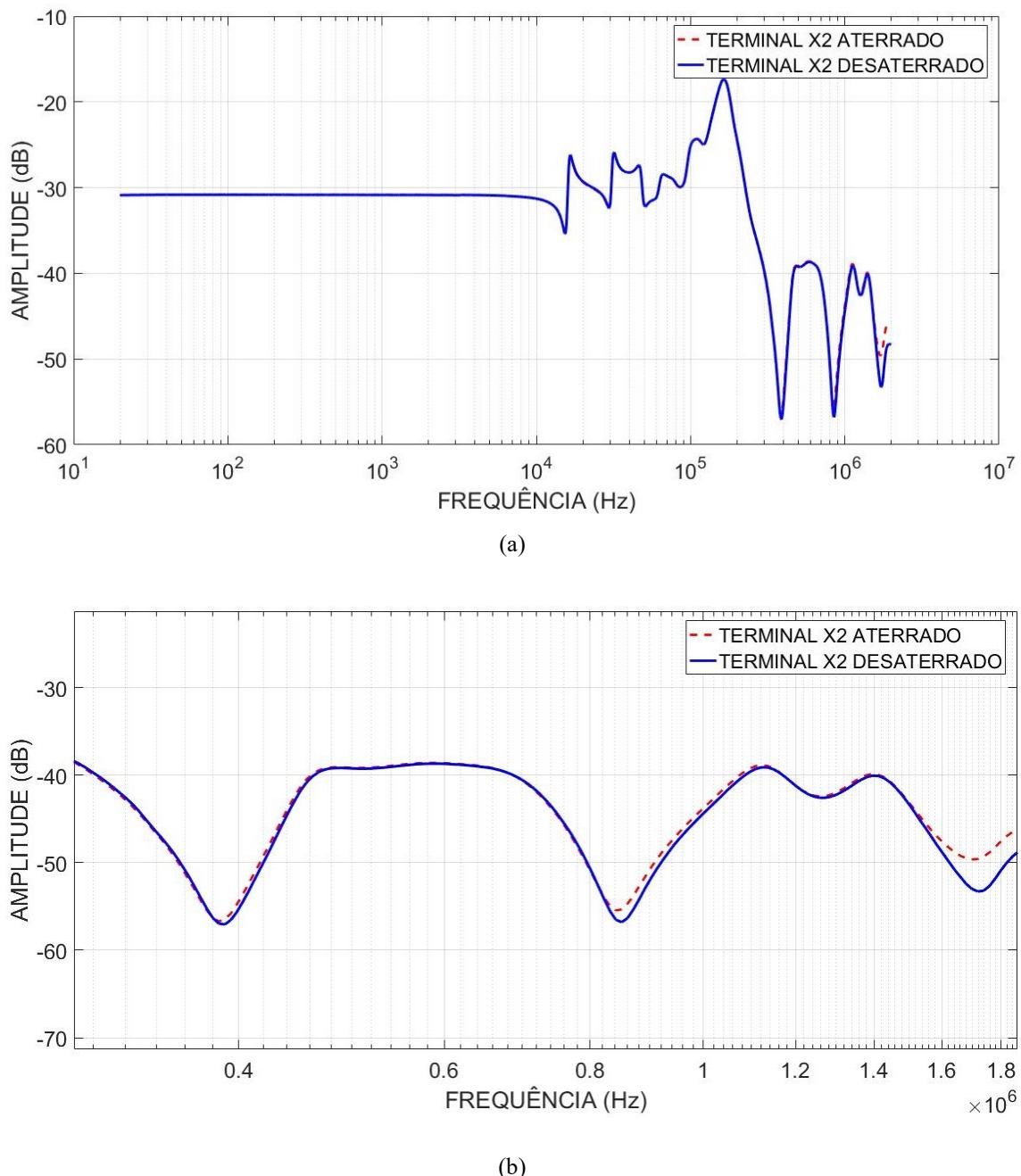


Fonte: Autor.

É possível ver o mesmo comportamento para a resposta em frequência com as modificações do terminal secundário quando comparado com o ensaio anterior. Entretanto, pode-se notar que a partir de 260 kHz existe uma pequena variação do valor da impedância do transformador. Aparece um “offset” entre as duas curvas mencionadas na figura 4.9.

A Figura 4.10 que segue, retrata a comparação das duas curvas de resposta em frequência quando da realização dos dois testes mencionados, porém com um tratamento matemático já mencionado no Capítulo 3 através da Equação 1.

Figura 4.10 - Comparativo da amplitude, em dB, da resposta em frequência do transformador de potencial de 15kV: a) todo o espectro de frequência; b) zoom da variação.



Fonte: Autor.

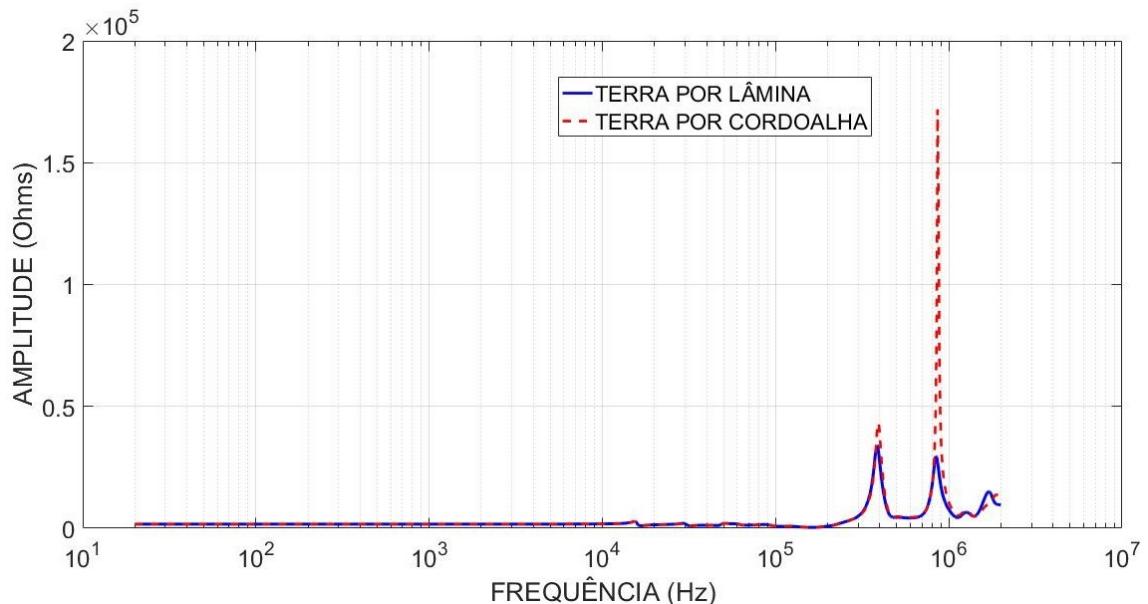
4.5.2 EFEITO DA VARIAÇÃO DA CONEXÃO PARA TERRA

A fim de reforçar a ideia da importância e dos efeitos causados nas medições sob influência do aterramento elétrico do local de ensaio, o próximo ensaio teve como mudança na configuração a ligação para à terra, somente do transformador de potencial, por meio de uma cordoalha de cobre. Nos ensaios anteriores, tanto o transdutor como os outros equipamentos, eram conectados por meio da lâmina feita de cobre.

Na realidade, como o ponto de aterramento dos equipamentos era o mesmo nos ensaios anteriores, a influência em questão não é diretamente relacionada com o aterramento, por completo, do local da instalação, mas sim da conexão do ponto do transformador até a malha de terra. Entretanto, é fato que existe sim influência direta da malha de terra sobre os ensaios.

Assim, com base no primeiro ensaio, pode-se observar na Figura 4.11 que a obtenção da resposta em frequência é similar aos anteriores, porém é notável uma diferença na resposta do transformador de potencial estudado a partir de 250 kHz.

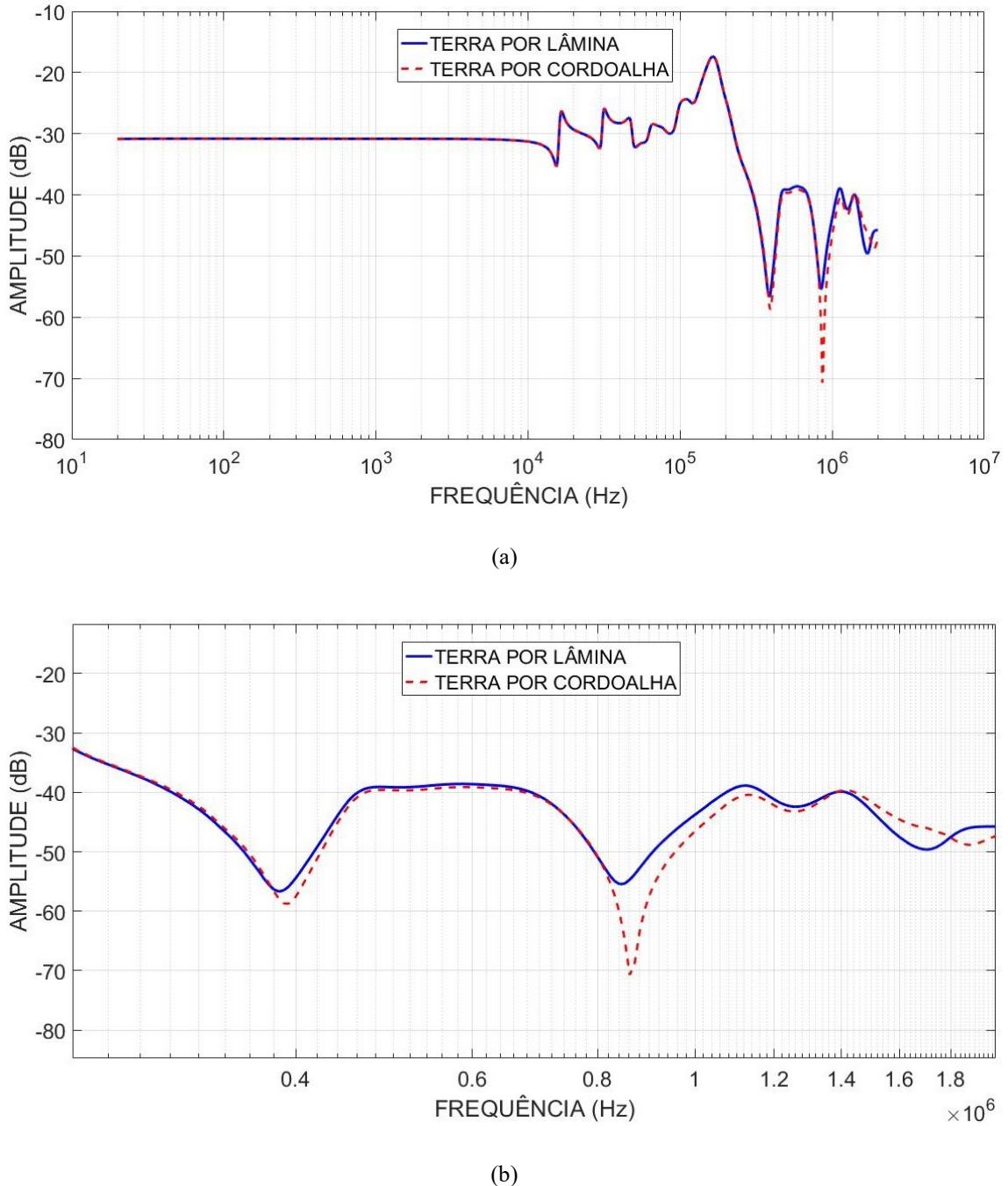
Figura 4.11 - Variação da impedância, em Ω , do transformador de potencial de 15kV, sob troca do condutor de conexão para terra.



Fonte: Autor.

Se tratando de diferença entre as tensões de baixa e alta, é possível notar a não constância entre as respostas nas altas frequências.

Figura 4.12 - Variação da amplitude, em dB, do transformador de potencial de 15kV, sob troca do condutor de conexão para terra: a) todo espectro de frequência; b) zoom da variação.



Fonte: Autor.

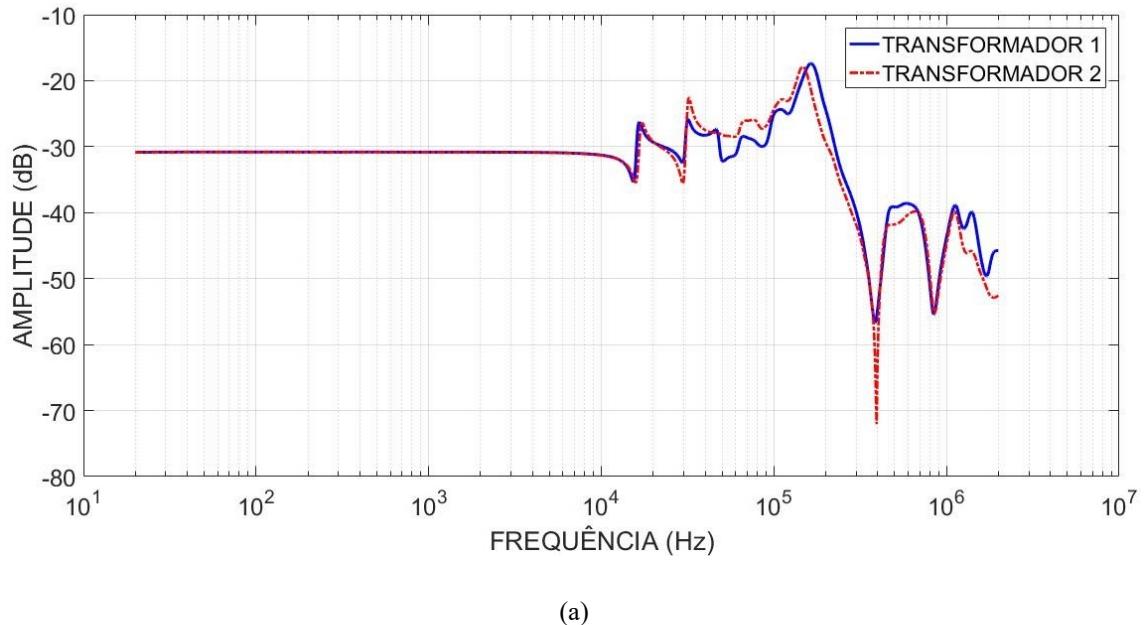
4.6 UNIDADES DE 15 KV IDÊNTICAS E DE RESPOSTA DIVERGENTES

Nos ensaios anteriores é notável algumas peculiaridades impostas pelas condições de realização dos mesmos. A condição de aterramento e conexão são características que influenciam na resposta em frequência do equipamento.

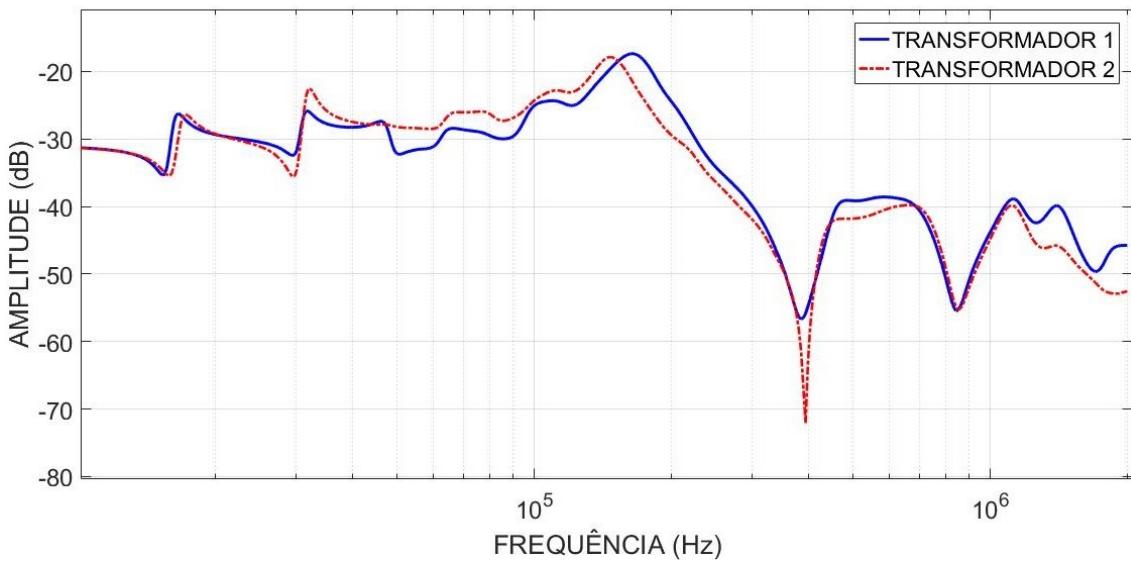
Por conseguinte, a fim de estabelecer uma comparação entre uma ou mais unidades, foi realizado um ensaio similar ao primeiro citado no começo deste capítulo, onde outro transformador de potencial, do mesmo fabricante e com as mesmas especificações de placa apresentou resultado bastante similar ao primeiro transdutor. Porém, a similaridade encontrada entre as respostas é notória somente até certa faixa de frequência.

