

### UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE ESCOLA DE ENGENHARIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

## ANA CAROLINE SOARES DE PAULA CAMPOS

## Caracterização Metrológica do Fator de Escala de Divisor de Tensão Capacitivo para Medição de Harmônicos em Alta Tensão

NITERÓI 2021

### UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE ESCOLA DE ENGENHARIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

### ANA CAROLINE SOARES DE PAULA CAMPOS

## Caracterização Metrológica do Fator de Escala de Divisor de Tensão Capacitivo para Medição de Harmônicos em Alta Tensão

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Marcio Zamboti Fortes, Dr.

> NITERÓI 2021

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE Gerada com informações fornecidas pelo autor

C198c	Campos, Ana Caroline Soares de Paula Caracterização Metrológica do Fator de Escala de Divisor de Tensão Capacitivo para Medição de Harmônicos em Alta Tensão / Ana Caroline Soares de Paula Campos ; Marcio Zamboti Fortes, orientador. Niterói, 2021. 111 f. : il.
	Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021.
	DOI: http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2021.m.13205970764
	<ol> <li>Engenharia eletrica. 2. Transformador eletrico. 3. Circuito eletrico. 4. Energia eletrica. 5. Produção intelectual. I. Fortes, Marcio Zamboti, orientador. II. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. III. Título.</li> </ol>
	CDD -

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

#### ANA CAROLINE SOARES DE PAULA CAMPOS

#### CARACTERIZAÇÃO METROLÓGICA DE DIVISOR DE TENSÃO CAPACITIVO PARA MEDIÇÃO DE HARMÔNICOS EM ALTA TENSÃO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Aprovado em 06 de agosto de 2021.

BANCA EXAMINADORA

hair Bulit fit

Prof. Dr. Marcio Zamboti Fortes - Orientador Universidade Federal Fluminense - UFF

Feline Sams Prof. Dr. Felipe Sass Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder Universidade Federal de São João del-Rei- UFSJ

an dinter

Prof. Dr. Regis Pinheiro Landim Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO

> Niterói 2021

Porque Dele, por meio Dele e para Ele são todas as coisas. A Ele, pois, a glória eternamente.

Romanos 11:36

## Agradecimentos

Acima de tudo agradeço ao Deus da minha vida, por ter me suprido, me sustentado e me dado saúde e forças neste, que considero o maior desafio de minha trajetória profissional. Por sua infinita graça, me concedeu a dádiva da vida e tem me guiado.

Agradeço a Alex, meu marido e principal apoiador dos meus sonhos, que acredita mais em mim do que eu mesma. Você sempre me deu tudo que eu precisava pra prosseguir. Só por viver ao seu lado, a vida é muito melhor! Que Deus nos conduza nessa nova fase. Te amo!

Agradeço a minha mãe Luciene (Mainha, eu não tenho palavras pra expressar meu amor por você), seu amor e força foram fundamentais nesse processo tão árduo; ao meu querido pai Artur, de quem herdei o amor pelos estudos e a dedicação em aprender; e a meu irmão Arthur, em quem tenho ombro e proteção. Amo vocês!

Agradeço aos amigos do Laboratório de Metrologia em Alta Tensão do Inmetro pelo suporte, aprendizado, amizade, parceria, e por todos os momentos que vivemos juntos. A pesquisadora Msc. Patrícia Cals, obrigada pelo apoio, ensinamentos, carinho, motivação constantes e por permitir o início do desenvolvimento deste projeto em sua gestão; ao engenheiro Marlos pelos momentos iniciais de apoio neste trabalho e amizade; ao engenheiro Rodrigo Zampilis por todo suporte nas medições e montagem dos circuitos, discussões técnicas, motivação, parceria e amizade; aos pesquisadores Marcus Viegas e Msc. Marcelo Britto pelas contribuições técnicas e amizade; e por fim, em especial, agradeço ao pesquisador Msc. Leonardo Souza, pelo incentivo em pesquisa na área de Metrologia em Alta Tensão, amizade, motivação e sugestão de linha de estudo, contribuições e discussões técnicas, compartilhamento de ferramentas para meu desenvolvimento profissional e atuação como gestor do Lamat, contribuindo para que este projeto fosse possível, no âmbito do Inmetro.

Agradeço em especial ao meu orientador, professor Dr. Márcio Zamboti Fortes pelo incentivo para cursar o mestrado, por todo suporte desde as disciplinas, estágio em docência (que foi uma experiência ímpar na minha vida acadêmica), motivação, apontamentos, contribuições técnicas, compreensão com minhas dificuldades nesse período tão complexo de pandemia e orientação neste trabalho.

Agradeço aos amigos que participaram das lutas para que essa conquista fosse possível. Alguns mais distantes, outros mais presentes nesses últimos anos, em especial Ane Caroline, Vanessa, Elienai, Ana Laura, Priscila, Keyla e Monique, obrigada por serem meu ombro e conforto em tantos momentos no decorrer deste tempo de mestrado. Amo vocês!

## Resumo

Pesquisas atuais apresentam o Capacitive Voltage Divider (CVD) como potencial dispositivo de conversão para medição de harmônicos em alta tensão. Neste trabalho foi realizada a caracterização, com rastreabilidade metrológica, de um sistema de medição de harmônicos em alta tensão, composto por um CVD, cujos módulos de alta e baixa tensão são capacitores de referência, juntamente com multímetros digitais modelo 3458A do fabricante Keysight. A fim de estudar o comportamento do sistema em frequências de 60 Hz a 3 kHz, foi utilizado o método de determinação do Fator de Escala (FE) por entrada e saída de tensão, através de medições automáticas com o software TracePqm Wattmeter (TWM). Para validar os resultados e demonstrar a viabilidade do método foi realizada uma comparação com Transformador de Potencial (TP) de referência, com o cálculo do Erro Normalizado ( $E_N$ ). Um estudo de caso aplicando o sistema para medição do espectro harmônico de dois transformadores foi realizado, obtendo os níveis de Distorção Harmônica Total (DHT) e Distorção Harmônica Individual (DHI) para cada um destes equipamentos.

Palavras-chave: Divisor de tensão capacitivo, harmônicos, metrologia em alta tensão, sistema de medição

## Abstract

Current research presents the Capacitive Voltage Divider (CVD) as a possibility for high voltage harmonic measurements. This work was carried out to characterize, with metrological traceability, a high voltage harmonic measurement system, composed of a CVD, with high and low voltage sets as reference capacitors, and Keysight 3458A multimeters. In order to study the behavior of the system at frequencies ranging from 60 Hz to 3 kHz, the Scale Factor determination method by voltage input and output was used, through automatic measurements with TWM software. To confirm the results and demonstrate the method's feasibility, a comparison with a reference Voltage Transformer was performed and the Normalized Error was calculated. A case study applying the system to measure the harmonic spectrum of two transformers was carried out, obtaining the levels of Total Harmonic Distortion (DHT) and Individual Harmonic Distortion (DHI) of the equipment.