Na Figura 4.13, a legenda “TRANSFORMADOR 1” e “TRANSFORMADOR 2” é necessária para diferenciar os gráficos. Porém, se trata das duas unidades idênticas de transformação da Balteau.

Figura 4.13 - Diferença de resposta em frequência, em dB, de transformadores de fabricação idêntica. a) todo espectro de frequência; b) zoom da variação.



(a)



(b)

Fonte: Autor

Após os 13 kHz existe uma divergência entre a análise de resposta em frequência do primeiro transformador se comparado com a segunda unidade ensaiada nas mesmas condições. Nota-se um deslocamento entre os picos ressonantes, em função da frequência, assim como alterações nas amplitudes. No entanto, a resposta antes desta frequência se manteve fiel e

inalterada sob o ponto de vista da exatidão das medições e, também, da igualdade entre as respostas.

4.7 TRANSFORMADOR DE 60 kV

Este item segue na direção de ensaiar um transformador de potencial indutivo de 60 kV. Deve-se enfatizar que o mesmo contém quatro TAPS, ou seja: 15 kV, 25 kV, 45 kV, 60 kV.

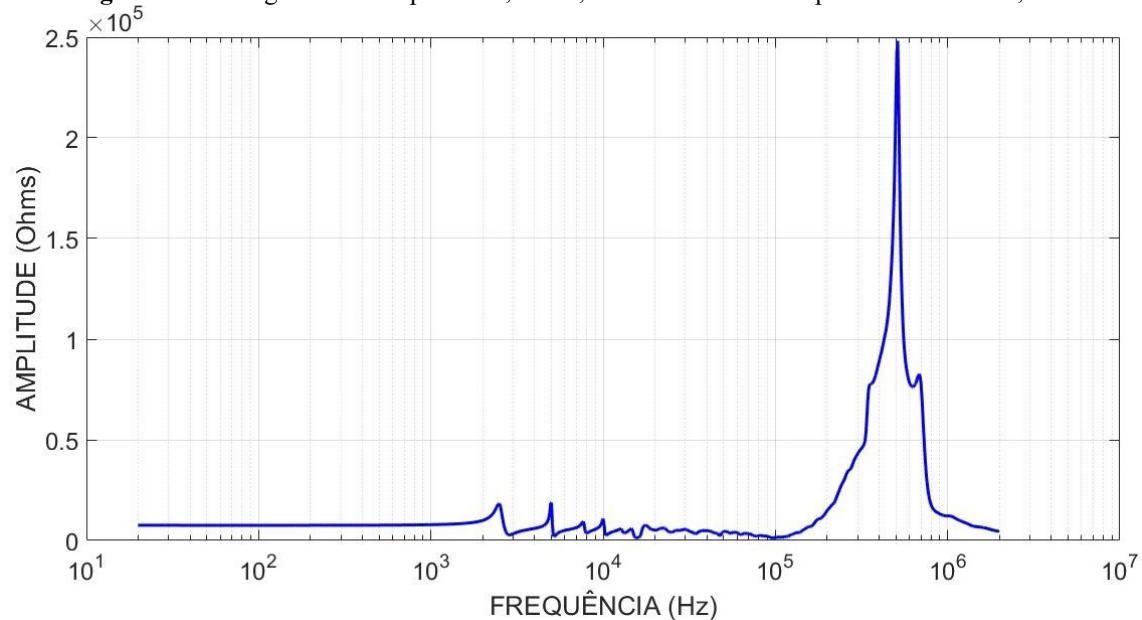
Assim, diante da versatilidade proveniente destes TAPs, vale ressaltar que, é de se esperar que a impedância do equipamento seja diferente para cada classe de tensão avaliada.

Logo, haverá a necessidade de normalizar a resposta em frequência para se comparar duas ou mais curvas do mesmo transdutor e até mesmo com os outros transformadores de potencial já ensaiados e mostrados nos itens anteriores.

4.7.1 TAP DE 15 kV

Analogamente aos ensaios anteriores, obtém-se a impedância do TPI ao longo de toda a faixa de frequência de ensaio para o primeiro TAP, de 15 kV, do transformador de 60 kV. Pode-se constatar algumas diferenças existentes na sua resposta em frequência, com relação aos resultados anteriores na Figura 4.14 que segue.

Figura 4.14 - Magnitude da impedância, em Ω , do transformador de potencial de 60 kV, TAP 15kV.



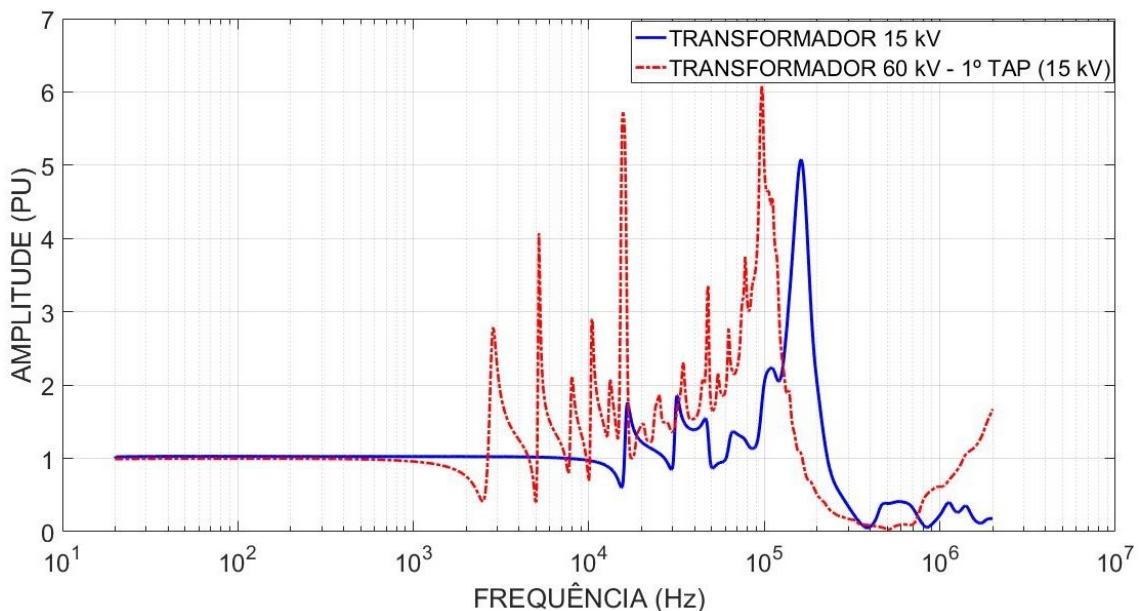
Fonte: Autor.

É interessante notar que, logo após 1 - 2 kHz a resposta em frequência do equipamento começa a ter oscilações provenientes da interação dos parâmetros elétricos que o constitui, formando picos ressonantes ao longo do resultado mostrado na Figura 4.14 .

Vale salientar que, para estes pontos de ressonância gerados logo em “baixas frequências”, existe sim uma preocupação sob o ponto de vista de erros de medição, uma vez que, até os 3 kHz é possível de supervisão e/ou interesse de órgãos normativos além de ocasionar problemas de interpretação que podem gerar custos extremamente onerosos.

Com o enfoque de estabelecer a relação comparativa de duas ou mais unidades dos transformadores de potencial, é possível traçar uma curva similar visando a resposta em frequência normalizada, e em valores em pu.

Figura 4.15 - Comparaçāo normalizada da resposta em frequência, em PU, entre os transformadores de 15kV e 60 kV (no TAP de 15kV).



Fonte: Autor.

A Figura 4.15 supracitada denota as curvas, em pu, das respostas em frequência do primeiro ensaio realizado com o transformador de 15 kV fabricado pela Balteau, em contraste com o sexto ensaio feito, no transformador de potencial com classe de tensão de 60 kV, porém no TAP de 15 kV.

É notório a diferença entre as curvas. Mais ainda, é possível constatar o quanto particular é a resposta em frequência de cada equipamento de medição. Enquanto um consegue retratar de maneira fidedigna a tensão em seu terminal primário até cerca de 13 kHz sem nenhum

desvio/erro perceptível, o outro transformador de potencial apresenta significativa diferença de resposta para frequências maiores que 1 kHz.

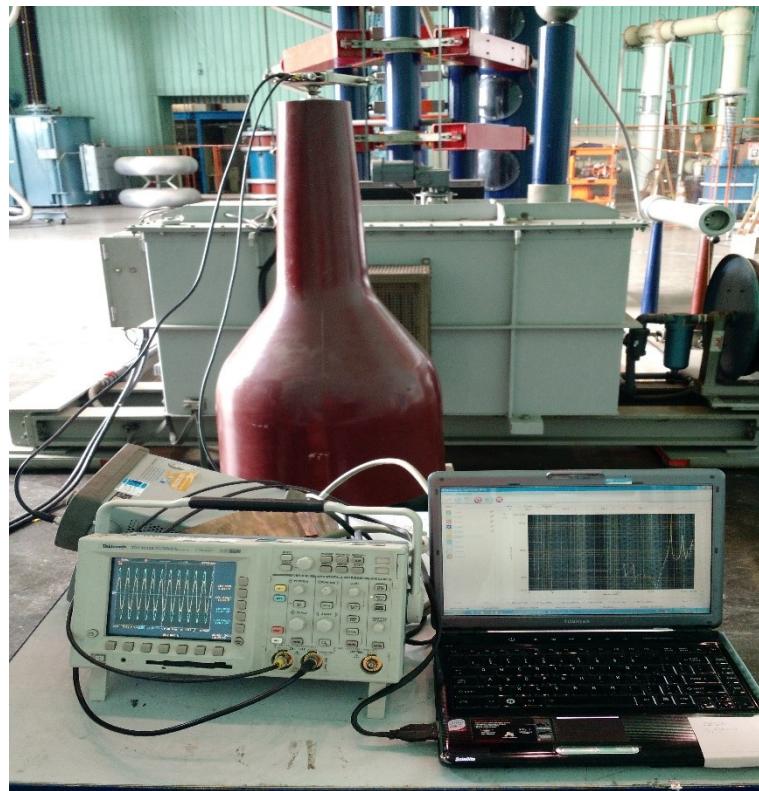
Ademais, o erro instaurado pelo transformador de 60 kV (15 kV) após os 1 kHz pode ser da ordem de 6 vezes o valor real da tensão imposta no seu primário. Fato este que torna o mesmo inviável no aspecto de precisão de valores quando da realização de medições principalmente envolvendo fenômenos harmônicos.

4.7.2 TAP DE 25 kV

Para realização do ensaio no TAP de 25 kV foi necessário a utilização de um amplificador de tensão com ganho em malha fechada de cerca de três vezes a tensão de entrada, acoplado na saída do gerador de sinais. O motivo é previsível, já que a tensão mensurada pelo osciloscópio, no secundário, não seria de magnitude suficiente, ou mesmo confiável, para ser coletada sem que houvesse erros durante a realização do ensaio.

Assim, a tensão aplicada ao terminal primário do transformador é refletida através da relação de transformação do equipamento ao secundário do mesmo. Apesar de necessitar de um amplificador operacional para elevar o nível do sinal, a resposta em frequência do mesmo, via informações do seu datasheet, garante que não há possibilidade de distorção deste sinal em altas frequências, corroborando com a linearidade do teste.

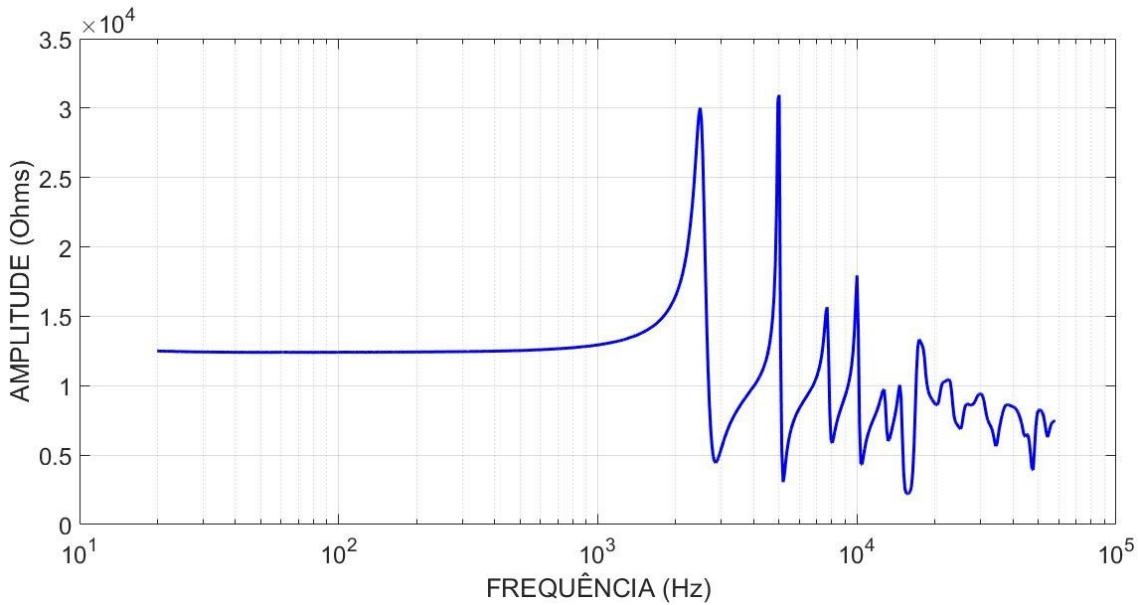
Figura 4.16 - Ensaio de resposta em frequência do TP de 60 kV (25 kV).



Fonte: Autor.

Porém, mesmo com informações positivas acerca desse acoplamento prévio, durante a realização dos ensaios, notou-se que a partir de 60 kHz a resposta em frequência do equipamento gerava bastante ruídos e o osciloscópio começa a entrar na região de saturação. Consequentemente, por questões de limitação técnica, os gráficos apresentados daqui em diante, desde o TAP de 25kV até o de 60 kV apresentam respostas de 20 Hz até cerca de 60 kHz. Nestas condições, a impedância do transformador é mostrada na Figura 4.17.

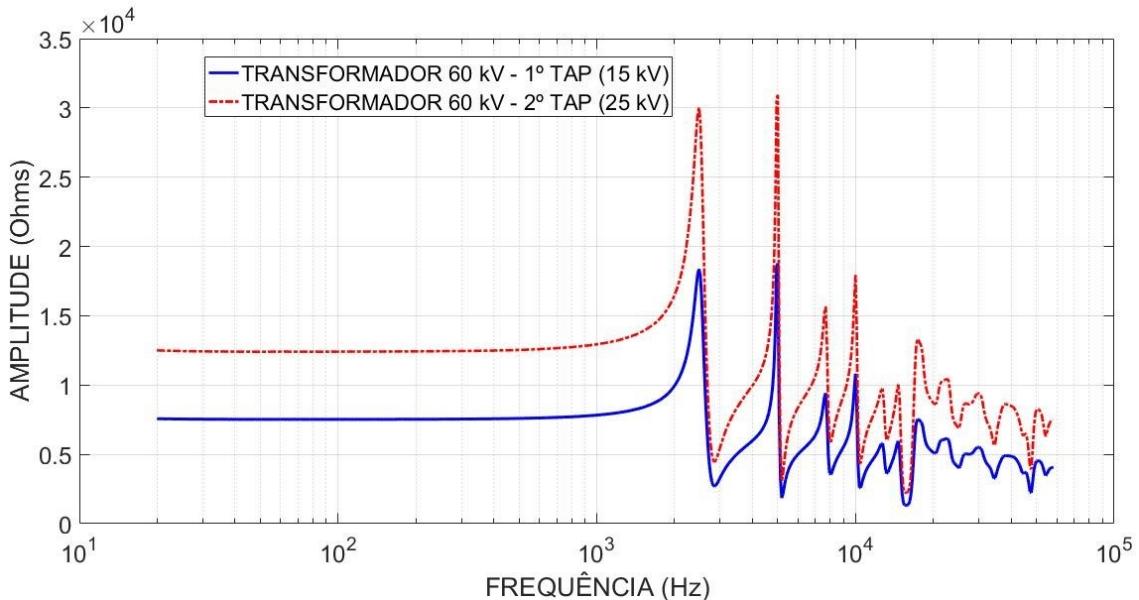
Figura 4.17 - Impedância do transformador de 60 kV, tap de 25 kV.



Fonte: Autor.

Comparativamente à impedância do TAP de 15 kV do mesmo transformador é interessante observar que as magnitudes são diferentes, como já era de se esperar devido a diferença de isolação, bem como no número de espiras.

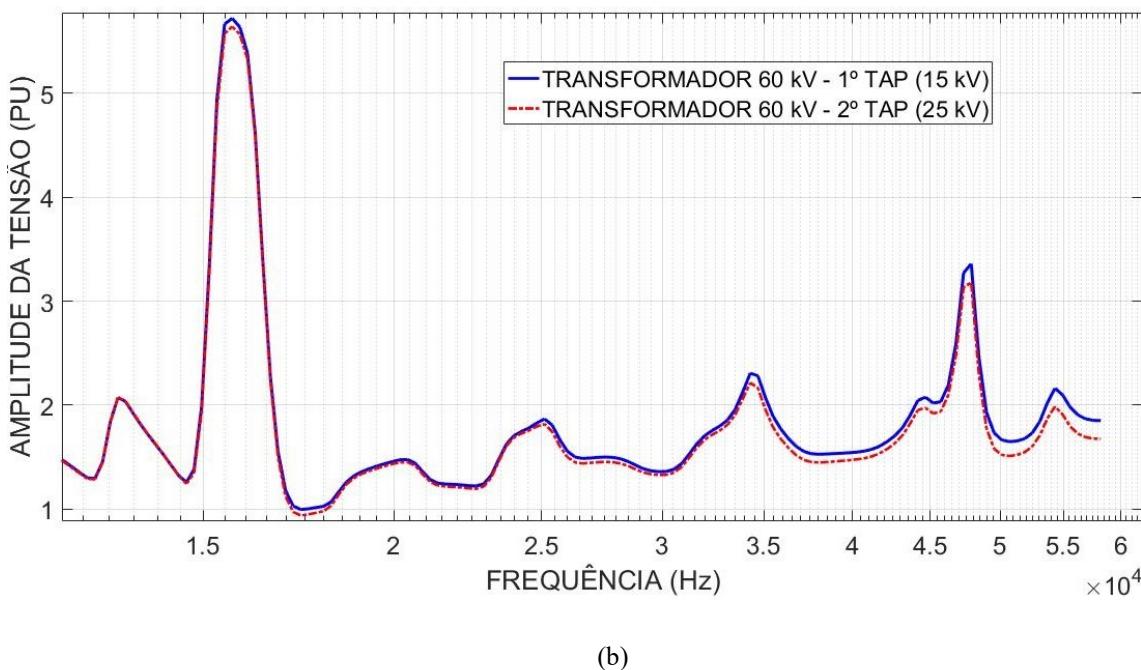
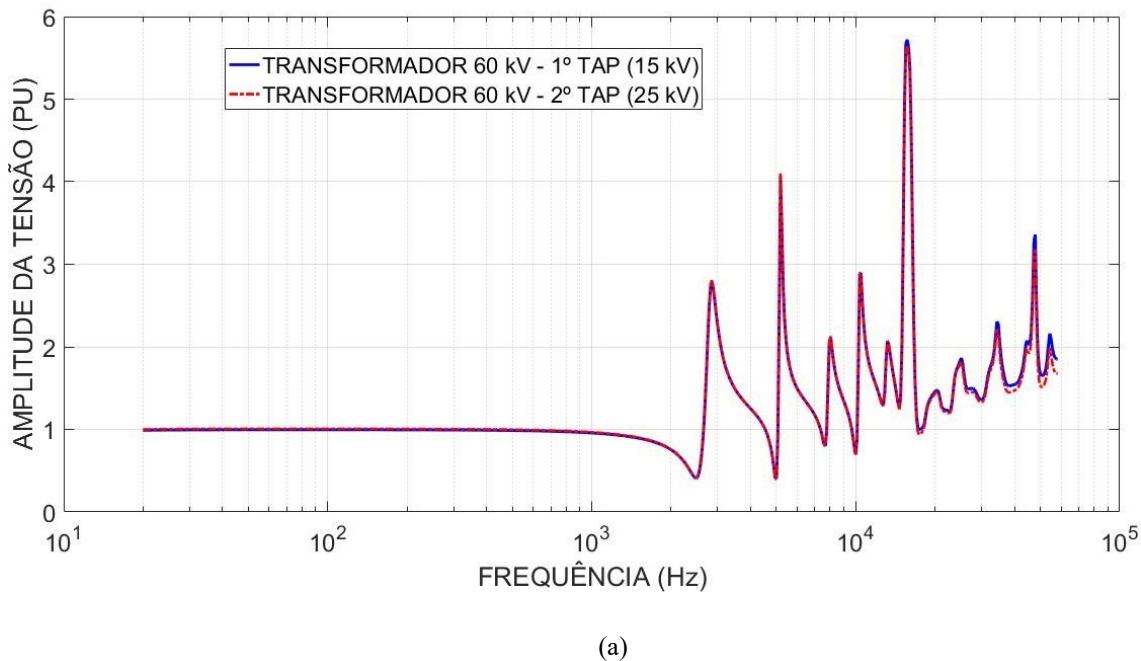
Figura 4.18 - Comparaçāo entre as impedâncias, em Ω , dos TAPs do transformador de potencial de 60 kV.



Fonte: Autor.

Seguindo com as analyses, na Figura 4.19 observa-se a diferença entre as respostas do primeiro TAP, de 15 kV com o de 25 kV no que tange aos aspectos de tensões normalizadas.

Figura 4.19 - Diferença entre as respostas do TAPs de 15 e 25 kV do transformador de potencial de 60 kV. a) todo espectro de frequência; b) zoom da variação.



Fonte: Autor.

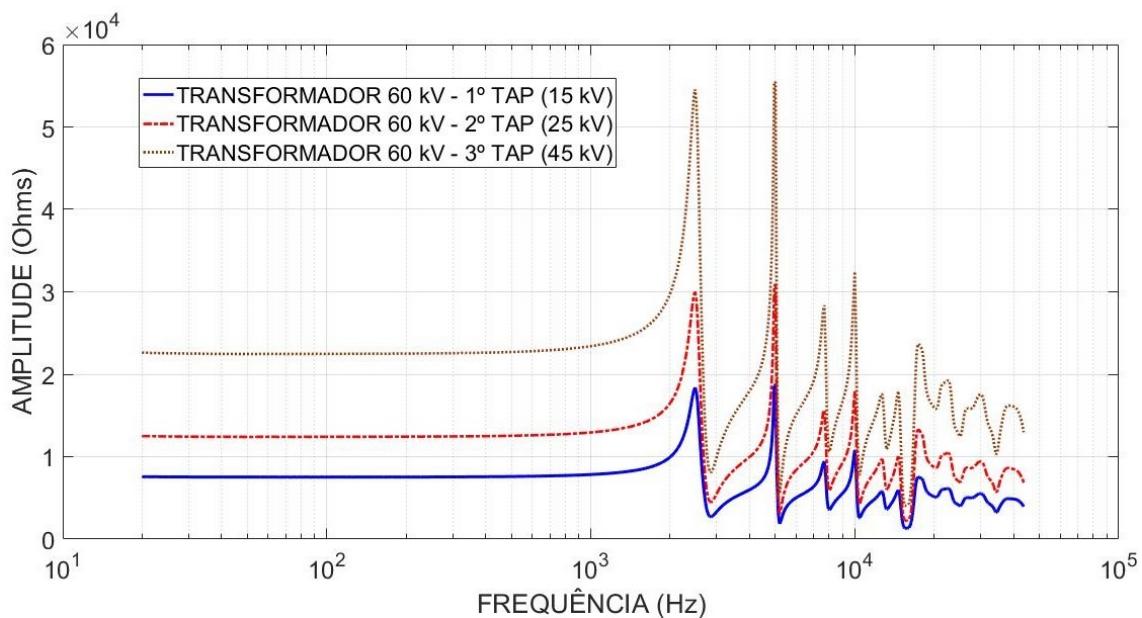
Como se pode notar, as duas respostas estão totalmente alinhadas até, aproximadamente, os 15 kHz. Depois disso, começa haver uma pequena alteração nos resultados.

4.7.3 TAP DE 45 kV

Com a mudança do TAP, agora para 45 kV, a impedância do transformador também foi alterada, visto que a quantidade de espiras para contemplar o nível de isolação deve ser efetivamente maior.

Assim, a partir da Figura 4.20 é possível visualizar os diferentes valores da impedância do transformador em função de cada um dos TAPs analisados anteriormente..

Figura 4.20 - Diferença em a impedância, em Ω , dos TAPs de 15, 25 e 45 kV do transformador de potencial de 60 kV.

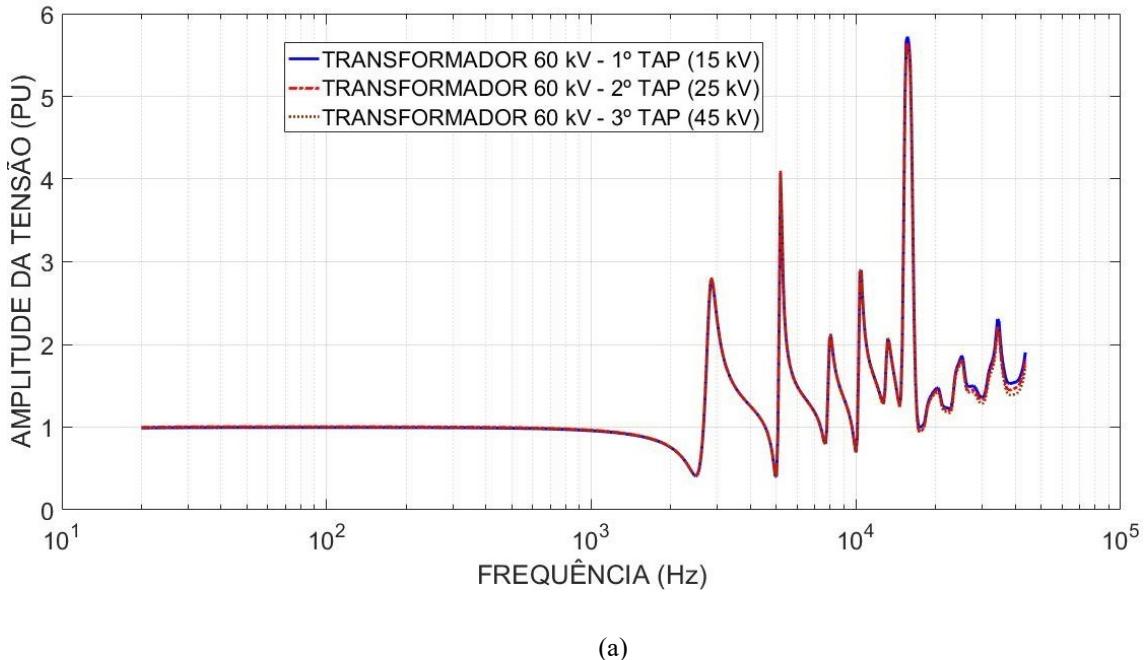


Fonte: Autor.

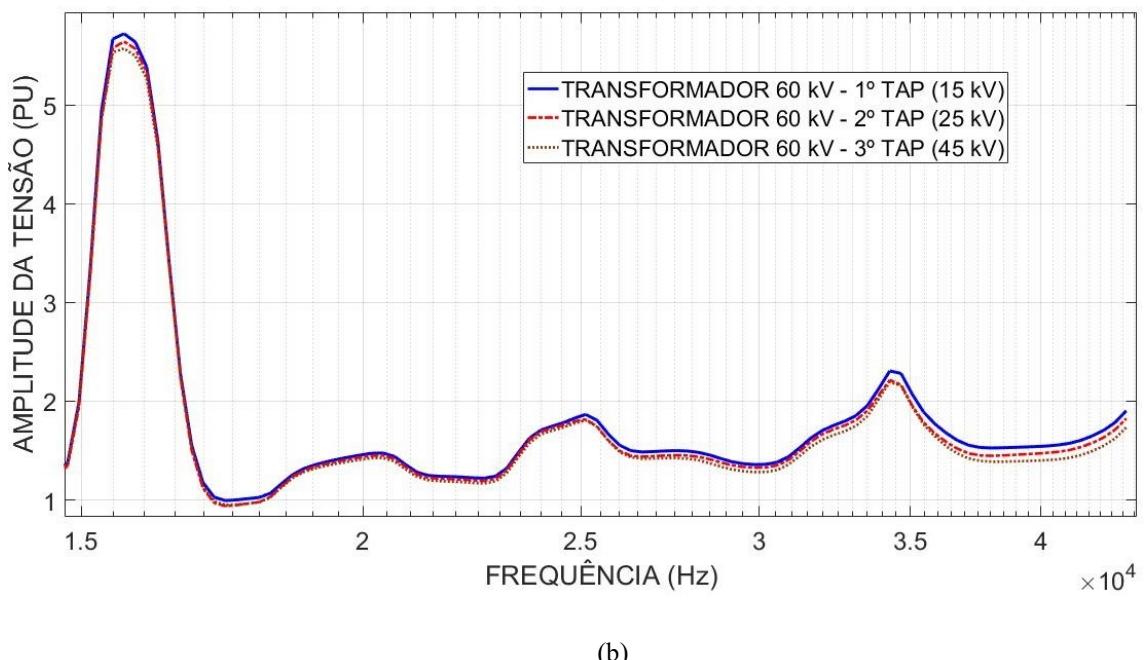
Nota-se que ainda é possível ver uma relação entre as respostas em frequência do equipamento no que diz respeito aos picos de ressonâncias. Ou seja, existe um mesmo comportamento nas mesmas frequências dos ensaios anteriores, porém com amplitudes mais elevadas.

A Figura 4.21 abaixo mostra exatamente a relação bastante próxima, da resposta em frequência dos diferentes TAPs do mesmo transformador.

Figura 4.21 - Diferença entre as respostas do TAPs de 15, 25 e 45 kV do transformador de potencial de 60 kV.
a) todo espectro de frequência; b) zoom da variação.



(a)



(b)

Fonte: Autor.

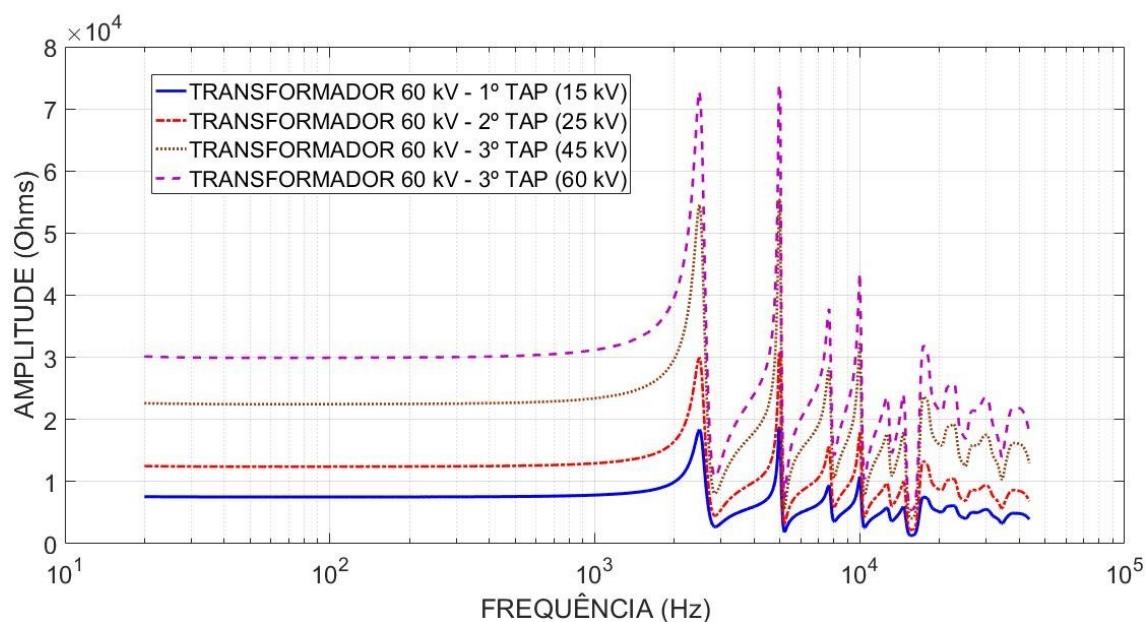
Além disso, reforça-se a ideia de diferença de magnitude de tensão após os 1 – 2 kHz, ocasionando possíveis erros de interpretação em medições, além da diferença entre as respostas dos TAPs do mesmo equipamento depois de 15 kHz.