**Keywords**: Capacitive voltage divider, harmonics, high voltage metrology, measurement system

# Lista de Figuras

1.1	Distribuição de Trabalhos de 1980 a 2021	6
1.2	Mapa de rede de cocitação de autores no tema Medição de harmônicos em alta tensão	8
1.3	Conexão entre países com trabalhos publicados sobre Medição de harmô- nicos em alta tensão	10
1.4	Conexão entre institutos com trabalhos publicados sobre Medição de harmô- nicos em alta tensão	10
1.5	Rede de coocorrência de palavras-chave em publicações no tema	11
2.1	Diagrama de Sistema de medição em alta tensão	15
2.2	Hierarquia do Sistema Metrológico Mundial	15
2.3	Modelo Divisor de Tensão	17
2.4	Capacitor de Referência a gás SF6	18
2.5	Capacitores de Referência a ar	19
2.6	Função densidade de probabilidade	23
2.7	Distribuição Normal ou Gaussiana	23
2.8	Método de propagação de incertezas (a); método de Monte Carlo (b) $\ . \ .$ .	28
3.1	Divisor de tensão Capacitivo	31
3.2	Configuração Interna do Capacitor SF6	31
3.3	Configuração Interna do Capacitor a ar	32
3.4	Calibrador Multifunção 5730A	32
3.5	Amplificador 5725A	33
3.6	Painel Frontal do Multímetro 3458A	33

3.7	Diagrama de medição FE por entrada e saída de tensão	35
3.8	Circuito para caracterização metrológica do Sistema de Medição	35
3.9	Tela principal do TWM	36
3.10	Tela de seleção de algoritmo	37
3.11	Configuração dos parâmetros de amostragem	38
3.12	Configuração dos multímetros e método de sincronização	39
3.13	Conexão de trigger nos multímetros 3458A (Mestre-Escravo)	39
3.14	Representação de capacitâncias parasitas em um CVD $\ \ldots \ \ldots \ \ldots \ \ldots$	41
3.15	$V_{in}$ e $V_{out}$ amostradas com TWM em 180 Hz	42
3.16	Comportamento do FE em frequência – comparativo 200 V e $700$ V	45
3.17	Contribuições para incerteza de $V_{in}$ 60Hz $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	49
3.18	Contribuições para incerteza de $V_{out}$ 60 Hz $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	54
3.19	Contribuições para incerteza do $FE$ 60 Hz $\ldots$	55
3.20	Diagrama esquemático de medição para comparação com TP de referência	60
3.20 3.21	Diagrama esquemático de medição para comparação com TP de referência Circuito de medição para comparação com TP de referência	60 61
<ul><li>3.20</li><li>3.21</li><li>3.22</li></ul>	Diagrama esquemático de medição para comparação com TP de referência Circuito de medição para comparação com TP de referência Comparação com TP de referência 700V	60 61 64
<ul><li>3.20</li><li>3.21</li><li>3.22</li><li>3.23</li></ul>	Diagrama esquemático de medição para comparação com TP de referência Circuito de medição para comparação com TP de referência	60 61 64 64
<ol> <li>3.20</li> <li>3.21</li> <li>3.22</li> <li>3.23</li> <li>3.24</li> </ol>	Diagrama esquemático de medição para comparação com TP de referência         Circuito de medição para comparação com TP de referência         Comparação com TP de referência 700V         Comparação com TP de referência 200V         Ajuste polinomial racional CVD	<ul> <li>60</li> <li>61</li> <li>64</li> <li>64</li> <li>66</li> </ul>
<ul> <li>3.20</li> <li>3.21</li> <li>3.22</li> <li>3.23</li> <li>3.24</li> <li>3.25</li> </ul>	Diagrama esquemático de medição para comparação com TP de referência         Circuito de medição para comparação com TP de referência         Comparação com TP de referência 700V         Comparação com TP de referência 200V         Ajuste polinomial racional CVD         Residuo CVD Ajuste polinomial racional	<ul> <li>60</li> <li>61</li> <li>64</li> <li>64</li> <li>66</li> <li>68</li> </ul>
<ol> <li>3.20</li> <li>3.21</li> <li>3.22</li> <li>3.23</li> <li>3.24</li> <li>3.25</li> <li>3.26</li> </ol>	Diagrama esquemático de medição para comparação com TP de referênciaCircuito de medição para comparação com TP de referênciaComparação com TP de referência 700VComparação com TP de referência 200VAjuste polinomial racional CVDResiduo CVD Ajuste polinomial racionalAmericaHistograma CVD - MMC 60Hz	<ul> <li>60</li> <li>61</li> <li>64</li> <li>64</li> <li>66</li> <li>68</li> <li>68</li> </ul>
<ul> <li>3.20</li> <li>3.21</li> <li>3.22</li> <li>3.23</li> <li>3.24</li> <li>3.25</li> <li>3.26</li> <li>3.27</li> </ul>	Diagrama esquemático de medição para comparação com TP de referênciaCircuito de medição para comparação com TP de referênciaComparação com TP de referência 700VComparação com TP de referência 200VAjuste polinomial racional CVDResiduo CVD Ajuste polinomial racionalLordHistograma CVD - MMC 60HzLord	<ul> <li>60</li> <li>61</li> <li>64</li> <li>64</li> <li>66</li> <li>68</li> <li>68</li> <li>69</li> </ul>
<ul> <li>3.20</li> <li>3.21</li> <li>3.22</li> <li>3.23</li> <li>3.24</li> <li>3.25</li> <li>3.26</li> <li>3.27</li> <li>4.1</li> </ul>	Diagrama esquemático de medição para comparação com TP de referênciaCircuito de medição para comparação com TP de referênciaComparação com TP de referência 700VComparação com TP de referência 200VAjuste polinomial racional CVDResiduo CVD Ajuste polinomial racionalHistograma CVD - MMC 60HzListograma CVD - MMC 120 HzTransformador elevador Sistema ATCA	<ul> <li>60</li> <li>61</li> <li>64</li> <li>64</li> <li>66</li> <li>68</li> <li>68</li> <li>69</li> <li>73</li> </ul>
<ul> <li>3.20</li> <li>3.21</li> <li>3.22</li> <li>3.23</li> <li>3.24</li> <li>3.25</li> <li>3.26</li> <li>3.27</li> <li>4.1</li> <li>4.2</li> </ul>	Diagrama esquemático de medição para comparação com TP de referênciaCircuito de medição para comparação com TP de referênciaComparação com TP de referência 700VComparação com TP de referência 200VAjuste polinomial racional CVDResiduo CVD Ajuste polinomial racionalHistograma CVD - MMC 60HzComparação com TP de referência 200VFonte de Potência 220 V	<ul> <li>60</li> <li>61</li> <li>64</li> <li>64</li> <li>66</li> <li>68</li> <li>69</li> <li>73</li> <li>74</li> </ul>
<ul> <li>3.20</li> <li>3.21</li> <li>3.22</li> <li>3.23</li> <li>3.24</li> <li>3.25</li> <li>3.26</li> <li>3.27</li> <li>4.1</li> <li>4.2</li> <li>4.3</li> </ul>	Diagrama esquemático de medição para comparação com TP de referênciaCircuito de medição para comparação com TP de referênciaComparação com TP de referência 700VComparação com TP de referência 200VAjuste polinomial racional CVDResiduo CVD Ajuste polinomial racionalHistograma CVD - MMC 60HzComparação com TP de referênciaFonte de Potência 220 VControlador Fonte de Potência	<ul> <li>60</li> <li>61</li> <li>64</li> <li>66</li> <li>68</li> <li>69</li> <li>73</li> <li>74</li> <li>74</li> </ul>
<ul> <li>3.20</li> <li>3.21</li> <li>3.22</li> <li>3.23</li> <li>3.24</li> <li>3.25</li> <li>3.26</li> <li>3.27</li> <li>4.1</li> <li>4.2</li> <li>4.3</li> <li>4.4</li> </ul>	Diagrama esquemático de medição para comparação com TP de referênciaCircuito de medição para comparação com TP de referênciaComparação com TP de referência 700VComparação com TP de referência 200VAjuste polinomial racional CVDAjuste polinomial racional CVDResiduo CVD Ajuste polinomial racionalHistograma CVD - MMC 60HzTransformador elevador Sistema ATCAFonte de Potência 220 VControlador Fonte de PotênciaDiagrama esquemático medição harmônicos Sistema ATCA	<ul> <li>60</li> <li>61</li> <li>64</li> <li>66</li> <li>68</li> <li>68</li> <li>69</li> <li>73</li> <li>74</li> <li>74</li> <li>75</li> </ul>