4.7.4 TAP DE 60 kV

Por fim, o último TAP do transdutor ensaiado é o de tensão de 60 kV. A impedância do mesmo para todo o espectro de frequências permanece com o mesmo comportamento das outras derivações, com exceção de suas magnitudes em função da frequência.

A Figura 4.22 mostra o comportamento da impedância do TAP de 60 kV do transformador.

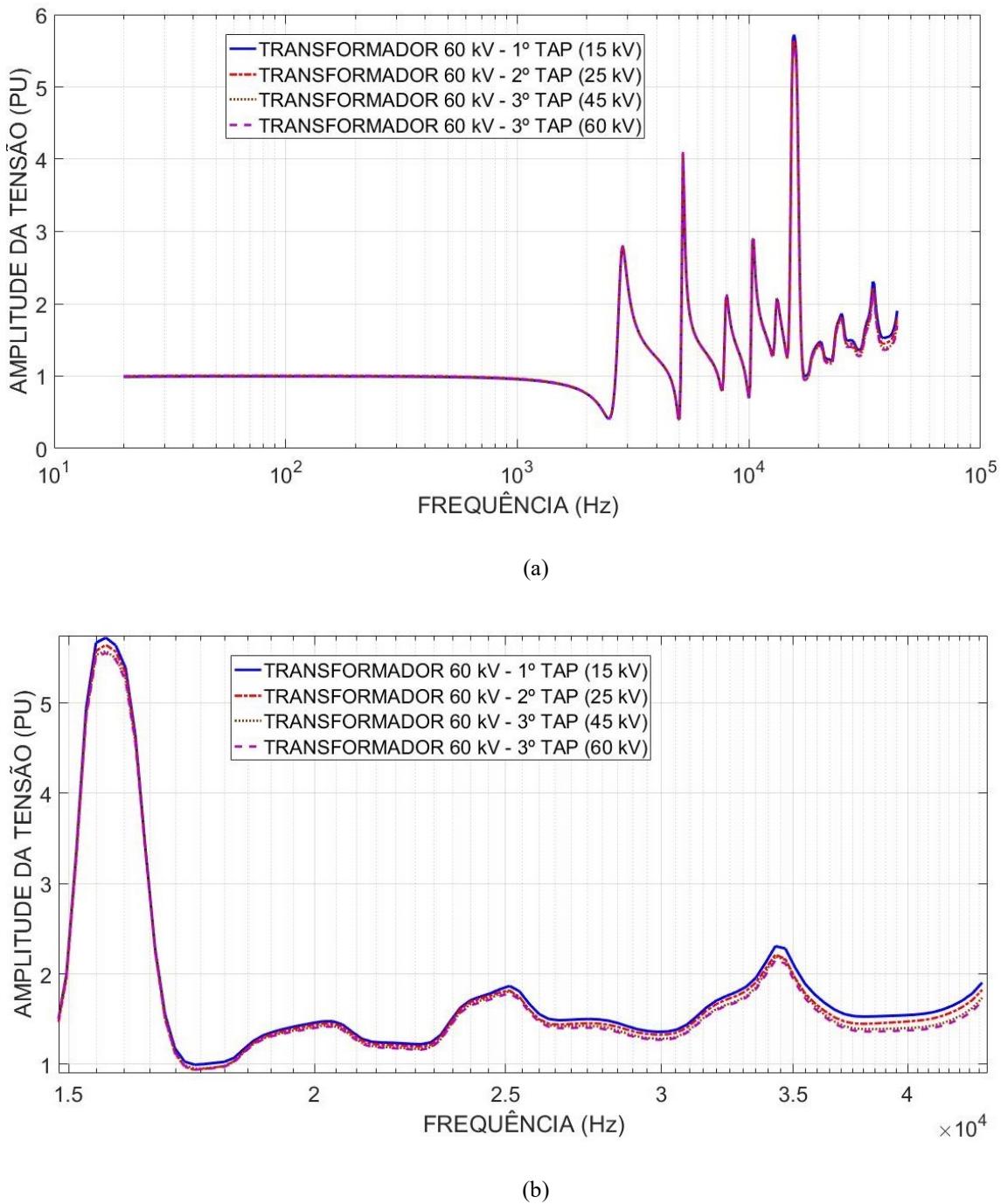
Figura 4.22 - Diferença em a impedância, em Ω , dos TAPs de 15, 25, 45 e 60 kV do transformador de potencial de 60 kV.



Fonte: Autor.

Sob o aspecto das tensões normalizadas, a Figura 4.23 abaixo mostra que mantém-se o padrão já conhecido para este equipamento, especificamente.

Figura 4.23 - Diferença entre as respostas do TAPs de 15, 25, 45 e 60 kV do transformador de potencial de 60 kV. a) todo espectro de frequência; b) zoom da variação.



Fonte: Autor.

4.8 EFEITO SOBRE O ÂNGULO DE FASE

Até então, a abordagem estava redirecionada para a magnitude da resposta dos transdutores em função da frequência de operação. Ou seja, levava-se em conta apenas o percentual do erro de uma medição realizada isoladamente por cada fase do transdutor pela

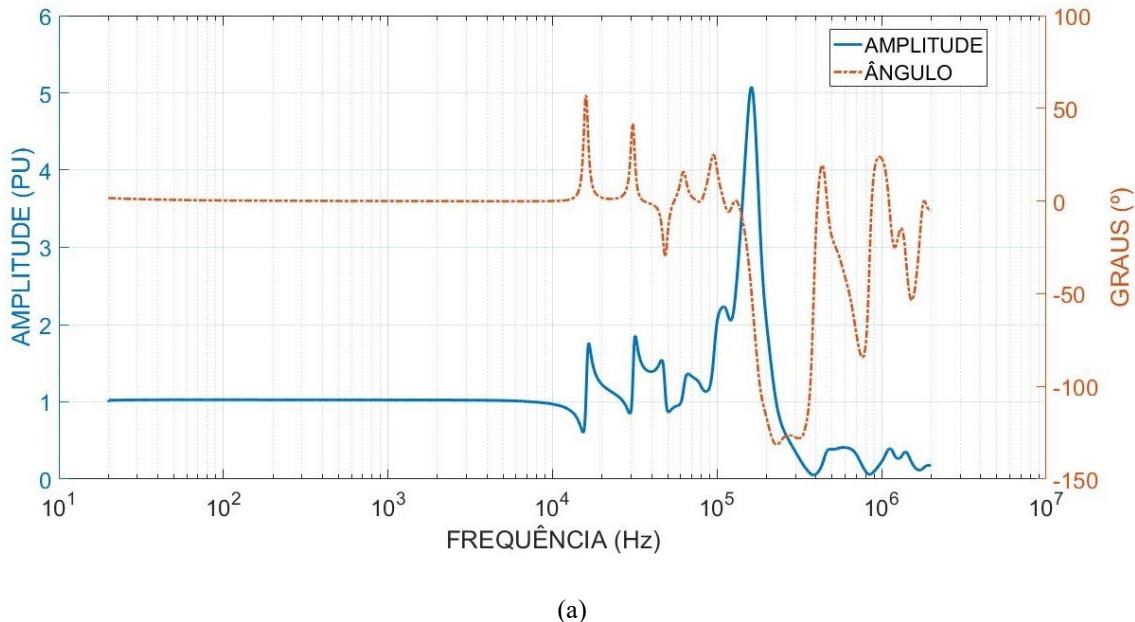
relação de transformação, sem expandir possíveis horizontes relacionados a conexões dos transdutores em medições mais elaboradas, que por ventura levariam a erros desencadeados por efeitos angulares da forma de onda dos componentes harmônicos.

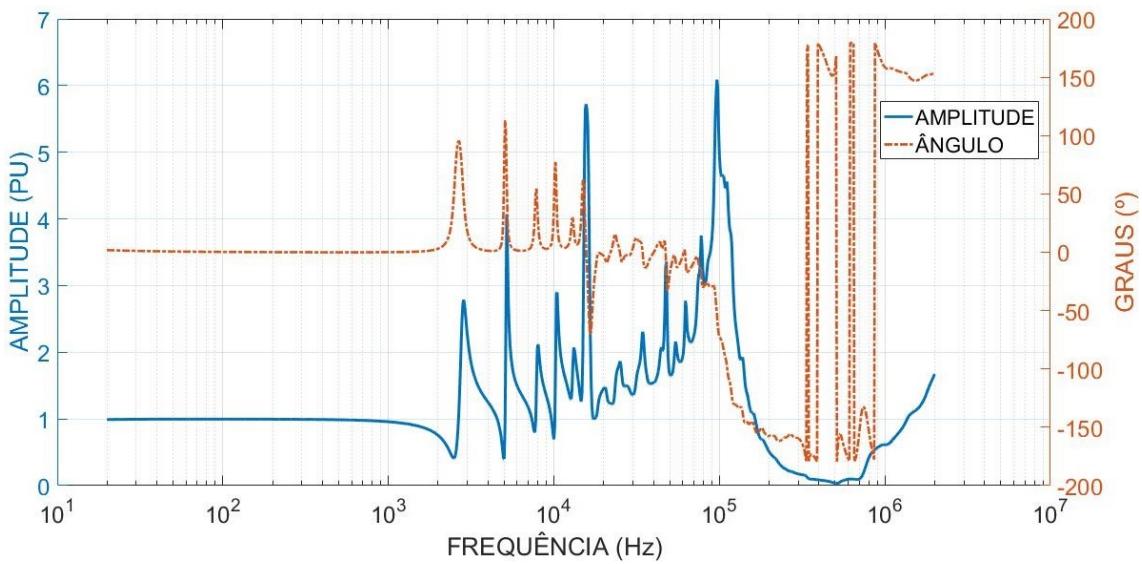
Com isso, é interessante ampliar a análise de resposta em frequência sob os aspectos do ângulo de fase na propagação dos erros inerentes aos transformadores, a fim de, prever o comportamento dos mesmos quando em altas frequências.

Como visto anteriormente, foram utilizados para realização dos testes, 3 transformadores. Para os transdutores de 15 kV, nota-se uma variação da resposta em frequência logo após os 10 kHz. Já o transformador de 60 kV tem uma discrepância da relação de transformação logo depois de 1 kHz, qualquer que seja o TAP ensaiado.

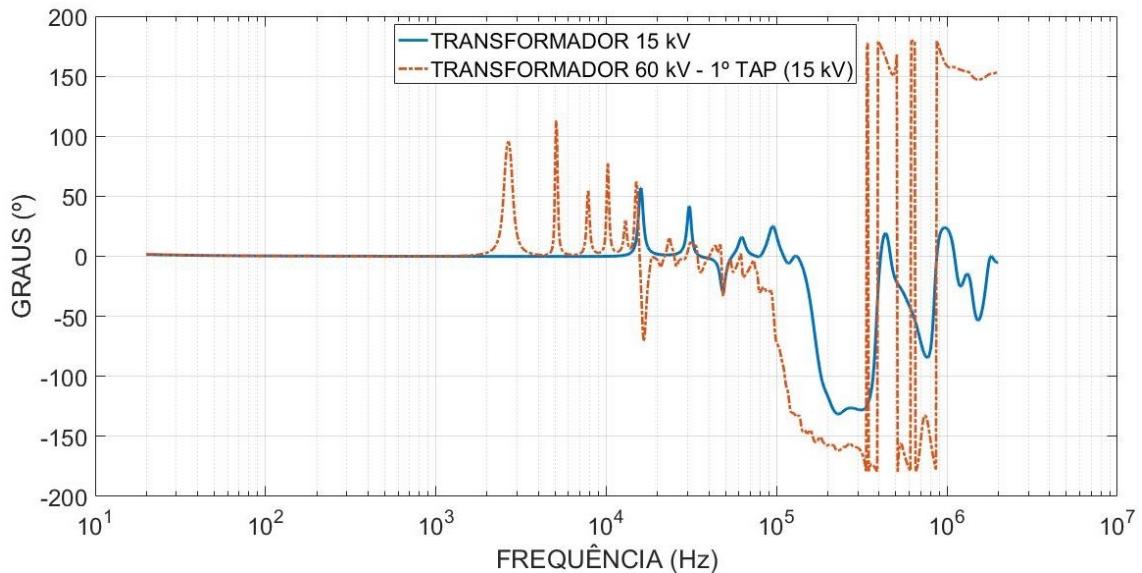
Visualiza-se, nas figuras que seguem, que o comportamento da resposta em frequência relacionada a variação do ângulo de fase do secundário para o primário mantém as mesmas características de oscilação como na resposta de magnitude. A variação inicial dos pontos de ressonância começa no mesmo ponto observado.

Figura 4.24 - a) variação da amplitude e ângulo de fase para o transformador de potencial de 15 kV; b) Variação da amplitude e ângulo de fase para o transformador de 60 kV, TAP 15 kV; c) comparação da variação do ângulo de fase entre os transformadores de 15 e 60 kV.





(b)



(c)

Assim como na amplitude encontrada, para os outros TAPs do transformador ou mesmo na outra unidade de potencial de 15 kV, nota-se algumas divergências entre as respostas com os efeitos já mencionados.

4.9 ERRO DE RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO QUANTIFICADO

Antes mesmo da geração dos gráficos, é necessário tratar os dados exportados pelo software a fim de conseguir plotar as imagens visualizadas ao longo do capítulo.

Intuitivamente, consegue-se observar as divergências da resposta a medida com que a frequência aumenta. Porém, uma avaliação quantitativa é interessante para se possa ter uma noção da quantificação do erro que é agregado na mensuração das frequências harmônicas.

A Tabela 8 apresenta o módulo do erro percentual na transdução da tensão primária para a secundária.

Tabela 8 - Erro percentual da relação de transformação dos transformadores de potencial para as ordens harmônicas

Transformadores da Balteau		Transformador laboratorial	
Ordem	%	Ordem	%
1	0,268%	26	0,242%
2	0,280%	27	0,246%
3	0,267%	28	0,252%
4	0,263%	29	0,248%
5	0,266%	30	0,248%
6	0,266%	31	0,249%
7	0,263%	32	0,248%
8	0,266%	33	0,243%
9	0,262%	34	0,250%
10	0,259%	35	0,244%
11	0,262%	36	0,244%
12	0,251%	37	0,243%
13	0,260%	38	0,241%
14	0,252%	39	0,242%
15	0,255%	40	0,238%
16	0,256%	41	0,239%
17	0,251%	42	0,235%
18	0,247%	43	0,232%
19	0,252%	44	0,230%
20	0,252%	45	0,228%
21	0,249%	46	0,227%
22	0,254%	47	0,226%
23	0,249%	48	0,225%
24	0,252%	49	0,225%
25	0,247%	50	0,224%
		25	10,403%
		50	118,889%

Fonte: Autor.

Lembrando que o erro inerente aos transformadores de 15 kV da Balteau estão agrupados em um único erro percentual, já que o erro das duas unidades é muito próximo para as frequências até os 10 kHz. Além disso, apresenta-se apenas até a 50^o ordem pois é a frequência mais alta de interesse.

4.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O enfoque deste capítulo era de apresentar todos os ensaios realizados nos transformadores de potencial possível e disponíveis no instituto LACTEC, procurando solidificar cada vez mais a ideia de necessidade da realização de ensaios de resposta em frequência em equipamentos de medição, neste caso os de tensão.

Primeiramente levantou-se a curva de resposta de um transdutor de 15 kV, onde os resultados observados foram de grande importância. Até uma frequência em torno de 15 kHz pode-se constatar que não há nenhuma preocupação no que tange a diferença de amplitude de tensão terminal da alta do transformador para com a tensão medida na baixa. Ou seja, a tensão que o equipamento está sujeito durante sua operação nominal, em alta tensão, é a mesma encontrada no secundário do mesmo, a menos da relação de transformação, não havendo erros em medição desde a frequência fundamental até a faixa citada, de 15 kHz.