4.6	Medição de harmônicos Sistema ATCA - sala de controle	76
4.7	Diagrama esquemático medição harmônicos TP 36 kV	77
4.8	Circuito medição harmônicos TP 36 kV	78
4.9	DHT (%) por nível de tensão (Sistema ATCA) $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	79
4.10	DHI (%) - 150 V (Sistema ATCA)	80
4.11	DHI (%) - 3º harmônico por nível de tensão (Sistema ATCA) $\ . \ . \ . \ .$	80
4.12	DHI (%) - 5º harmônico por nível de tensão (Sistema ATCA) $\ . \ . \ . \ .$	81
4.13	DHI (%) - 7º harmônico por nível de tensão (Sistema ATCA) $\ . \ . \ . \ .$	81
4.14	DHT (%) por nível de tensão (TP 36 kV) $\hfill \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	83
4.15	DHI (%) 400 V (TP 36 kV)	84
4.16	DHI (%) - 3º harmônico por nível de tensão (TP 36 kV) $\hfill \ldots \ldots \ldots$	84
4.17	DHI (%) - 5° harmônico por nível de tensão (TP 36 kV) $\ . \ . \ . \ .$	84
4.18	DHI (%) - 13º harmônico por nível de tensão (TP 36 kV)	85
4.19	Contribuições para incerteza componente harmônica $V_{hout}$ 180 Hz $\ .\ .\ .$ .	89
4.20	Contribuições para incerteza Fund 60 Hz $\hdots$	90
4.21	Contribuições para incerteza componente harmônica $V_{hin}$ 180 Hz	91

# Lista de Tabelas

1.1	Distribuição de países com artigos publicados sobre Medição de harmônicos em alta tensão	9
1.2	Distribuição de artigos publicados em revistas sobre Medição de harmônicos em Alta Tensão	12
1.3	Distribuição de artigos publicados em congressos sobre Medição de harmô- nicos em Alta Tensão	12
2.1	Valores sob a área da curva da distribuição normal para o intervalo $\mu\pm k\sigma$ .	24
2.2	Valores de $k$ para $v_{eff}$	27
3.1	Resultados FE 200 V	43
3.2	Resultados FE 700 V	44
3.3	FE CVD em frequência – comparativo 200V e 700V	46
3.4	Conteúdo Harmônico 60 H z $V_{in}$ 200 V	56
3.5	Conteúdo Harmônico 60 H z $V_{out}$ 200 V $\hdots$	57
3.6	Conteúdo Harmônico 60 H z $V_{in}$ 700 V	58
3.7	Conteúdo Harmônico 60 H z $V_{out}$ 700 V $\ldots$	59
3.8	Especificações técnicas NVRD 40	61
3.9	Resultados - comparação com TP de referência 60 Hz	62
3.10	Erro Normalizado - Comparação TP	63
3.11	Resultados coeficientes do ajuste racional - MMC	69
3.12	Resultados FE ajuste racional - MMC	70
4.1	Especificações técnicas Sistema ATCA 200 kV	75
4.2	Especificações técnicas TP 36 kV	77

4.3	DHT (%) por nível de tensão (Sistema ATCA)	79
4.4	DHI (%) Sistema ATCA - 150 V	82
4.5	DHT (%) por nível de tensão (TP 36 kV)	83
4.6	DHI (%) TP 36 kV - 400 V	86
4.7	Balanço de Incertezas - 180 H z $V_{hout}$	89
4.8	Balanço de Incertezas - 60 Hz $V_{hin}$	91
4.9	Balanço de Incertezas - 180 Hz $V_{hin}$	91

# Lista de Abreviaturas e Siglas

ATCA Alta Tensão em Corrente Alternada	1
<b>BIPM</b> Bureau Internacional de Pesos e Medidas	15
CA corrente alternada	1
CC corrente contínua	36
CVD Capacitive Voltage Divider	V
Dimci Diretoria de Metrologia Científica e Tecnologia	16
<b>DHI</b> Distorção Harmônica Individual	v
DHT Distorção Harmônica Total	V
FE Fator de Escala	v
<b>FFT</b> Fast Fourier Transformer	4
GD Geração Distribuída	2
GPIB General Purpose Interface Bus	33
<b>IEEE</b> Institute of Electrical and Electronics Enginners	7
Inmetro Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia	2
INRIM Istituto Nazionale di Recerca Metrologica	7
Lamat Laboratório de Metrologia em alta tensão	2
<b>MMC</b> Método de Monte Carlo	3
<b>PTB</b> Physikalisch-Technische Bundesanstalt	16
<b>QEE</b> Qualidade de Energia Elétrica	2
<b>SEP</b> Sistema Elétrico de Potência	1
<b>SI</b> Sistema Internacional de Unidades	16
<b>SIN</b> Sistema Interligado Nacional	1
<b>SMAT</b> Sistema de Medição em Alta Tensão	14
<b>SMR</b> Sistema de Medição de Referência	1
<b>TP</b> Transformador de Potencial	v
<b>TWM</b> TracePqm Wattmeter	v
<b>UTE</b> Instituto Usinas y Trasmisiones Eléctricas	7

$\mathbf{VV}\mathbf{\Gamma}\mathbf{\Gamma}\mathbf{I}$ Withdowed $\mathbf{\Gamma}\mathbf{\Gamma}\mathbf{I}$ for harmonic Analysis	<b>FFT</b> Windowed FFT for <i>I</i>	harmonic Analysis	S
--	--------------------------------------	-------------------	---

# Sumário

1	Intr	oduçã	0	1
	1.1	Motiva	ação e Objetivos	1
	1.2	Estrut	ura do Trabalho	3
	1.3	Revisã	o Bibliométrica e Sistemática	4
		1.3.1	Relevância do tema	5
<b>2</b>	Con	nceitua	ção Teórica	14
	2.1	Metro	logia em Alta Tensão em Corrente Alternada	14
	2.2	Mediç	ões com dispositivo de conversão	16
		2.2.1	Divisor de Tensão Capacitivo	17
	2.3	Aquisi	ção e Processamento de Sinais	19
		2.3.1	Amostragem	20
		2.3.2	Análises de Fourier para identificação de conteúdo harmônico	21
	2.4	Estatí	stica aplicada a medições em alta tensão	22
		2.4.1	Método de propagação de incertezas	25
		2.4.2	Método de simulação numérica para análise de incertezas	27
	2.5	Conclu	ısões parciais	29
3	Car	acteriz	ação Metrológica de Divisor de Tensão Capacitivo em frequên-	
	cia			30
	3.1	Caract	terísticas Técnicas do Sistema de Medição	30
		3.1.1	Divisor de tensão capacitivo	30

	3.1.2	Calibrac	lor Multifunção Fluke 5730A	32
	3.1.3	Amplific	eador Fluke 5725A	32
	3.1.4	Multime	etro Digital 3458A	33
3.2	Métod	lo de Med	lição	34
	3.2.1	Sistema	de medição	34
	3.2.2	Amostra	agem com <i>software</i> TWM	35
	3.2.3	Sincroni	zação	38
3.3	Consid	derações s	sobre o Sistema de Medição	40
	3.3.1	Variação	) na Capacitância do Capacitor SF6 em função da tensão $~$ .	40
	3.3.2	Variação	o na capacitância de capacitores de referência em função da	
		tempera	tura	40
	3.3.3	Capacita	âncias parasitas	41
3.4	Result	tados do I	Fator de Escala	41
3.5	Estim	ativa da I	ncerteza de Medição do Fator de Escala	46
	3.5.1	Modelo	de Medição	46
	3.5.2	Estimat	iva da incerteza da Tensão de Entrada	47
		3.5.2.1	Repetibilidade - $u_{repin}$	48
		3.5.2.2	Certificado 3458A - $u_{calin}$	48
		3.5.2.3	Resolução 3458A - $u_{Rin}$	48
		3.5.2.4	Deriva 3458A - $u_{Din}$	49
	3.5.3	Estimat	iva da incerteza da Tensão de Saída $V_{out}$	49
		3.5.3.1	Repetibilidade - $u_{repout}$	50
		3.5.3.2	Certificado 3458A - $u_{calout}$	50
		3.5.3.3	Resolução 3458A - $u_{Rout}$	51
		3.5.3.4	Deriva 3458A - $u_{Dout}$	51
		3.5.3.5	Variação da capacitância devido a variação de Tempera- tura nos módulos de baixa e alta tensão - $u_{\Delta T}$	51

			3.5.3.6 Variação da capacitância do capacitor SF6 com a Tensão $- u_{\Delta V}$	53
		3.5.4	Estimativa da incerteza do Fator de Escala $\ldots$	54
		3.5.5	Análise do conteúdo harmônico das tensões de entrada e saída do CVD	55
	3.6	Valid drão	ação dos Resultado do Método com Transformador de Potencial pa-	60
		3.6.1	Resultados da validação com TP padrão	62
	3.7	Model	agem em frequência de Divisor de tensão capacitivo	64
		3.7.1	Método para obtenção da curva de ajuste	65
		3.7.2	Estimativa da Incerteza do Modelo através do Método de Monte	
			Carlo	67
	3.8	Concl	usões parciais	70
4	$\mathbf{Est}$	udos d	e caso	72
	4.1	Métod	lo de Medição	72
	4.2	Cenár	io 1: Sistema de alimentação ATCA (200 kV)	73
	4.3	Cenár	io 2: Transformador de potencial 36 kV	77
	4.4	Result	ados	78
		4.4.1	Espectro harmônico Sistema ATCA	78
		4.4.2	Espectro harmônico TP 36 kV	82
	4.5	Estim	ativa da Incerteza de Medição	86
		4.5.1	Modelo de Medição para Harmônicos da Tensão de Entrada	86
		4.5.2	Estimativa da incerteza padrão devido ao FE do CVD	87
		4.5.3	Estimativa da Incerteza Padrão das componentes harmônicas da Tensão de Saída	87
			4.5.3.1 Repetibilidade - $u(repV_{hout})$	87
			4.5.3.2 Certificado 3458A - $u(calV_{hout})$	88

			4.5.3.3	Resolução 3458A - $u(RV_{hout})$	88
			4.5.3.4	Deriva 3458A - $u(DV_{hout})$	88
		4.5.4	Estimati	va da Incerteza Padrão das componentes harmônicas da	
			Tensão o	le Entrada	89
	4.6	Conclu	ısões paro	eiais	92
_	C	ı ~			
5	Con	clusoe	s e traba	alhos futuros	93
	5.1	Trabal	hos futur	08	94
Re	Referências 96				
Aj	Apêndice A – Código Matlab FFT 100				100
Aj	pênd	ice B -	- Código	Matlab Método de Monte Carlo	103

## Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação e Objetivos

Atualmente, o *Sistema Elétrico de Potência* (SEP) brasileiro para transmissão de energia elétrica em *corrente alternada* (CA) alcança níveis de tensão de até 750 kV, com cerca de 123 mil km de linhas de transmissão construídas e em operação. Estima-se, até 2024, uma expansão significativa dos sistemas de transmissão das linhas de 500 kV e 230 kV, para escoamento da energia proveniente de novas usinas do *Sistema Interligado Nacional* (SIN) [1]. O monitoramento e controle de tensão são realizados por meio de subestações, que possuem em geral dispositivos de conversão acoplados a um instrumento de medição.

A fim de garantir a confiabilidade nas medições em alta tensão, os dispositivos de conversão devem ter seu desempenho metrológico avaliado periodicamente por meio da calibração com um *Sistema de Medição de Referência* (SMR), de forma a atender aos requisitos estabelecidos pela normalização vigente [2]. Os dispositivos de conversão mais utilizados para medição de *Alta Tensão em Corrente Alternada* (ATCA) são TP e Divisor de Tensão [3].

A estrutura metrológica brasileira em alta tensão já é bem estabelecida na frequência fundamental da rede elétrica em 60 Hz. Em [4] apresenta-se o universo de laboratórios envolvidos com ensaios, medição e pesquisa em alta tensão no país. Destaca-se que os sistemas de medição em alta tensão necessariamente fazem parte da infraestrutura destes laboratórios, desde os de referências nacionais até os laboratórios industriais e, que possuem um papel fundamental nos resultados dos ensaios em alta tensão, que avaliam o desempenho de diversos materiais e equipamentos, no que tange a suportabilidade diante de sobretensões. O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), por meio do Laboratório de Metrologia em alta tensão (Lamat), é responsável pela disseminação da grandeza ATCA no país até 200 kV, detendo os padrões de referência nacionais. Os laboratórios de alta tensão brasileiros devem manter seus sistemas rastreados ao Inmetro, a fim de atender aos requisitos de incerteza e fornecer resultados confiáveis [5].

Sabe-se que, nos últimos anos, o setor elétrico brasileiro tem enfrentado mudanças significativas com a massiva penetração de cargas não lineares nas redes de distribuição e a inserção de novas tecnologias para *Geração Distribuída* (GD) como painéis fotovoltaicos e geradores eólicos. Dentro desse contexto, efeitos relacionados a qualidade de energia elétrica se apresentam cada vez mais presentes como tema de diversas pesquisas. Dentre esses efeitos, cabe destacar as distorções harmônicas de tensão. As medições para controle de harmônicos de tensão são realizadas por meio de instrumentação em baixa tensão, conectada geralmente a um transformador de potencial, responsável por reduzir os valores a níveis compatíveis de medição.