Dando ênfase na questão relacionada ao aterramento do local de instalação dos equipamentos de medição de tensão e o efeito do mesmo sobre as grandezas mensuradas, efetuou-se um ensaio onde foi possível notar a diferença entre a conexão do transdutor à malha de terra via dois tipos de condutores, uma lâmina de cobre e uma cordoalha, também de cobre. Observa-se um pequeno erro, mesmo que em altas frequência, quando não se leva em consideração, ou se desconhece tal efeito de conexão.

Prosseguindo com as análises, outro transformador de potencial, também de 15 kV e do mesmo fabricante, apresentou um fato curioso nas mesmas condições de ensaio do primeiro, unidade idênticas apresentando respostas em frequência distintas. Este fato foi evidenciado quando em frequências acima dos 15 kHz. O que reforça a teoria de que cada equipamento possui sua própria resposta em frequência, como se fosse sua impressão digital.

No tocante ao transformador de potencial de 60 kV, com diferentes TAPs, visualiza-se a resposta do mesmo com certa insatisfação, do ponto de vista de medições confiáveis. À medida que são expostos os resultados dos diferentes TAPs, pode-se notar que as divergências de tensão mensuradas entre primário e secundário levam a erros na casa de até 6 vezes o valor real. Situação bastante preocupante quando se fala em limites de tensão harmônica, por exemplo. Isto é, a resposta em frequência do equipamento em questão começa a destoar em baixas frequências, por volta de 1,5 kHz.

Assim, caso estivesse sendo usado para mensurar uma tensão acima da vigésima quinta ordem harmônica, por exemplo, os erros seriam evidentes e poderiam comprometer de forma severa uma medição industrial, ou até mesmo o acesso de novas unidades geradoras na rede elétrica. Culminando assim na utilização de equipamentos de correção desses níveis de tensão, como filtros, ativos ou passivos, onerando bastante os gastos para normalização desses distúrbios na rede, sendo que não haveria necessidade de se utilizar essas correções.

CAPÍTULO 5

5. ESTUDO DE CASO

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o propósito de evidenciar os erros associados nas medições de tensões em barramentos que contém distorções harmônicas de tensão, faz-se necessário a realização de ensaios que venham a validar e legitimar as conclusões obtidas no Capítulo 4. Os mesmos podem ser efetuados por meio da elaboração de um circuito prático ou computacional, onde haja a distorção da componente fundamental de tensão.

Entretanto, em virtude de limitações técnicas laboratoriais não foi possível desenvolver uma medição real a ser comparada com uma “medição gabarito”, onde, por exemplo, utilizar-se-ia de um transdutor de potencial com menor erro possível ao longo de um vasto espectro harmônico e uma medição prática com os transdutores ensaiados no Capítulo 4. Outra possibilidade seria gerar harmônicos através de uma fonte programável, elevar essa tensão por meio de um transformador e medir com um dos transformadores de potencial supracitados.

Portanto, para avaliar o efeito da medição equivocada de tensões harmônicas, por parte de transformadores de potencial, fez-se a implementação computacional no software ATPDraw de um sistema simples composto por elementos não-lineares, causando a perturbação da rede e gerando distorções harmônicas característica do equipamento.

Em seguida, deve-se realizar o procedimento de avaliação entre a resposta simulada e experimental, comparando-se a amplitude de tensão obtida no PlotXY do ATPDraw com o erro estabelecido experimentalmente.

Diante dessa avaliação, tem-se uma ponderação mais precisa com relação a extrapolação ou não dos limites estabelecidos em [35,36].

5.2 LIMITES DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

No que tange aos limites estabelecidos para as distorções harmônicas de tensão, há órgãos responsáveis pela regulamentação desse indicador de qualidade da energia elétrica como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que estabelecem os limites de distorções harmônicas admissíveis em função do nível da tensão da rede.

Tal fato fora comentado no Capítulo 1, com intuito de introduzir a existência de limites a serem seguidos/respeitados. Porém, será tratado somente agora com mais cuidado e abrangência, pois, faz-se indispensável para a compreensão dos estudos de caso que serão apresentados.

No âmbito da ANEEL, a regulamentação impõe limites estabelecidos de acordo com Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, vinculado aos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, [35], os quais são mencionados na Tabela 9.

Tabela 9 - Limites de distorções harmônicas segundo a ANEEL.

Indicador	Tensão Nominal		
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT	10%	8,0%	5,0%
DTT _P	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _I	7,5%	6,0%	4,0%
DTT ₃	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: Adaptado de [35].

Onde:

V_n : tensão nominal;

DTT: distorção total de tensão, contemplando todas as ordens;

DTT_P: distorção harmônica que contempla as ordens pares, não múltiplas de 3;

DTT_I: distorção harmônica que contempla as ordens ímpares, não múltiplas de 3;

DTT₃: distorção harmônica que contempla as ordens múltiplas de 3.

Esses limites correspondem ao valor desejado para a operação dos sistemas de distribuição e não fazem menção à ordem máxima de interesse para o cálculo da distorção harmônica total. Porém, é fator delimitado pela classe dos analisadores de qualidade de energia elétrica, ou seja: classe A ou S.

Por outro lado, os acessantes da Rede Básica devem seguir as recomendações estabelecidas pelos Procedimentos de Rede, mais precisamente no Submódulo 2.8 – Gerenciamento dos Indicadores de Desempenho da Rede Básica e de Seus Componentes, [36].

Neste submódulo, encontram-se dois limites de referência distintos para a DTT relacionados à Qualidade da Energia Elétrica. Um deles refere-se aos limites globais para as distorções e o segundo estão vinculados com os limites individuais.

Os limites globais, são obtidos através de campanhas de medição organizadas sob a responsabilidade do ONS e tem duração de 7 dias consecutivos. Em alguns casos, devido a dinâmica do sistema ou mesmo em função das análises técnicas que demanda dados especificados, pode-se adotar a medição por um prazo superior ou contínuo. Já os limites individuais são determinados por meio de cálculos específicos para cada instalação que contenha equipamentos com características não lineares, [36].

A Tabela 10 a seguir, representa os limites globais inferiores de referência. Para obtenção do limite superior, multiplica-se DTT por 4/3.

Tabela 10 - Limites de distorções harmônicas globais, segundo o ONS.

$V_n < 69 \text{ kV}$		$V_n > 69 \text{ kV}$	
DTT _I	DTT _P	DTT _I	DTT _P
Ordem	Valor	Ordem	Valor
3, 5, 7	5%	2, 4, 6	2%
9, 11, 13	3%		
15 a 25	2%	≥ 8	1%
≥ 27	1%		
DTT = 6%		DTT = 3%	

Fonte: Adaptado de [36].

A Tabela 11 a seguir, representa os limites individuais dos indicadores.

Tabela 11 - Limites de distorções harmônicas individuais, segundo ONS.

$13,8 \text{ kV} \leq V_n < 69 \text{ kV}$		$V_n > 69 \text{ kV}$	
DTT _I	DTT _P	DTT _I	DTT _P
Ordem	Valor	Ordem	Valor
3 a 25	1,5%	Todas	0,6%
≥ 27	0,7%		
DTT = 3%		DTT = 1,5%	

Fonte: Adaptado de [36].

Em resumo, nota-se a preocupação de ambos os órgãos com relação as distorções harmônicas de tensão, seja em diferentes níveis de tensão para as redes de distribuição de energia ou no âmbito da rede básica.

Sendo assim, diante dos baixos limites aceitáveis para as distorções da forma de onda fundamental, o levantamento da curva de resposta em frequência dos transdutores de potencial torna-se extremamente válido e justifica uma aplicação prática. Uma vez que os erros inerentes aos equipamentos podem mascarar a real situação do sistema, não levando a preocupação por parte dos órgãos regulamentadores ou dos usuários do sistema elétrico.

5.3 ESTUDOS DE CASO

Diante das dificuldades impostas de se estabelecer um estudo e uma análise de casos reais por meio de uma realização de medições, obtidas diretamente de um sistema elétrico de potência, optou-se por desenvolver duas simulações computacionais envolvendo dois sistemas elétricos com características não lineares. O primeiro sistema compõe uma planta industrial real e o segundo sistema foi idealizado para demonstrar o fenômeno da ressonância paralela. A ferramenta auxiliar computacional utilizada foi o ATPDraw.

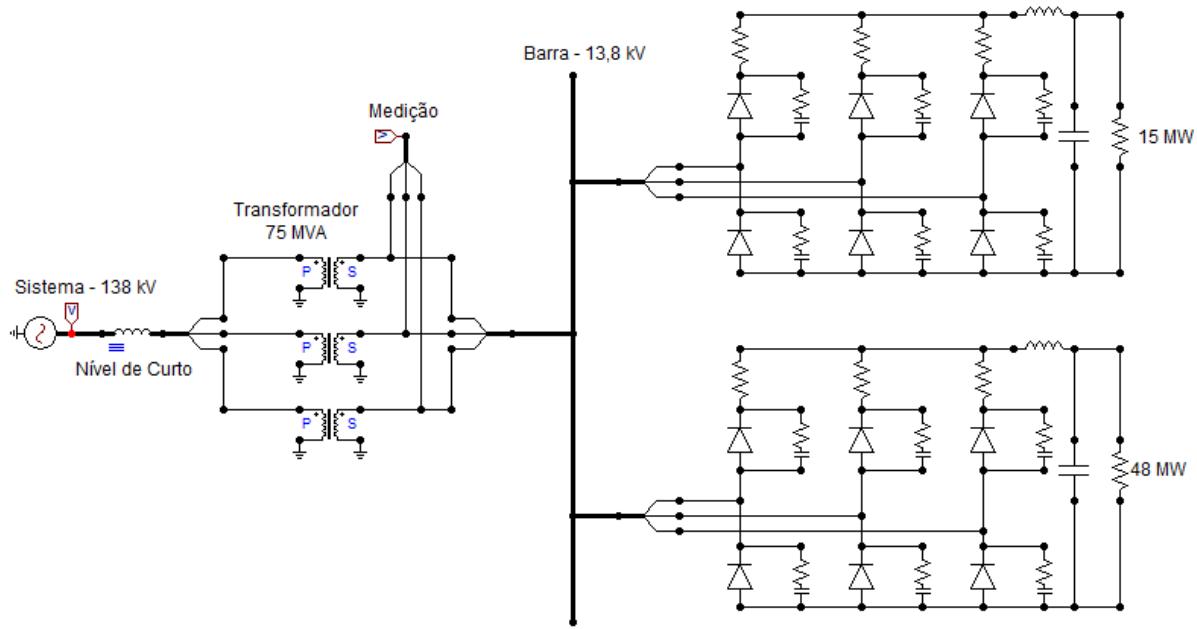
5.4 SISTEMA 1, CASO 1

No primeiro estudo de caso é considerado um sistema elétrico industrial advindo de [38] que contém elementos não lineares capazes de gerar perturbações no sistema a ponto de comprometer bastante o nível de distorção harmônica na barra onde o mesmo está alocado.

O circuito referenciado trata-se de um laminador. Equipamento este, bastante utilizado em siderúrgicas para trabalhar as espeças placa de aço até torna-las finas lâminas.

A título de ilustração a figura 5.1, mostra o diagrama do circuito elétrico utilizado para a realização das simulações computacionais.

Figura 5.1 - Diagrama do circuito utilizado para a simulação dos estudo de caso 1.



Fonte: Adaptado de [38].

5.4.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

Na Figura 5.1 do sistema, nota-se a presença de dois retificadores trifásicos não-controlados que fazem o papel da carga de característica não linear. O transformador de potência contempla a equalização entre a tensão de entrada do sistema, de 138 kV, e a tensão de alimentação dos retificadores, de 13,8 kV. Complementarmente, o nível de curto-circuito também desenvolve papel importante para a análise do sistema.

Os retificadores ilustrados são comumente conhecidos como retificadores de seis pulsos e no topo tange a geração das componentes harmônicas de corrente, injetam no sistema elétrico correntes com perfil de frequências regidas pela equação seguinte.

$$i_{g(h)} = 6h \pm 1 \quad (19)$$

No secundário do transformador, como observado da Figura 5.1, nota-se um ponto denotado como “Medição”. Esse ponto faz menção à um transformador de potencial que afere a tensão resultante da operação dos retificadores sem nenhum erro inerente ao processo de transdução. Ou seja, isso mostra que os valores encontrados nesta medição são os valores próximos à uma medição real, gerando uma medição “referência”, que será comparada com os erros de uma medição realizada experimentalmente, caso fosse realizada com o transformador de potencial de 60 kV, no TAP de 15 kV, do Capítulo 4.

Enfatiza-se que, não há necessidade de se levar em consideração nesse estudo de caso os outros transformadores, visto que os mesmos possuem uma resposta em frequência bem linear até altas frequências – por volta de 10 kHz.

A Tabela 12 indica os valores numéricos dos elementos utilizados no circuito da figura 5.1.

Tabela 12 - Dados dos elementos do circuito da Figura 5.1.

Equipamentos	
Transformador (Y/Y)	
Potência	75 MVA
Tensão primária	138 kV
Tensão secundária	13,8 kV
Impedância	10 %
Resistência	1 %
Retificador 1	
Potência	15 MW
Retificador 2	
Potência	48 MW
Nível de Curto	
S_{CC}	5000 MVA

Fonte: Adaptado de [38].

5.4.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Realizada a simulação computacional do circuito mencionado, tem-se os seguintes resultados relacionados a tensão no lado de baixa do transformador, levando-se em consideração todas as harmônicas encontradas.

Salienta-se que os valores assinalados em tom de vermelho, para todas as tabelas que seguem, visam enfatizar a transgressão dos valores estipulados pelo ONS e ANEEL.

Tabela 13 - Tensões encontradas pós simulação do sistema 1.

Tensões na barra de 13,8 kV					
Ordem	Amplitude (V)	Ordem	Amplitude (V)	Ordem	Amplitude (V)
0	21,69	17	161,99	34	4,9535
1	7740,5	18	9,8793	35	87,429
2	9,1336	19	153,87	36	11,383
3	2,4948	20	5,4995	37	90,97
4	2,8007	21	3,6957	38	6,3149
5	623,9	22	5,5242	39	3,9876
6	13,303	23	147,38	40	5,4176
7	548,71	24	12,333	41	78,19
8	6,8296	25	141,67	42	11,352
9	4,6358	26	6,4067	43	74,852
10	6,9363	27	3,9848	44	5,8899
11	355,78	28	5,3784	45	3,6138
12	13,103	29	105,59	46	4,8213
13	272,35	30	10,614	47	62,093
14	6,0894	31	96,985	48	10,78
15	3,6974	32	5,5206	49	65,187
16	4,9309	33	3,5153	50	6,0932
DTT			13,181%		

Fonte: Autor.

É importante ressaltar que as tensões encontradas nas tabelas são as tensões de fase para terra e referidas ao lado de 13,8 kV do circuito, como se fosse a tensão que o transformador estivesse verificando. Caso necessário, basta transferi-la utilizando a relação de transformação do transdutor. Entretanto, ao final deste presente capítulo realiza-se esse procedimento com intuito de deixar mais claro a amplitude de tensão verificada no lado de baixa do transformador

5.4.3 ANÁLISE DAS DISTORÇÕES FRENTE ÀS RECOMENDAÇÕES DA ANEEL E ONS.

Com base na normatização imposta por [35], nota-se que a transgressão dos limites de distorção total de tensão foram ultrapassados. Para o nível de tensão de operação do sistema, de 13,8 kV, tem-se como limite recomendado um DTT = 8%. Logo constata-se que o valor encontrado na simulação, de DTT = 13,181%, está bem além do estipulado.

Especificamente, a seguir, estende-se o mesmo raciocínio para a estratificação das ordens – pares, ímpares ou múltiplas de três. Assim, tem-se:

Tabela 14 - Tensões harmônicas de ordem par, não múltiplas de três.
Tensões na barra de 13,8 kV

Ordem	Amplitude (V)	Ordem	Amplitude (V)
0	21,69	26	6,4067
2	9,1336	28	5,3784
4	2,8007	32	5,5206
8	6,8296	34	4,9535
10	6,9363	38	6,3149
14	6,0894	40	5,4176
16	4,9309	44	5,8899
20	5,4995	46	4,8213
22	5,5242	50	6,0932
DTT_P		0,316%	

Fonte: Autor.

Nesta situação, na Tabela 14, nota-se que os limites para a distorção total de tensão para as harmônicas de ordens pares não ultrapassaram os limites recomendados. Pelo contrário, ficaram bem aquém dos valores da Tabela 9.