O TP clássico é construído para operar na frequência nominal da rede. Quando submetido a frequências diferentes, pode distorcer ou até não detectar sinais de alta tensão em determinada faixa de frequência, ocasionando erros nas medições [6]. Segundo colocado por [7], devido a não linearidade do núcleo, até mesmo quando alimentados por sinais senoidais, os sinais de saída destes equipamentos podem ser distorcidos.

Algumas normas internacionais definem requisitos sobre a exatidão de instrumentos para medição de *Qualidade de Energia Elétrica* (QEE). A norma IEC 61000-4-30 [8] especifica critérios para medição de harmônicos, porém não considera a influência dos erros de medição que podem ser ocasionados por transformadores de instrumentos, quando submetidos a condições não senoidais. A norma IEC 61869-3 [9] define especificações apenas em condições senoidais e não aborda requisitos para condições não senoidais.

O Lamat possui dentre seus equipamentos um transformador de potência utilizado como fonte de ATCA 200 kV. Sabe-se que este tipo de geração em alta tensão pode ocasionar a presença de harmônicos na tensão de saída, devido a característica de magnetização não linear do núcleo [3]. Uma das demandas do laboratório é a avaliação do nível de distorção harmônica desta fonte com rastreabilidade metrológica, de modo a garantir a confiabilidade nos resultados alcançados nas calibrações. Medições anteriores foram realizadas com medidores de QEE, havendo indícios de distorções na faixa inicial de operação até 10 kV. Estes equipamentos, porém, não alcançam níveis de exatidão adequados às necessidades do laboratório. Desta maneira, é indispensável medir esse efeito com um sistema de maior exatidão, a fim de definir uma componente de incerteza ou aplicar uma correção aos resultados para cada componente harmônica.

Para isto, se faz necessário um sistema de medição que identifique as harmônicas provenientes da fonte de alta tensão, mantendo o sinal original de alimentação com o mínimo de interferência possível. Segundo [10], o divisores de tensão possuem características mais compatíveis para medições de componentes harmônicas. Mais especificamente, o CVD, divisor de tensão capacitivo, vem sendo estudado como alternativa para desenvolvimento de sistemas de medição para calibração de TPs em condições não senoidais [11]. De acordo com [12], CVDs podem ser utilizados como sistemas de medição na faixa de frequências harmônicas por sua exatidão. Em [13], o CVD é apresentado com a característica principal de linearidade no domínio da frequência, no espectro característico dos harmônicos. Além disso, em [14] é apresentado como transdutor de referência para medições de QEE.

O objetivo geral deste trabalho é definir um método para caracterização de CVD, a fim de estabelecer um sistema capaz de medir harmônicos em alta tensão e utilizá-lo para obtenção do espectro harmônico de fontes e TPs, com rastreabilidade metrológica. Como objetivos específicos são previstos a estimativa da incerteza de medição do FE, a validação dos resultados com TP de referência, uma modelagem em frequência e estimativa da incerteza do modelo através do *Método de Monte Carlo* (MMC). Além disso, foram realizados dois estudos de caso para aplicação do método estudado.

### 1.2 Estrutura do Trabalho

O desenvolvimento dessa dissertação está estabelecido como descrito a seguir.

Capítulo 2: Conceituação Teórica

O capítulo busca apresentar a estrutura metrológica brasileira da grandeza de alta tensão alternada no Brasil, demonstrando a importância para o setor elétrico de medições confiáveis. O capítulo apresenta também fundamentos teóricos e as principais características de um sistema de medição em alta tensão e conceitos estatísticos aplicados ao cálculo de incerteza de medição. Além disso, o capítulo descreve a teoria de processamento de sinais e as ferramentas matemáticas utilizadas neste trabalho para obtenção dos resultados de componentes harmônicas.

Capítulo 3: Caracterização metrológica de CVD na frequência

Neste capítulo é apresentado o método utilizado para caracterização metrológica do

sistema de Medição, os equipamentos que o compõem, os critérios escolhidos e as considerações metrológicas utilizadas. O FE de um CVD é determinado pelo método de medição de entrada e saída de tensão, com cálculo das respectivas incertezas de medição. Neste capítulo, é também realizado um ajuste polinomial racional para definição de um modelo que descreva o comportamento do CVD, a fim de obter resultados para qualquer frequência desejada a partir de dados de medição. O MMC é aplicado para determinação da incerteza de medição do modelo.

Capítulo 4: Estudos de caso

Esse capítulo busca apresentar a aplicação do método por meio de dois estudos de caso: obtenção do espectro harmônico por meio de Transformada Rápida de Fourier, do inglês *Fast Fourier Transformer* (FFT) em dois equipamentos, um sistema ATCA de 200 kV e um TP de 36 kV, ambos sendo avaliados no início da faixa de medição, até cerca de 10 kV. Estes dispositivos são utilizados em calibrações realizadas no laboratório e essa etapa busca identificar as componentes harmônicas presentes no sinal convertido.

Capítulo 5: Conclusões e trabalhos futuros

Esta seção apresenta as principais conclusões obtidas na pesquisa e avalia o cumprimento dos objetivos do trabalho. São propostas recomendações para a continuidade dos trabalhos na área, além de serem realizadas algumas sugestões para comparação dos resultados por meio de outros métodos.

Referências Bibliográficas

Exposição das referências utilizadas para a elaboração do trabalho.

## 1.3 Revisão Bibliométrica e Sistemática

Nesta seção destaca-se a relevância do tema proposto, apresentando para isto uma análise dos principais trabalhos encontrados desde 1980 até 2021. Consideram-se trabalhos que abordam mais especificamente os problemas apresentados por transformadores de potencial em converterem a tensão de entrada com exatidão em condições não senoidais, tendo em vista que se trata dos dispositivos de conversão mais utilizados para medição e controle de tensão no sistema elétrico. Além disso, inclui também pesquisas com respeito ao desenvolvimento de técnicas de medição para detecção de componentes harmônicas em alta tensão, como o estudo do comportamento de divisores de tensão, mais especificamente os capacitivos, utilizados como alternativa para desenvolver sistemas de medição que apresentem maior confiabilidade metrológica, em faixas de frequência diferentes da nominal.

A análise bibliométrica inclui a distribuição geográfica dos trabalhos com os principais países, *status* e evolução do tema ao longo dos anos, além dos principais métodos de medição encontrados. A pesquisa foi realizada na base de dados da Scopus e do IEEE explorer, com as palavras chave *"High Voltage Transducers for Harmonic Measurements"*. A coleta de dados foi realizada em fevereiro de 2021. A amostra conta com 67 artigos selecionados nestas bases, filtrados de maneira a enquadrar apenas aqueles que estão relacionados ao tema. Foram utilizados como principais indicadores para a revisão bibliométrica: número de artigos ao longo dos anos, para evidenciar a evolução do tema e produtividade; principais revistas e congressos com publicação no tema, a fim de avaliar o impacto; percentual de artigos por país, com objetivo de se ter ideia do alcance do tema no mundo. Adicionalmente, são apresentados mapas de bibliométria elaborados com o programa *VOSviewer* [15].