Em contrapartida, na Tabela 15, levando-se em conta a próxima distorção total de tensão, as de ordens ímpares, observa-se que além de extrapolar os valores estabelecidos pela normatização, nota-se que as ordens harmônicas ímpares representam uma parcela significativa da distorção de tensão, sendo equivalente a quase toda distorção total.

Tabela 15 - Tensões harmônicas de ordem ímpar.

Tensões na barra de 13,8 kV			
Ordem	Amplitude (V)	Ordem	Amplitude (V)
3	2,4948	27	3,9848
5	623,9	29	105,59
7	548,71	31	96,985
9	4,6358	33	3,5153
11	355,78	35	87,429
13	272,35	37	90,97
15	3,6974	39	3,9876
17	161,99	41	78,19
19	153,87	43	74,852
21	3,6957	45	3,6138
23	147,38	47	62,093
25	141,67	49	65,187
DTT_I		13,17%	

Fonte: Autor.

Por fim, na Tabela 16, a distorção harmônica de tensão que engloba as parcelas múltiplas de ordem 3 também tem sua influência, mesmo que não significativa, na concepção da distorção total de tensão.

Tabela 16 - Tensões harmônicas multiplas de três.

Tensão na barra 13,8 kV

Ordem	Amplitude (V)	Ordem	Amplitude (V)
3	2,4948	27	3,9848
6	13,303	30	10,614
9	4,6358	33	3,5153
12	13,103	36	11,383
15	3,6974	39	3,9876
18	9,8793	42	11,352
21	3,6957	45	3,6138
24	12,333	48	10,78
DTT₃		0,45%	

Fonte: Autor.

Na Tabela 17, com base nos valores regulamentados por [36] tem-se a mesma análise ilustrada anteriormente. Entretanto, além dos limites de distorção total de tensão, como foradito, as restrições impostas pelo Submódulo 2.8 levam em consideração uma observação mais pontual para as ordens harmônicas impares e pares, subdividindo-as em diversas faixas.

Tabela 17 - Resumo das tensões encontradas na simulação do sistema 1 sob o aspecto dos limites globais e individuais de [36].

Tensão na barra de 13,8 kV									
ONS									
Limites Globais					Limites Individuais				
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares			
Ordem	Amplitude	Ordem	Amplitude	Ordem	Amplitude	Ordem	Amplitude	Ordem	Amplitude
3	0,0032%	2	0,118%	3	0,0032%	2	0,118%		
5	8,060%	4	0,036%	5	8,060%	4	0,036%		
7	7,089%	6	0,172%	7	7,089%	6	0,172%		
9	0,0599%	8	0,088%	9	0,0599%	8	0,088%		
11	4,5963%	10	0,090%	11	4,5963%	10	0,090%		
13	3,5185%	12	0,169%	13	3,5185%	12	0,169%		
15	0,0478%	14	0,079%	15	0,0478%	14	0,079%		
17	2,0928%	16	0,064%	17	2,0928%	16	0,064%		
19	1,9879%	18	0,128%	19	1,9879%	18	0,128%		
21	0,0477%	20	0,071%	21	0,0477%	20	0,071%		
23	1,9040%	22	0,071%	23	1,9040%	22	0,071%		
25	1,8302%	24	0,159%	25	1,8302%	24	0,159%		
27	0,0515%	26	0,083%	27	0,0515%	26	0,083%		
29	1,3641%	28	0,069%	29	1,3641%	28	0,069%		
31	1,2530%	30	0,137%	31	1,2530%	30	0,137%		
33	0,0454%	32	0,071%	33	0,0454%	32	0,071%		
35	1,1295%	34	0,064%	35	1,1295%	34	0,064%		
37	1,1752%	36	0,147%	37	1,1752%	36	0,147%		
39	0,0515%	38	0,081%	39	0,0515%	38	0,081%		
41	1,0101%	40	0,070%	41	1,0101%	40	0,070%		
43	0,9670%	42	0,147%	43	0,9670%	42	0,147%		
45	0,0467%	44	0,076%	45	0,0467%	44	0,076%		
47	0,8022%	46	0,062%	47	0,8022%	46	0,062%		
49	0,8422%	48	0,139%	49	0,8422%	48	0,139%		
		50	0,079%			50	0,079%		
DTT%		13,181%		DTT%		13,181%			

Fonte: Autor.

Tomando-se como base as Tabelas 9 e 10, com os valores padronizados de distorção harmônica para limites globais e individuais, tem-se a violação dos valores permitidos/recomendados, em ambos os casos, para as ordens impares e distorção total. Somente as ordens pares que estão dentro do limite permitido.

Além disso, observa-se na Tabela 17 que os valores que infringem as recomendações estão assinalados em vermelho para melhor visualização da violação dos limites. Caso essa medição representasse uma avaliação real de um barramento da rede, haveria necessidade de implantação de filtros para a mitigação destas distorções para que os níveis voltassem aos valores adequados, ou pelo menos abaixo do limite.

5.4.4 INSERÇÃO DO ERRO DE MEDAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE POTENCIAL DE 60 KV, TAP DE 15 KV

Uma vez que estes valores supracitados correspondem a medição referência, é interessante realizar a mesma análise anterior, mas agora levando em consideração o erro associado a transdução do transformador de potencial a fim de fazer uma comparação entre a possível medição sem a curva de resposta em frequência e com os erros visualizados a partir da mesma.

Assim, as tensões resultantes são identificadas na Tabela 18:

Tabela 18 - Resultado das tensões simuladas com a inserção do erro do transformador de potencial.

Tensões na barra de 13,8 kV

Ordem	Amplitude (V)	Ordem	Amplitude (V)	Ordem	Amplitude (V)
0	21,2	17	154,8093	34	3,6314
1	7712,71	18	9,386342	35	61,925
2	9,103	19	145,3651	36	7,5595
3	2,4846	20	5,1558	37	57,2130
4	2,7866	21	3,4406	38	3,5658
5	619,95	22	5,1026	39	2,0525
6	13,201	23	134,758	40	2,5006
7	543,4461	24	11,1568	41	32,6152
8	6,7511	25	126,932	42	4,7375
9	4,5716	26	5,6576	43	39,8073
10	6,8230	27	3,4731	44	4,8686
11	348,838	28	4,61845	45	4,93
12	12,8014	29	89,11984	46	10,2978
13	265,163	30	8,77405	47	169,3838
14	5,9052	31	78,25695	48	29,3342
15	3,5702	32	4,32443	49	159,6476
16	4,735	33	2,6890	50	13,337
DTT			13,168%		

Fonte: Autor.

Os valores de amplitude estão na base de baixa tensão do transformador, ou seja, 13,8 kV/ $\sqrt{3}$. O mesmo é válido para a referência na base de 100 V do transdutor em questão, sem alterar o valor das distorções, visto que os dados levam em consideração o erro percentual elucidado no Capítulo 4.

Isto posto, faz-se uma análise dos valores de distorção, recalculando-os na base do TP de 60 kV, no TAP de 15 kV, e verifica-se se houve ou não a violação dos índices estipulados.

A Tabela 19, que segue, mostra os valores referente a Tabela 18 já organizados nas estratificações encontradas nos documentos regulatórios.

Tabela 19 - Resumo das distorções de tensão encontradas com a inserção do erro do transformador.

Tensão na barra de 13,8 kV																	
ANEEL																	
DTT _I		DTT _P		DTT ₃		DTT											
13,151%		0,529%		0,53%		13,168%											
ONS																	
Limites Globais																	
Ímpares					Pares												
Ordem	Amplitude	Ordem	Amplitude	Ordem	Amplitude	Ordem	Amplitude	Ordem	Amplitude								
3	0,0032%	2	0,118%	3	0,0032%	2	0,118%										
5	8,038%	4	0,036%	5	8,038%	4	0,036%										
7	7,046%	6	0,171%	7	7,046%	6	0,171%										
9	0,0593%	8	0,088%	9	0,0593%	8	0,088%										
11	4,5229%	10	0,089%	11	4,5229%	10	0,089%										
13	3,4380%	12	0,166%	13	3,4380%	12	0,166%										
15	0,0463%	14	0,077%	15	0,0463%	14	0,077%										
17	2,0072%	16	0,061%	17	2,0072%	16	0,061%										
19	1,8847%	18	0,122%	19	1,8847%	18	0,122%										
21	0,0446%	20	0,067%	21	0,0446%	20	0,067%										
23	1,7472%	22	0,066%	23	1,7472%	22	0,066%										
25	1,6458%	24	0,145%	25	1,6458%	24	0,145%										
27	0,0450%	26	0,073%	27	0,0450%	26	0,073%										
29	1,1555%	28	0,060%	29	1,1555%	28	0,060%										
31	1,0156%	30	0,114%	31	1,0156%	30	0,114%										
33	0,0349%	32	0,056%	33	0,0349%	32	0,056%										
35	0,8029%	34	0,047%	35	0,8029%	34	0,047%										
37	0,7418%	36	0,098%	37	0,7418%	36	0,098%										
39	0,0266%	38	0,046%	39	0,0266%	38	0,046%										
41	0,4229%	40	0,032%	41	0,4229%	40	0,032%										
43	0,5161%	42	0,061%	43	0,5161%	42	0,061%										
45	0,0639%	44	0,063%	45	0,0639%	44	0,063%										
47	2,1962%	46	0,134%	47	2,1962%	46	0,134%										
49	2,0699%	48	0,380%	49	2,0699%	48	0,380%										
		50	0,173%			50	0,173%										
DTT%		13,168%		DTT%		13,168%											

Fonte: Autor.

Da Tabela 19 acima, nota-se uma diferença existente entre os valores encontrados para as distorções dos valores simulados, ou também enunciados como valores de referência (gabarito), e as novas distorções calculadas levando-se em consideração a correção dos dados para o transdutor de 60 kV, utilizado no TAP de 15 kV.

Desta forma, constata-se, tomando como base nos dados iniciais, que a distorção total de tensão e a distorção de tensão das ordens ímpares tiveram seus valores atenuados em virtude da resposta em frequência do transformador. Por outro lado, a distorção de tensão das ordens pares e múltiplas de três tiveram seus valores majorados em relação a medição referência.

Tais fatos chamam a atenção. Comparando-se a distorção total de tensão de todas as ordens ou mesmo as ímpares, existe uma atenuação do valor, ou seja: antes o valor correspondente à 13,181%, passou para 13,168%, para **DTT**, e anteriormente o valor de 13,17% foi alterado para 13,151% de **DTT_I**. Por outro lado, existe o efeito da amplificação da distorção para as ordens ímpares acima da 27^a e para as ordens pares acima da 6^a.

Se observarmos pela curva, ou mesmo os dados da resposta em frequência, enunciados na Tabela 8, é notável que por volta da 12^a ordem harmônica a curva começa a atenuar os valores de tensão mensurados até o máximo de 0,41 [pu], próximo à 41^a ordem. A partir desse ponto, ocorre o efeito de amplificação de quase três vezes o valor real do sinal medido (próximo à 50^a ordem) e consequentemente o valor da distorção harmônica total calculada é “mascarado” a níveis próximos do valor real. Porém, é fato que existe erros de medição observando-se cada harmônica individualmente.

Além disso, em comparação com os dados de referência, via simulação, tem-se uma mudança dos pontos de violação dos limites de distorção. Inicialmente, após a 25^a havia cinco ordens que ultrapassavam os Limites Globais estipulados. Com a inserção do erro do transformador, passaram para quatro ordens, onde a 35^a e 37^a já não constam nessa nova análise. Ou seja, para fins de mitigação, uma ordem não seria levada em consideração e talvez efeitos negativos associados à essa frequência seriam deixados de lado.

Em se tratando de Limites Individuais, a quantidade de ordens após a 25^a também sofreram um decaimento. É importante ressaltar que esse efeito é apenas em quantidade de ordens. Como se pode notar, a 47^a e 49^a ordem tiveram seus valores quase que triplicados pelo erro associado ao transdutor.

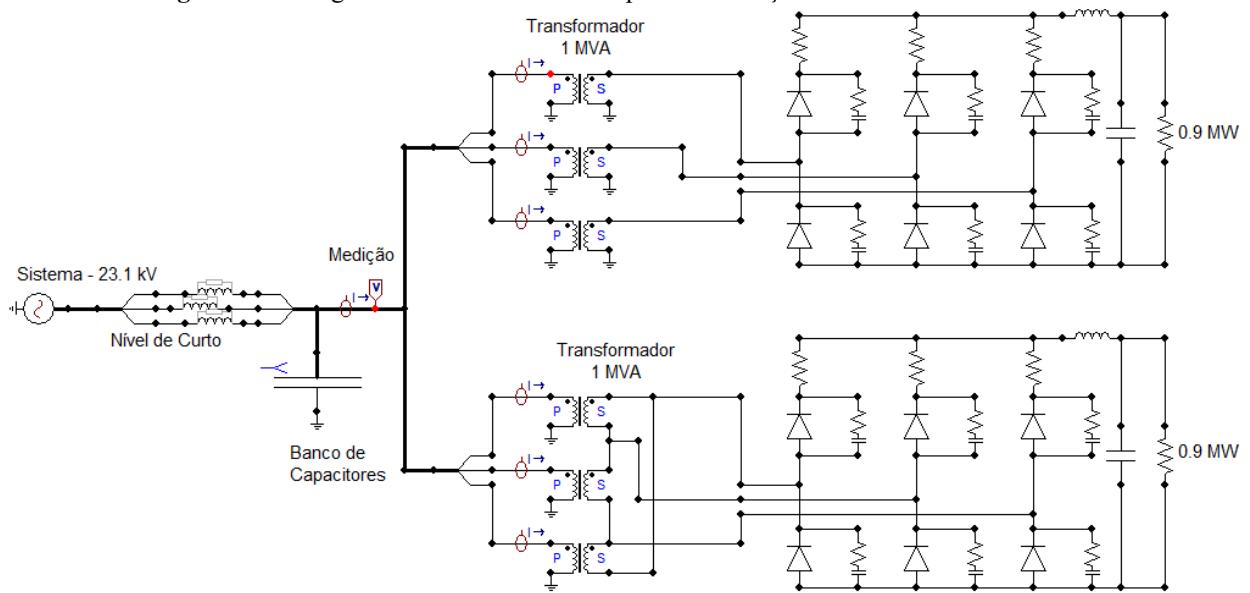
Tais fatos se tornam extremamente relevantes e ajudam a compreender o real impacto da medição por valores equivocados.

5.5 SISTEMA 2, CASO 2

O sistema apresentado no sistema 2 abaixo foi idealizado tendo em vista um sistema elétrico suscetível aos eventuais problemas ocasionados pelas distorções harmônicas de tensão no contexto dos retificadores de seis pulsos, conectados em um arranjo de doze pulsos.

A Figura 5.2 apresenta o esquema elétrico utilizado para a simulação computacional.

Figura 5.2 - Diagrama do circuito utilizado para a simulação dos estudo de caso 2.



Fonte: Autor.

5.5.3 CARACTERÍSTICA DO SISTEMA

O sistema evidenciado pela Figura 5.2 trata-se de um retificador de doze pulsos. Mesmo os retificadores contendo características de geração de correntes de ordem ditada pela equação 19, a conexão realizada pelos transformadores de 1 MVA faz com que haja o cancelamento das ordens formadas por essa equação quando mensuradas pelo lado da alta tensão dos transformadores, [39].

As novas ordens geradas, entre a saída do nível de curto e a entrada comum dos transformadores, devido ao cancelamento, passam a ser de harmônicos múltiplos de doze, seguindo a característica da equação 2:

$$i_{g(h)} = 12h \pm 1 \quad (20)$$

Além disso, nota-se que no mesmo ponto de conexão há um banco de capacitores conectado. A instalação desse equipamento tem por finalidade elucidar exemplificar o fenômeno da ressonância paralela.

Nesse caso, propositalmente, a capacidade calculada para o banco de capacitores é a que faz com o mesmo entrar em ressonância com o sistema quando submetido a uma corrente de 23ª ordem. O motivo de escolher essa ordem harmônica está atrelado a curva de resposta em frequência do transformador de potencial utilizado para as constatações do sistema 2. Por volta da 23ª ordem o mesmo sofre uma atenuação bastante perceptível e a distorção total de tensão pode sofrer uma atenuação mais significativa de aproximadamente 10%.

O mesmo seria válido, e mais nítido ainda, se fosse escolhido a 35ª ou 37ª ordem, que tem por atenuação cerca de 30 e 38%, respectivamente.