### 1.3.1 Relevância do tema

Ao longo dos anos, diversos problemas relacionados à QEE têm sido abordados na literatura e estudados de maneira mais criteriosa. Mais especificamente sobre o efeito dos harmônicos em dispositivos de conversão, nota-se um interesse maior no tema nos últimos 10 anos. O avanço da eletrônica de potência, juntamente com a busca por eficiência energética e novas fontes sustentáveis de energia como empreendimentos de GD podem ser consideradas as principais razões para o aumento do interesse na área, tanto de institutos de pesquisa no setor elétrico, quanto em institutos de metrologia e universidades.

A Figura 1.1 apresenta, dentro do universo de trabalhos encontrados, o avanço do tema ao longo dos anos, de 1980 a 2021. Nota-se que mais de 80% dos trabalhos encontrados foram publicados nos últimos 10 anos.



Figura 1.1: Distribuição de Trabalhos de 1980 a 2021

A medição de harmônicos é uma tarefa indispensável em sistemas elétricos modernos devido à presença de equipamentos que injetam conteúdo harmônico na rede, como aqueles utilizados em eletrônica de potência [7]. Atividades como monitoramento de qualidade de energia e nível de distorção harmônica, detecção de fontes de distorção e faturamento dependem de medições harmônicas com exatidão. Para isto, na cadeia metrológica, graças a sua vasta utilização, os transformadores de potencial apresentam um papel indispensável, sendo necessária a caracterização metrológica destes transdutores na presença de harmônicos, por apresentarem exatidão significativamente reduzida nestas condições.

Em [16] são apresentadas comparações entre medições em transformadores de potencial submetidos a condições senoidais e não senoidais. Os resultados demonstram que os erros de relação e de ângulo podem alcançar níveis maiores que os permitidos para a classe de exatidão, quando estes dispositivos estão submetidos a condições distorcidas. O autor afirma que erros significativos podem ser introduzidos nas medições, quando transformadores de potencial são utilizados para monitoramento de qualidade de energia.

A necessidade de medir distorções harmônicas em redes de alta tensão tem aumentado devido a projetos de GD [11]. Essas medições são realizadas por meio de transformadores de potencial e de corrente, tendo a exatidão influenciada pelos erros introduzidos por estes dispositivos. O autor expõe a dificuldade em determinar o comportamento de transformadores de potencial diante de formas de onda distorcidas devido a resposta não linear gerada pelo núcleo magnético dos mesmos.

A exatidão da medição de harmônicos em alta tensão depende diretamente da exatidão de TPs em condições não-senoidais. Os critérios de exatidão nestas condições são definidos em normas internacionais apenas para equipamentos de medição conectados aos TPs e ignoram os erros ocasionados por esses dispositivos. A exatidão em frequências acima da frequência nominal é geralmente desconhecida, sendo difícil especificar limites, não apenas para harmônicos de tensão, como também para qualquer tipo de transiente que contenha um amplo espectro harmônico [12].

A importância do tema é endossada em [17] reafirmando-se que a exatidão dos transformadores de potencial em converter a forma de onda do lado de alta tensão para o lado de baixa tensão na presença de distorção harmônica, deve ser avaliada. Além disso, o autor cita a publicação do relatório técnico [14] discutindo a aplicação de transformadores de instrumentos para medições de qualidade de energia.

Os países que mais contribuíram com publicações na área de medições de harmônicos em alta tensão e seus efeitos em dispositivos de conversão, dentro do âmbito desta pesquisa, foram Itália, Uruguai e Alemanha. Na Europa, o grupo de pesquisadores do *Istituto Nazionale di Recerca Metrologica* (INRIM), Instituto de Metrologia Italiano, composto por Gabriella Crotti, Antonio Cataliotti e outros publicou mais de 20 artigos acadêmicos em congressos e periódicos disponibilizados na plataforma do *Institute of Electrical and Electronics Enginners* (IEEE), com o artigo mais citado *"Frequency response of MV voltage transformer under actual waveforms"* [18] apresentando cerca de 25 citações.

Outro grupo italiano composto por Marco Faifer, Sergio Toscani e outros pesquisadores da universidade Politécnica de Milano também publicou diversos trabalhos nesta área em mais de 10 conferências e revistas nos últimos 10 anos, apresentando o segundo artigo mais citado no âmbito da pequisa "Characterization of voltage instrument transformers under nonsinusoidal conditions based on the best linear approximation", [19] com 19 citações na base Scopus.

Já na América do Sul, o Uruguai se destaca com a publicação de cerca de 10 artigos no tema, com o grupo de pesquisadores do *Instituto Usinas y Trasmisiones Eléctricas* (UTE), composto por Daniel Slomovitz, Leonardo Trigo, entre outros, em congressos nos últimos 5 anos. Um dos artigos mais importantes do grupo no tema é *"Behavior of voltage* transformers under distorted waveforms" [20].

A Figura 1.2 demonstra o mapa de rede de autores. Foi empregada uma análise de cocitação, enfatizando a interligação entre os autores nos anos de 2000-2021. A análise examina os autores que citaram outros autores. O programa encontrou 49 autores interconectados no tema. O tamanho da bolha apresenta o número de citações recebidas, e a espessura das linhas representa a força das relações de cocitação. A conexão e a proximidade entre dois autores identificam a relação de cocitação. A rede de cocitação formou sete grupos, produzidos com base nas referências pertencentes aos autores principais. A cor da bolha indica o grupo ao qual o autor está associado.



Figura 1.2: Mapa de rede de cocitação de autores no tema Medição de harmônicos em alta tensão

A Tabela 1.1 demonstra as publicações advindas de diversos países. Autores brasileiros representaram 8% do total de publicações identificadas.

País	Porcentagem de publicações
Itália	29%
Uruguai	11%
Alemanha	9%
China	9%
Brazil	8%
Polônia	6%
USA	5%
Canadá	3%
UK	3%
África do Sul	3%
Croácia	2%
Eslovênia	2%
Israel	2%
Japão	2%
Noruega	2%
Paquistão	2%
República Tcheca	2%
Tailândia	2%
Ucrânia	2%
Africa do Sul	2%
Índia	2%

Tabela 1.1: Distribuição de países com artigos publicados sobre Medição de harmônicos em alta tensão

A análise de coautoria de países reflete o grau de comunicação entre os países, bem como suas influências nessa área. O mapa de rede de coautoria de países e seus institutos de pesquisa são apresentados nas Figuras 1.3 e 1.4. Os mapas exibem poucas cores, o que demonstra a pequena diversificação do tema. Os grandes nós representam os países mais influentes com origem de publicações, em razão da quantidade de citações, destacando-se Itália e Reino Unido. As ligações entre esses nós representam as relações de cooperação entre os países.

Foi realizada também uma análise de palavras chave, verificando a ocorrência das palavras mais frequentes, tendo por objetivo destacar o estado da arte, tendências e



Figura 1.3: Conexão entre países com trabalhos publicados sobre Medição de harmônicos em alta tensão



Figura 1.4: Conexão entre institutos com trabalhos publicados sobre Medição de harmônicos em alta tensão

tópicos principais das pesquisas na área de medição de harmônicos em alta tensão. O programa encontrou 30 palavras chave, dentro de 521, que aparecem pelo menos 5 vezes em publicações.

A Figura 1.5 mostra as palavras-chave identificadas. O tamanho do nó está relacionado com a frequência de utilização da palavra em publicações. As linhas demonstram as relações de coocorrência entre as palavras e a distância demonstra a interação entre elas e a relação de coocorrência. Destacam-se as palavras *transducers* (29 vezes), *power quality* (16 vezes), *frequency response* (26 vezes) e *harmonic analisys* (14 vezes), como as que se apresentam com maior frequência. *Calibration* e *uncertainty analysis* também seguem em destaque, como palavras com forte coocorrência com 91 e 73 vezes, respectivamente.



Figura 1.5: Rede de coocorrência de palavras-chave em publicações no tema

A fim de identificar a abrangência do tema foi realizado um levantamento das principais revistas e congressos com publicações na área. As Tabelas 1.2 e 1.3 apresentam os resultados obtidos na pesquisa.

Revista	Percentual (%)
IEEE Transactions on Inst. and Meas.	46
IEEE Transactions on Power Delivery	12
IEEE Sensors	12
IEEE Transactions on Power Systems	6
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems	6
Electric Power Systems Research	6
Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews	6
IEEE Power Engeneering Review	6

Tabela 1.2: Distribuição de artigos publicados em revistas sobre Medição de harmônicos em Alta Tensão

Tabela 1.3: Distribuição de artigos publicados em congressos sobre Medição de harmônicos em Alta Tensão

Congresso	Percentual (%)
ICHQP	21
ENERGYCON	8
IEEE International IMTC	8
SBSE	8
Congresso Brasileiro de Metrologia	8
CPEM	4
International Conference on Electrical Power Quality	4
International Conference in Power System Protection	4
International Conference on Electric Utility Deregulation	4
Asia-Pacific Symposium on EMC	4
International Conference on Intelligent Networks	4
IEEE Power and Energy Society General Meeting	4
International Conference on Power Systems Transients	4
AMPS	4
Global EMC Conference	4
International Conference on Electronic Measurement	4

Com relação aos principais métodos encontrados na literatura para medição de harmônicos em alta tensão e avaliação da exatidão de transformadores de potencial em condições não senoidais, destacam-se a resposta em frequência (23 trabalhos) e caracterização metrológica multiharmônica, considerando efeitos não lineares e compensação destes efeitos (5 trabalhos). Além disso, a utilização de divisores de tensão capacitivos ou resistivos como sistemas de medição em condições não senoidais foi observada em 5 trabalhos.

## Capítulo 2

## Conceituação Teórica

O presente capítulo busca introduzir os conceitos teóricos necessários ao entendimento do trabalho. Na primeira seção são apresentados os principais conceitos de metrologia em alta tensão. Na seção seguinte, são abordados os conceitos básicos ligados ao processamento de sinais, utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. Na ultima seção são abordados conceitos estatísticos aplicados a incerteza das medições.

## 2.1 Metrologia em Alta Tensão em Corrente Alternada

Segundo a norma ABNT IEC 60060-2/2016 [2], Sistema de Medição em Alta Tensão (SMAT) é composto por um dispositivo de conversão da alta tensão para baixa tensão, um sistema de transmissão de sinais e um instrumento de medição, conforme apresentado na Figura 2.1.



Figura 2.1: Diagrama de Sistema de medição em alta tensão Adaptado de [4].

Para garantir a confiabilidade dos resultados de medição é necessário que o SMAT seja calibrado com um SMR. Esse Sistema de Referência deve estar inserido em uma cadeia de rastreabilidade, que é uma sequência de calibrações com uma incerteza estabelecida, utilizada para relacionar um resultado de medição a uma referência [21]. A estrutura hierárquica de rastreabilidade do sistema metrológico mundial é apresentada na Figura 2.2.



Figura 2.2: Hierarquia do Sistema Metrológico Mundial Adaptado de [4].

Conforme a Figura 2.2, o Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM) é res-

ponsável pelo topo da cadeia hierárquica metrológica, detendo os padrões mundiais. Os Institutos Nacionais de Metrologia detêm os padrões nacionais e possuem sistemas com as menores incertezas, ocupando o topo da cadeia de rastreabilidade em nível nacional e sendo responsáveis por disseminar a rastreabilidade metrológica aos laboratórios acreditados. Estes, por sua vez, fornecem rastreabilidade a laboratórios de ensaios e laboratórios industriais, que em geral possuem incertezas mais altas, ocupando a base da pirâmide. Medições rastreadas garantem a propriedade de comparabilidade entre resultados obtidos em diferentes partes do mundo, por possuírem como base a mesma referência mundial.

No Brasil, o Inmetro, por meio dos laboratórios da Diretoria de Metrologia Científica e Tecnologia (Dimci), é a entidade responsável pela padronização das unidades do Sistema Internacional de Unidades (SI) e manutenção da rastreabilidade dos padrões nacionais. No âmbito da Metrologia em Alta Tensão, o Lamat tem como missão proporcionar a rastreabilidade para medições em ATCA, através de serviços de calibração de instrumentos tais como fontes, divisores, TPs e quilovoltímetros [5]. A rastreabilidade em alta tensão alternada é garantida pelo Lamat até 200 kiloV, através da calibração de um sistema de medição composto por TP de referência e ponte de medição. As calibrações destes padrões são realizadas no Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Instituto Nacional de Metrologia Alemão, na frequência fundamental da rede elétrica, que no caso do Brasil é 60 Hz [5].

No que tange a calibração em alta tensão em outras faixas de frequência, como as frequências harmônicas, o Lamat possui em desenvolvimento um projeto intitulado "Rastreabilidade de Transdutores em Ampla Faixa de Frequência" cujo objetivo é a caracterização de transdutores envolvidos nos processos de medição em alta tensão, em uma ampla faixa de frequência, por meio de um sistema de medição de referência, capaz de identificar seu comportamento quando submetidos a harmônicos, com rastreabilidade metrológica. A caracterização metrológica de CVD para medição de harmônicos compõe parte deste projeto.

### 2.2 Medições com dispositivo de conversão

Para realização de medições em alta tensão CA, devido aos níveis adotados, é inviável a medição direta de tensão, sendo necessária a utilização de dispositivos de conversão, responsáveis por reduzir os níveis de alta tensão a valores compatíveis com instrumentos de medição, para diversas aplicações no sistema elétrico, como monitoramento, controle e
proteção da rede. Nesta seção serão abordados os detalhes técnicos do divisor de tensão capacitivo, transdutor a ser estudado para medições de harmônicos em alta tensão, com rastreabilidade metrológica, foco deste trabalho.

### 2.2.1 Divisor de Tensão Capacitivo

A operação de um Divisor de Tensão Capacitivo (CVD) depende basicamente da configuração entre duas impedâncias em série  $Z_{i_n}$  e  $Z_{out}$ , caracterizadas como unidades de alta e baixa tensão. Dependendo da aplicação, essas impedâncias podem ser resistivas, capacitivas ou mistas. A tensão é aplicada ao conjunto de impedâncias e reduzida a níveis passíveis de medição por instrumentos na saída do divisor. A Figura 2.3 apresenta o circuito equivalente de um divisor de tensão.



Figura 2.3: Modelo Divisor de Tensão Adaptado de [3].