O desenvolvimento mais detalhado da dedução do valor do banco de capacitores segue de [5], e contempla a equação (21):

$$Q_C = \frac{S_{CC}}{h^2} \quad (21)$$

As informações técnicas ilustradas na figura 5.2 são disponibilizadas na Tabela 21. o:

Tabela 20 - Valores dos elementos que compõe o sistema do estudo de caso 2.

Equipamentos					
Transformador (Y/Y)		Transformador (Y/Δ)		Retificador 1	
Potência	1 MVA	Potência	1 MVA	P	0,9 MW
Tensão primária	23,1 kV	Tensão primária	23,1 kV	Retificador 2	
Tensão secundária	0,44 kV	Tensão secundária	0,44 kV	P	0,9 MW
Impedância	10 %	Impedância	10 %	Q _C	0,567 MVar
Resistência	1 %	Resistência	1 %	S _{CC}	300 MVA

Fonte: Autor.

5.5.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Similarmente ao caso 1, após a simulação computacional do sistema elétrico, tem-se na Tabela 22 o resultado da tensão fundamental e das tensões harmônicas até a 50ª ordem na barra de 23,1 kV. Neste caso, é como se o transformador empregado para a medição fosse o mesmo de classe de tensão de 60 kV, utilizado no estudo de caso para o Sistema 1, porém no TAP de 25 kV. Desta forma, a medição foi referida ao lado de 23,1 kV, com tensão de 13,3 kV fase-terra.

Tabela 21 - Tensões harmônicas encontradas após simulação do estudo de caso 2.

Tensões na barra de 23,1 kV					
Ordem	Amplitude (V)	Ordem	Amplitude (V)	Ordem	Amplitude (V)
0	1,9319	17	35,229	34	0,82463
1	13331	18	2,273	35	3,078
2	1,9494	19	36,506	36	0,60943
3	1,2538	20	3,0305	37	1,2771
4	1,0733	21	4,7091	38	0,5226
5	37,242	22	9,8621	39	0,48945
6	0,8641	23	902,22	40	0,48217
7	35,451	24	9,2147	41	3,1375
8	0,92435	25	26,643	42	0,34292
9	0,90222	26	2,9935	43	2,9097
10	0,91937	27	2,164	44	0,40668
11	13,645	28	1,7048	45	0,35708
12	1,0417	29	5,7312	46	0,30949
13	6,5522	30	1,2028	47	1,7288
14	1,3166	31	7,1053	48	0,34769
15	1,4774	32	1,0015	49	1,5436
16	1,6803	33	0,89695	50	0,28514
DTT			6,794%		

Fonte: Autor.

5.5.3 ANÁLISE DAS DISTORÇÕES FRENTE ÀS RECOMENDAÇÕES DA ANEEL E ONS.

Frente aos níveis impostos pela ANEEL e ONS, nota-se que no caso 2 comete algumas transgressões dos valores normatizados, salvo alguns que estão em conformidade quando da estratificação das frequências dentro de cada resolução.

Em se tratando de distorção total de tensão, o valor encontrado na simulação, e admitindo-se o nível de tensão do barramento de medição, constata-se que o valor está de acordo com as recomendações da ANEEL. Entretanto, para o ONS não existe conformidade, uma vez que o valor máximo estipulado como limite global é de 6%.

Caso haja a consideração de impor o limite superior pelo múltiplo de 4/3, estaria em conformidade. Entretanto, para estudos prévios, utilizando como base os limites individuais, estaria muito acima do permitido, que é de 3%.

Na estratificação das ordens, como feito no caso 1, tem-se para as distorções de ordem par:

Tabela 22 - Tensões harmônicas de ordem par, não multiplas de três.
Tensões na barra de 23,1 kV

Ordem	Amplitude (V)	Ordem	Amplitude (V)
0	1,9319	26	2,9935
2	1,9494	28	1,7048
4	1,0733	32	1,0015
8	0,92435	34	0,82463
10	0,91937	38	0,5226
14	1,3166	40	0,48217
16	1,6803	44	0,4066
20	3,0305	46	0,30949
22	9,8621	50	0,28514
DTT_P		0,114%	

Fonte: Autor.

Para as distorções tem-se um valor bem aquém do valor máximo admitido pela ANEEL.

Seguindo com a análise, as ordens harmônicas impares desempenham papel predominante na composição da distorção total, chegando a compor, até a segunda casa decimal da distorção total. Esta observação pode ser ilustrado na Tabela 24.

Capítulo 5 – Estudos de Caso

Tabela 23 - Tensões harmônicas de ordem ímpar.

Tensões na barra de 23,1 kV			
Ordem	Amplitude (V)	Ordem	Amplitude (V)
3	1,2538	27	2,164
5	37,242	29	5,7312
7	35,451	31	7,1053
9	0,9022	33	0,896
11	13,645	35	3,078
13	6,5522	37	1,277
15	1,4774	39	0,4894
17	35,229	41	3,1375
19	36,506	43	2,9097
21	4,7091	45	0,3570
23	902,22	47	1,7288
25	26,643	49	1,5436
DTT_I		6,792%	

Fonte: Autor.

Complementarmente, as frequências múltiplas de três também são analisadas separadamente pela ANEEL.

Tabela 24 - Tensões harmônicas múltiplas de três.

Tensão na barra 23,1 kV			
Ordem	Amplitude (V)	Ordem	Amplitude (V)
3	1,2538	27	2,164
6	0,8641	30	1,2028
9	0,9022	33	0,8969
12	1,0417	36	0,6094
15	1,4774	39	0,4894
18	2,273	42	0,3429
21	4,7091	45	0,3570
24	9,2147	48	0,3476
DTT₃		0,0844%	

Fonte: Autor.

Sob o ponto de vista dos limites estabelecidos pelo ONS, que necessitam de uma análise mais pontual das ordens harmônicas existentes na rede, tem-se nas Tabelas 26 e 27, respectivamente, um resumo das tensões sob o ponto de vista dos limites globais e individuais.

Tabela 25 - Resumo das tensões encontradas na simulação do sistema 2 sob o aspecto dos limites globais e individuais de [36].

Tensão na barra de 23,1 kV									
Limites Globais					Limites Individuais				
Ímpares		Pares		Ordem	Ímpares		Pares		Ordem
Ordem	Amplitude	Ordem	Amplitude	Ordem	Amplitude	Ordem	Amplitude	Ordem	Amplitude
3	0,0094%	2	0,015%	3	0,0094%	2	0,015%		
5	0,2790%	4	0,008%	5	0,2790%	4	0,008%		
7	0,2660%	6	0,006%	7	0,2660%	6	0,006%		
9	0,0068%	8	0,007%	9	0,0068%	8	0,007%		
11	0,1024%	10	0,007%	11	0,1024%	10	0,007%		
13	0,0492%	12	0,008%	13	0,0492%	12	0,008%		
15	0,0111%	14	0,010%	15	0,0111%	14	0,010%		
17	0,2643%	16	0,013%	17	0,2643%	16	0,013%		
19	0,2738%	18	0,017%	19	0,2738%	18	0,017%		
21	0,0353%	20	0,023%	21	0,0353%	20	0,023%		
23	6,7678%	22	0,074%	23	6,7678%	22	0,074%		
25	0,1999%	24	0,069%	25	0,1999%	24	0,069%		
27	0,0162%	26	0,022%	27	0,0162%	26	0,022%		
29	0,0430%	28	0,013%	29	0,0430%	28	0,013%		
31	0,0533%	30	0,009%	31	0,0533%	30	0,009%		
33	0,0067%	32	0,008%	33	0,0067%	32	0,008%		
35	0,0231%	34	0,006%	35	0,0231%	34	0,006%		
37	0,0096%	36	0,005%	37	0,0096%	36	0,005%		
39	0,0037%	38	0,004%	39	0,0037%	38	0,004%		
41	0,0235%	40	0,004%	41	0,0235%	40	0,004%		
43	0,0218%	42	0,003%	43	0,0218%	42	0,003%		
45	0,0027%	44	0,003%	45	0,0027%	44	0,003%		
47	0,0130%	46	0,002%	47	0,0130%	46	0,002%		
49	0,0116%	48	0,003%	49	0,0116%	48	0,003%		
		50	0,002%			50	0,002%		
DTT%		6,794%		DTT%		6,794%			

Fonte: Autor.

**5.5.4 INSERÇÃO DO ERRO DE MEDAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE POTENCIAL
DE 60 KV, TAP DE 25 KV**

Inserindo o erro inerente ao transformador de potencial utilizado, tem-se a Tabela 28 abaixo com as suas respectivas ordens harmônicas recalculadas sob o efeito da atenuação e amplificação da resposta.

Tabela 26 - Resultado das tensões simuladas com a inserção do erro do transformador de potencial.

Tensões na barra de 23,1 kV

Ordem	Amplitude (V)	Ordem	Amplitude (V)	Ordem	Amplitude (V)
0	1,9319	17	33,49987	34	0,601537
1	13217,07	18	2,148837	35	2,169271
2	1,933335	19	34,31662	36	0,402713
3	1,242507	20	2,827005	37	0,799201
4	1,062586	21	4,362285	38	0,293628
5	36,82257	22	9,064139	39	0,250682
6	0,853209	23	820,8472	40	0,221455
7	34,93623	24	8,29447	41	1,302229
8	0,909184	25	23,7526	42	0,142401
9	0,885303	26	2,630372	43	1,539721
10	0,899855	27	1,876845	44	0,334495
11	13,31221	28	1,456635	45	0,48471
12	1,012666	29	4,813169	46	0,657751
13	6,347558	30	0,989347	47	4,692539
14	1,270441	31	5,704725	48	0,941417
15	1,419476	32	0,780608	49	3,761578
16	1,605594	33	0,68272	50	0,621034
DTT			6,237%		

Fonte: Autor.

Feito isso, gera-se, assim como no estudo de caso para o sistema 1, uma comparação entre as duas resoluções normativas, onde vê-se que alguns dos novos limites encontrados também estão além dos valores recomendados.

Tabela 27 - Resumo das distorções de tensão encontradas com a inserção do erro do transformador.

Tensão na barra de 23,1 kV							
ANEEL				ONS			
DTT _I	DTT _P	DTT ₃	DTT	DTT _I	DTT _P	DTT ₃	DTT
6,235%	0,080%	0,0775%	6,237%				
Limites Globais				Limites Individuais			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Amplitude	Ordem	Amplitude	Ordem	Amplitude	Ordem	Amplitude
3	0,0094%	2	0,015%	3	0,0094%	2	0,015%
5	0,279%	4	0,008%	5	0,279%	4	0,008%
7	0,264%	6	0,006%	7	0,264%	6	0,006%
9	0,0067%	8	0,007%	9	0,0067%	8	0,007%
11	0,1007%	10	0,007%	11	0,1007%	10	0,007%
13	0,0480%	12	0,008%	13	0,0480%	12	0,008%
15	0,0107%	14	0,010%	15	0,0107%	14	0,010%
17	0,2535%	16	0,012%	17	0,2535%	16	0,012%
19	0,2596%	18	0,016%	19	0,2596%	18	0,016%
21	0,0330%	20	0,021%	21	0,0330%	20	0,021%
23	6,2105%	22	0,069%	23	6,2105%	22	0,069%
25	0,1797%	24	0,063%	25	0,1797%	24	0,063%
27	0,0142%	26	0,020%	27	0,0142%	26	0,020%
29	0,0364%	28	0,011%	29	0,0364%	28	0,011%
31	0,0432%	30	0,007%	31	0,0432%	30	0,007%
33	0,0052%	32	0,006%	33	0,0052%	32	0,006%
35	0,0164%	34	0,005%	35	0,0164%	34	0,005%
37	0,0060%	36	0,003%	37	0,0060%	36	0,003%
39	0,0019%	38	0,002%	39	0,0019%	38	0,002%
41	0,0099%	40	0,002%	41	0,0099%	40	0,002%
43	0,0116%	42	0,001%	43	0,0116%	42	0,001%
45	0,0037%	44	0,003%	45	0,0037%	44	0,003%
47	0,0355%	46	0,005%	47	0,0355%	46	0,005%
49	0,0285%	48	0,007%	49	0,0285%	48	0,007%
		50	0,005%			50	0,005%
DTT%		6,237%		DTT%		6,237%	

Fonte: Autor.

No que tange a resolução da ANEEL, observa-se que mesmo a distorção total de tensão não ultrapassando os 8% permitidos, tem-se a extração dos resultados por parte da distorção total de ordens impares, que representa 0,235% a mais que o permitido, ou seja 6%. Além disso, a distorção total de ordens pares não múltiplas de três e distorção das ordens múltiplas de 3 também estão dentro da faixa permitida.

Complementarmente, com base nos valores estipulados pelo ONS, tem-se a extração dos valores de distorção total de tensão tanto para os limites globais quanto para os individuais.

E mais, em virtude da ressonância na 23^a ordem, é importante notar o quanto decisivo é a contribuição para a composição da distorção total de tensão. Por outro lado, caso houvesse uma outra ressonância, em outra ordem qualquer, era necessário o conhecimento prévio da curva de resposta em frequência do transformador a ser utilizado, a fim de não haver enganos.

5.6 NÍVEL DE TENSÃO NA BAIXA DOS TRANSFORMADORES DE POTENCIAL

Complementarmente, o nível de tensão, referido tanto somente a alta tensão dos transdutores, como visto nas tabelas anteriores. Isto posto, neste item, são apresentados os valores referentes ao lado secundário do transformador de potencial indutivo.

Assim, as Tabelas 28 e 29 ilustram os valores das medições simuladas, sem a inserção dos erros inerentes ao transdutor de tensão.

A Tabela 28 contempla o espectro de tensões vistas do lado de baixa do transformador para o sistema 1 simulado.

Tabela 28 - Tensões resultantes da simulação do sistema 1, sem erro associado ao transdutor.

Tensões do lado de baixa do TP, sistema 1					
0	0,299457	17	2,236467	34	0,068389
1	106,8669	18	0,136396	35	1,207062
2	0,1261	19	2,12436	36	0,157156
3	0,034444	20	0,075927	37	1,255950
4	0,038667	21	0,051024	38	0,087185
5	8,613689	22	0,076268	39	0,055054
6	0,183664	23	2,034758	40	0,074796
7	7,575601	24	0,170272	41	1,079507
8	0,094291	25	1,955925	42	0,156728
9	0,064003	26	0,088452	43	1,033422
10	0,095764	27	0,055015	44	0,081317
11	4,911971	28	0,074255	45	0,049893
12	0,180903	29	1,457797	46	0,066564
13	3,760119	30	0,146539	47	0,857269
14	0,084071	31	1,338995	48	0,148831
15	0,051047	32	0,076219	49	0,899985
16	0,068077	33	0,048533	50	0,084124

Fonte: Autor.

A Tabela 29, por sua vez, faz menção a tensão encontrada do secundário do TP de 60 kV, no TAP de 25 kV, para o sistema 2. Também com os valores oriundos diretamente da simulação computacional.

Tabela 29 - Tensões resultantes da simulação do sistema 2, sem erro associado ao transdutor.

Tensões do lado de baixa do TP, sistema 2					
0	0,015934	17	0,290564	34	0,006801
1	109,9522	18	0,018747	35	0,025387
2	0,016078	19	0,301096	36	0,005026
3	0,010341	20	0,024995	37	0,010533
4	0,008852	21	0,03884	38	0,00431
5	0,307167	22	0,081341	39	0,004037
6	0,007127	23	7,441385	40	0,003977
7	0,292395	24	0,076002	41	0,025878
8	0,007624	25	0,219748	42	0,002828
9	0,007441	26	0,02469	43	0,023999
10	0,007583	27	0,017848	44	0,003354
11	0,112542	28	0,014061	45	0,002945
12	0,008592	29	0,04727	46	0,002553
13	0,054042	30	0,009921	47	0,014259
14	0,010859	31	0,058604	48	0,002868
15	0,012185	32	0,00826	49	0,012731
16	0,013859	33	0,007398	50	0,002352

Fonte: Autor.

Por outro lado, as Tabelas 30 e 31, fazem referência às tensões mensuradas no secundário do transformador, para o sistema 1 e sistema 2, respectivamente, com o erro inserido para cada frequência.

Tabela 30 - Tensões resultantes da simulação do sistema 1, com erro associado ao transdutor.

Tensões do lado de baixa do TP, sistema 1					
0	0,29269	17	2,13733	34	0,05014
1	106,483	18	0,12959	35	0,85495
2	0,12568	19	2,00694	36	0,10437
3	0,0343	20	0,07118	37	0,78989
4	0,03847	21	0,0475	38	0,04923
5	8,55915	22	0,07045	39	0,02834
6	0,18226	23	1,8605	40	0,03452
7	7,50293	24	0,15403	41	0,45029
8	0,09321	25	1,75245	42	0,06541
9	0,06312	26	0,07811	43	0,54959
10	0,0942	27	0,04795	44	0,06722
11	4,81613	28	0,06376	45	0,06806
12	0,17674	29	1,23041	46	0,14217
13	3,66089	30	0,12114	47	2,33855
14	0,08153	31	1,08043	48	0,40499
15	0,04929	32	0,0597	49	2,20413
16	0,06537	33	0,03712	50	0,18413

Fonte: Autor

Tabela 31 - Tensões resultantes da simulação do sistema 2, com erro associado ao transdutor.

Tensões do lado de baixo do TP, sistema 2

0	0,01593	17	0,2763	34	0,00496
1	109,013	18	0,01772	35	0,01789
2	0,01595	19	0,28304	36	0,00332
3	0,01025	20	0,02332	37	0,00659
4	0,00876	21	0,03598	38	0,00242
5	0,30371	22	0,07476	39	0,00207
6	0,00704	23	6,77023	40	0,00183
7	0,28815	24	0,06841	41	0,01074
8	0,0075	25	0,19591	42	0,00117
9	0,0073	26	0,02169	43	0,0127
10	0,00742	27	0,01548	44	0,00276
11	0,1098	28	0,01201	45	0,004
12	0,00835	29	0,0397	46	0,00543
13	0,05235	30	0,00816	47	0,0387
14	0,01048	31	0,04705	48	0,00776
15	0,01171	32	0,00644	49	0,03102
16	0,01324	33	0,00563	50	0,00512

Fonte: Autor.

5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por se tratar de um capítulo no qual as considerações inerentes aos resultados foram sempre colocadas após a apresentação dos mesmos, chama-se a atenção nesse item apenas para o fato de o erro de medição ser “mascarado” pela atenuação brusca das frequências na faixa entre a 15^a ordem e 42^a e amplificação exagerada acima da 43^a.

Tal efeito é evidenciado e se mostra preocupante sob o aspecto da quantificação correta da distorção harmônicas. Ou seja, no segundo é possível ver mais claramente a atenuação da DTT na presença do erro intrínseco ao transformador.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSÕES

Ao longo de cada capítulo optou-se por explicitar de maneira clara e direta todos fatos relacionados ao tema abordado neste trabalho que é a análise de resposta em frequência sob o enfoque do levantamento da curva dos transformadores de potencial com o objetivo de atenuar os erros inerentes ao processo de medição das distorções harmônicas. Para tanto, ao final de cada um dos capítulos deu-se uma retrospectiva acerca dos fatos apresentados visando o esclarecimento das informações apresentadas. Entretanto, é de se ressaltar, neste presente capítulo a importância de cada um dos outros na constituição final do objetivo da dissertação.

No capítulo 1, dado como introdutório, apresentou-se uma contextualização do surgimento das distorções harmônicas citando exemplos comuns, porém de grande auxílio para compreensão geral. A conexão entre o aumento das distorções harmônicas com a inserção cada vez mais constante de novas fontes de geração também fora de papel relevante para o desenrolar do trabalho.

Mais adiante, um apanhado em referências bastante sustentáveis fez surgir um estado da arte bem consolidado, com estudos, dentre eles alguns de longa data, que mostraram-se de suma relevância na temática e deram suporte para as análises experimentais encontradas no capítulo 4.

Ao final do capítulo reforça-se a ideia das contribuições previstas neste trabalho com o intuito de servir como reflexão aos cuidados tomados na quantificação dos harmônicos de tensão. Buscando, até, chamar a atenção para os agentes regulatórios.

O capítulo 2, referente a caracterização dos transformadores de potencial, desempenha um papel fundamental, visto que o mesmo está relacionado a exposição das características elementares dos transdutores. Uma abordagem técnica, tendo como base a resolução normativa referente aos TPIs deixa claro os critérios de seleção dos mesmos quando da escolha destes para mensurar tensões fundamentais. Entretanto, quando da presença de harmônicos, não se pode dizer o mesmo.

Do ponto de vista de funcionamento do equipamento, o capítulo em questão apresentou um equacionamento e uma narrativa bem estruturada, demonstrando as relações existentes entre as tensões de saída de entrada do TP, além de um tratamento adicional referente aos transformadores de potencial capacitivo. Apontando aspectos relevantes que tendem a não aplicação destes para a aferição das componentes harmônicas de tensão.

Com relação a constituição física dos transdutores, vê-se um detalhamento baseado em referências bibliográficas concisas e sólidas, que conseguem transparecer alguns aspectos relevantes que influenciam o funcionamento dos transdutores durante a medição da tensão de um barramento.

O capítulo 3, por sua vez, realiza a contextualização da análise de resposta em frequência frente suas diversas aplicações nas variadas áreas da engenharia elétrica. Desde os sistemas de controle convencionais, passando pela utilização da técnica para o levantamento da condição eletromecânica de transformadores de potência, até chega na aplicação da mesma no levantamento da relação de transformação do transdutor com foco nos erros quando da presença de componentes não senoidais na rede.

A nomenclatura utilizada através dos equacionamentos vistos no capítulo 3, para a exposição dos dados de ensaio, também torna-se peça importante no decorrer do trabalho. Uma vez que, no capítulo 4, são aplicáveis de acordo com o objetivo de melhor visualização das curvas de resposta em frequência.

No capítulo 4, um dos mais importantes do trabalho, apresenta-se diversos experimentos/ensaios realizados com alguns TPs. Ensaios estes, que conseguem estabelecer enormes vínculos às referências encontradas nos capítulos iniciais desta dissertação. O que faz com que o resultado encontrado seja cada vez mais próximo do esperado e visto em outros trabalhos com tema similar.

Não obstante dos resultados experimentais, é necessário enfatizar, também, todo a estrutura laboratorial onde os mesmos foram realizados, além da confiabilidade inerente aos aparelhos utilizados na realização do experimentos. Diga-se de passagem, fatores determinísticos para se alcançar bons resultados finais.

Por fim, o capítulo 5 teve como objetivo demonstrar, mesmo que de maneira computacional, como ocorreria o erro de interpretação dos resultados quando se tem a aferição

de tensões harmônicas por transformadores que não possuem boas, se não, nenhuma, resposta à frequências multiplicas da fundamental.

Os sistemas simulados, além de passar essa sensibilidade, também conseguem mostrar, pontualmente os efeitos da medição equivocada. Ou seja, a distorção total de tensão, no primeiro caso é mascara pelo efeito da atenuação e amplificação das frequências harmônicas, apresentando um DTT próximo, caso não existisse erros. Porém, no segundo caso, numa análise mais pontual, é possível destacar o erro quando se tem um ponto de ressonância no sistema.

Adicionalmente, a visualização dos percentuais individuais das distorções harmônicas para cada frequência múltipla da fundamental, como é o caso da estratificação dos limites globais e individuais, se faz de grande destaque. Ou seja, analisa-se cada frequência individualmente e toma-se os devidos cuidados pontuais para mitigação dos efeitos causados pelo elevado grau de distorções.

Portanto, em face de tudo que fora exposto ao longo desse trabalho, espera-se que o mesmo seja de relevância e adicione questões relevantes dentro da temática de medições harmônicas. Adicionalmente, espera-se que trabalho futuros tenham este como referência complementar, além das inúmeras outras apresentadas aqui e que possam se aprofundar cada vez mais na temática utilizando como sugestões as seguintes vertentes, na área acadêmica:

- ✓ Realização de estudos práticos, a nível de média, alta e extra alta tensão, para o levantamento da curva de transdutores de potencial instalados em barramentos que possam conter altos índices de distorção harmônicas;
- ✓ Realização de estudos, também práticos, em unidades geradoras renováveis, como fazendas solares e parques eólicos, garantindo a confiabilidade dos estudos de acesso na entrada dos mesmos em conexão com o Sistema Interligado Nacional;

Sob o ponto de vista dos órgãos reguladores, normalizadores e/ou fabricantes, seria interessante deixar como sugestão a incorporação do ensaio de resposta em frequência como um ensaio de rotina quando da utilização dos transformadores para mensurar tensões além da frequência fundamental.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, “Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems”, Wiley-IEEE Press, 2000.
- [2] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty, “Electrical Power Systems Quality”, Second Edition, McGraw-Hill, 2004.
- [3] Adel A. Elbaset, M. S. Hassan, “Design and Power Quality Improvement of Photovoltaic Power System”, First Edition, Springer, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-47464-9>
- [4] Math H. J. Bollen, Irene Yu-Hua Gu, “Signal Processing of Power Quality Disturbances” First Edition, Wiley- IEEE Press, 2006.
- [5] Jos Arrillaga, Neville R. Watson, “Power System Harmonics”, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, 1985.
- [6] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, “Nota Técnica nº 056/2017-SRD/ANEEL, Atualização das projeções de consumidores e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024”
- [7] ANEEL – Banco de Informações da Geração. Acesso em 23/06/2018. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>.
- [8] ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica, “Annual Wind Energy Report 2017”, 2017. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2018/05/Boletim.pdf>>.
- [9] Math H. J. Bollen, Fainan Hassan, “Integration of Distributed Generation in the Power System” First Edition, John Wiley & Sons Ltd, 2011. <https://doi.org/10.1002/9781118029039>
- [10] G. Olivier, R. P. Bouchard, Y. Gervais and D. Mukhedkar, “Frequency Response of HV Test Transformers and the Associated Measurement Probleams,” Power Apparatus and Systems, IEEE Transaction on, Vol. Pas-99, No 1, Jan./Feb., 1980, pp. 141-145. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1980.319620>
- [11] D. A. Bradley, P. S. Bodger and P. R. Hyland, “Harmonic Response Tests on Voltage Transducers for the New Zealand Power System,” Power Apparatus and Systems, IEEE

Referências Bibliográficas

Transactions on, Vol. PAS-104, No. 7, Jul., 1985, pp. 1750-1756.
<https://doi.org/10.1109/TPAS.1985.319208>

[12] SAMESIMA, M. I. Resposta de Transformadores de Corrente e de Potencial às Altas Frequências. 1990. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

[13] M. I. Samesima, J. C. de Oliveira and E. M. Dias, “Frequency Response Analysis And Modeling of Measurement Transformers Under Distorted Current and Voltage Supply,” Power Delivery, IEEE Transaction on, Vol. 06, No 4, Oct., 1991, pp. 1762-1768.
<https://doi.org/10.1109/61.97718>

[14] H. Seljeseth, E. A. Saethre, T. Ohnstad and L. Lien “Voltage Transformer Frequency Response. Measuring Harmonics in Norwegian 300 kV and 132 kV Power Systems,” in Harmonics and Quality of Power, 1998, ICHQP 1998, 8^a International Conference on, 1998, pp. 820-824. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.1998.760148>

[15] Y. Xiao, J. Fu, B. Hu, X. Li and C. Deng, “Problems of Voltage Transducer in Harmonic Measurement,” Power Delivery, IEEE Transaction on, Vol. 19, No. 3, Jul., 2004, pp. 1483-1486. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.829947>

[16] M. Klatt, J. Meyer, M. Elst and P. Schegner “Frequency Responses of MV Voltage Transformers in the Range of 50 Hz to 10 kHz,” in Harmonic and Quality of Power, 2010, ICHQP 2010, 14^a International Conference on, 2010.
<https://doi.org/10.1109/ICHQP.2010.5625484>

[17] J. Meyer, R. Stiegler, M. Klatt, M. Elst and E. Sperling “Accuracy of Harmonic Voltage Measurements in the Frequency Range up to 5 kHz Using Conventional Instrument Transformers,” 21^a International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, Jul., 2011.

[18] J. Meyer, R. Stiegler and J. Kilter “Accuracy of Voltage Instrument Transformers for Harmonic Measurements in Elering’s 330 kV Transmission Network,” 2016 Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ), Tallinn, Estonia, Aug. 2016, 2016.
<https://doi.org/10.1109/PQ.2016.7724094>

[19] J. Meyer, R. Stiegler, J. Kilter and S. Konzelmann “Assessment of Voltage Instrument Transformers Accuracy for Harmonic Measurements in Transmission Systems” 2016, 17th

Referências Bibliográficas

Internacional Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, Brasil, Dec. 2016. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2016.7783472>

[20] Solon de Medeiros Filho, “Medição de Energia Elétrica”. Quarta Edição, LTC Livros Técnicos e Científicos LTDA, 1997.

[21] Walfredo Schmidt, “Materiais Elétricos Isolantes e Magnéticos”. Terceira Edição, Vol. 2, Blucher, 2010.

[22] Walfredo Schmidt, “Materiais Elétricos Condutores e Semicondutores”. Terceira Edição, Vol. 1, Blucher, 2010.

[23] M. Krins, H. Borsi, E. Gockenbach “Flashover Voltage of Epoxy-Resin Surfaces in Carbonized Transformed Oil”. Proceedings of 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, May 1997, Seoul, South Korea.

[24] Honjie Sun, Yibo Zhang, Hoan D. Le, Fumei Wu, Jiansheng Chen, Jens Rocks, “Performances of Hydrophobic Cycloaliphatic Epoxies Exposed to Acidic Fog Under DC Stress” 2014 ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application, Sept. 2014, Poznan, Poland. <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2014.7035451>

[25] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR IEC 60085, “Isolação Elétrica – Avaliação e Designação Térmicas”, 2017.

[26] Kerstin Kunde, Holger Daumling, Ralf Huth, Hans-Wener Schlierf, Joaachin Schmid, “Frequency Response of Instrument Transformers in the kHz Range” ETZ, Heft 6/2012. Disponível em <<http://www.trench.at/content/download/1604/14169/file/Frequency%20Response%20of%20Instrument%20Transformers%20in%20the%20kHz%20range.pdf>>.

[27] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6855, “Transformadores de Potencial Indutivos”, 2009.

[28] CIGRE, Working Group A2.26, “Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA)”. Brochure 342, 2008.

[29] Norman S. Nise, “Engenharia de Sistemas de Controle”, Quinta Edição, LTC Livros Técnicos e Científicos LTDA, 2002.

Referências Bibliográficas

[30] A. J. J. P. Rosentino, “Estimativa dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetidos a um Curto-Círcuito Trifásico”. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, UFU, 2010.

[31] P. H. A. Barra, “Estresse Eletromecânico em Transformadores sob o Enfoque de Curto-Circuitos Assimétricos: Uma Abordagem Analítica e Computacional”. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, UFU, 2017.

[32] M. E. C. Paulino, “Avaliação de Transformadores Utilizando Análise de Resposta em Frequência, Capítulo 1 – Introdução a Análise de Resposta em Frequência”. O Setor Elétrico, 2009.

[33] H. J. F. Neto, P. H. A. Barra e A. C. Delaiba, “Análise de Resposta em Frequência (FRA) para Diagnóstico de Falhas em Transformadores”, XV CEEL – XV Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, Uberlândia, 2017.

[34] N. Abeywickrama, Y. V. Serdyuk, S. M. Gubanski, “High-Frequency Modeling of Power Transformers for use in Frequency Response Analysis (FRA)”, IEEE Transations on Power Delivery, Vol. 23, nº 4, pp. 2042-2049, 2008. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.917896>

[35] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional – PRODIST”. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 2018.

[36] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, “Procedimentos de Rede”. Submódulo 2.8 – Gerenciador dos Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica da Rede Básica, 2016.

[37] M. Luft, R. Cioc, D. Pietruszczak, “Integrated Measurement System Based on the IEEE-488 Bus”. 2012 ELEKTRO – Proceedings of 9th International Conference, May 2012, Rajeck Teplice, Slovakia. <https://doi.org/10.1109/ELEKTRO.2012.6225613>

[38] C. G. Ferreira, D. S. L. Simonetti e G.D.C. Souza. “Estudo da Compensação Harmônicas na Aplicação de Cicloconversores em uma Planta Siderúrgica”. IX CBQEE – Conferência Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica, Curitiba, 2017. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2006.

[39] V. A. Gonçalves, “Redução de Harmônicos de Corrente em Retificadores de Multiplos Pulsos – Generalização das Conexões Diferenciais”. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista, UNESP, Ilha Solteira, SP, Abril 2016.