A relação de transformação de tensão é conhecida como FE e pode ser obtida conforme equação 2.1.

$$FE = \frac{V_{in}}{V_{out}} \tag{2.1}$$

Para um CVD, pode-se adotar um modelo que considera as impedâncias como puramente capacitivas, tornando-se as reatâncias capacitivas  $X_{cin}$  e  $X_{cout}$ , respectivamente. Sendo as impedâncias em série, percorridas pela mesma corrente I e desprezando os efeitos de capacitâncias parasitas e fugas de corrente, o FE pode ser determinado pela equação 2.2:

$$FE = \frac{(X_{cin} + X_{cout})I}{(X_{cout})I}$$
(2.2)

Fazendo as devidas simplificacões, obtém-se a equação 2.3:

$$FE = \frac{C_{in} + C_{out}}{C_{in}} \tag{2.3}$$

No caso de medições de referência em alta tensão, para o módulo de alta tensão do divisor capacitivo, geralmente são utilizados capacitores de alta tensão ou buchas capacitivas de equipamentos de alta tensão, como transformadores. Para a unidade de baixa tensão, são utilizados capacitores ajustados para níveis de tensão compatíveis com o instrumento de medição a ser utilizado [22].

Os capacitores a gás comprimido são ideais para sistemas de medição de referência, como componentes do módulo de alta tensão de CVDs por sua estabilidade em capacitância e coeficiente de tensão reduzido. O isolamento deste tipo de divisor composto por capacitor de alta tensão geralmente consiste em papel impregnado de óleo ou filme plástico impregnado de gás [3]. A Figura 2.4 demonstra um capacitor com dielétrico Hexafluoreto de enxofre (SF6), utilizado em circuitos para medições em alta tensão.



Figura 2.4: Capacitor de Referência a gás SF6

Para compor o módulo de baixa tensão de divisores capacitivos, geralmente são utilizados capacitores padrão a ar. Estes capacitores possuem uma construção apropriada para medições de alta exatidão, com estabilidade de capacitância na faixa de 0,02 %. Estes capacitores possuem alta resistência de isolamento e reduzido fator de dissipação, possibilitando sua utilização em uma ampla faixa de frequência [23]. A Figura 2.5 apresenta capacitores a ar para medição em alta tensão.



Figura 2.5: Capacitores de Referência a ar

No que diz respeito ao comportamento de CVDs para medição de harmônicos, estudos realizados em [24], apresentaram uma comparação realizada entre o comportamento de TPs e o comportamento de um divisor de tensão capacitivo de 38 kV, com FE nominal de 1000:1, através do método da obtenção de resposta em frequência, na faixa de 20 Hz até 1 MHz. Os resultados obtidos apresentam variação máxima de 2% do FE nominal para o divisor de tensão capacitivo, com significativa linearidade na faixa de frequência analisada. Já os transformadores de potencial indutivos apresentaram comportamentos bem mais críticos, com variações de mais 50% no FE nominal.

# 2.3 Aquisição e Processamento de Sinais

Devido à exatidão necessária em sistemas de medição de referência, técnicas de medição por amostragem digital são amplamente utilizadas em metrologia elétrica, em diversas aplicações para medição de potência e energia, tensão elétrica, impedância e harmônicos, como pode ser observado em [25], [26], [27] e [28]. Sabe-se que, com o advento da tecnologia digital e a evolução dos computadores, essas técnicas fornecem reconstrução de sinais cada vez mais precisos e confiáveis em termos de estabilidade e repetibilidade, fundamentais em metrologia. Na aplicação direta em metrologia em alta tensão, como apresentado em 2.1, um sistema de medição em alta tensão (SMAT) além de um dispositivo de conversão, é composto por um instrumento de medição responsável pela leitura dos sinais em níveis reduzidos de tensão. O processo de aquisição de sinais precisa ser capaz de reproduzir o sinal proveniente do instrumento conectado ao dispositivo de conversão, da maneira mais fidedigna possível, a fim de minimizar erros de medição. Este tópico busca abordar a teoria relacionada à aquisição e processamento de sinais, apresentando também as ferramentas matemáticas que possibilitam identificar o espectro de fontes e transformadores de potencial, a fim de avaliar seu conteúdo harmônico.

### 2.3.1 Amostragem

Em condições específicas, é possível reconstruir completamente um sinal a partir de uma sequência de amostras. Essa técnica tem grande importância para a engenharia, com uma grande gama de aplicações.

Matematicamente, o teorema da amostragem pode ser compreendido através da abordagem por trem de impulsos. Considera-se um sinal de tempo contínuo x(t) que se deseja amostrar, multiplicado por uma função de amostragem, resultando no sinal de tempo discreto  $x_a(t)$  conforme equação 2.4. Neste caso um trem de impulsos periódico  $p_s(t)$ foi utilizado como função de amostragem, sendo o período  $T_s$  e  $\omega_s = \frac{2\pi}{T_s}$  a frequência de amostragem [29].

$$x_a(t) = x(t) \cdot p_s(t) \tag{2.4}$$

onde:

$$p_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s)$$
(2.5)

O sinal resultante é um sinal discreto, em que os valores das amostras são definidos por valores inteiros da variável inteira n, dado pela equação 2.6:

$$x_a(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s)\delta(t - nT_s)$$
(2.6)

No domínio da frequência é dado pela equação 2.7:

$$X_a(j\omega) = \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(j(\omega - k\omega_s))$$
(2.7)

Considerando-se x(t) um sinal de banda limitada com  $X(j\omega) = 0$  para  $|\omega| > \omega_N$ . O sinal x(t) pode ser reconstruído unicamente por suas amostras x(nT) se  $\omega_s > 2\omega_M$  onde  $\omega_s = 2\pi/T_s$ . A frequência  $\omega_N$  é conhecida como frequência de Nyquist [29].

# 2.3.2 Análises de Fourier para identificação de conteúdo harmônico

O nível de distorção harmônica presente no sinal proveniente de um dispositivo de conversão, utilizado para medições em alta tensão, pode ser quantificado por meio de ferramentas matemáticas como a série de Fourier e a transformada de Fourier.

Sabe-se, que qualquer sinal periódico pode ser decomposto por meio da série de Fourier, como o somatório de senóides em frequência fundamental, frequências múltiplas inteiras e uma componente contínua [29].

As equações para a aproximação de um sinal periódico f(t) de período T em série de Fourier são apresentas pelas equações 2.8 - 2.11, onde  $\omega_0 = 2\pi/T$ :

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [(a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)]$$
(2.8)

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$
 (2.9)

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(n\omega_0 t) dt$$
(2.10)

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) sen(n\omega_0 t) dt$$
(2.11)

Considera-se um sinal discretizado x[n] com duração finita. A partir deste sinal podese construir um sinal periódico x'[n], igual a x[n] com período N. Desta forma, quando N tende ao infinito, x'[n] = x[n] para valores finitos de n. A representação deste sinal em série de Fourier é dada pela equação 2.12:

$$x'[n] = \sum_{k=N} a_k e^{jk(2\pi/N)n}$$
(2.12)

Em que:

$$a_k = \frac{1}{N} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} x[n] e^{jk(2\pi/N)n}$$
(2.13)

A partir da representação em série de Fourier no tempo discreto é possível obter o

par de equações para a transformada de Fourier de tempo discreto, amplamente utilizada para converter um sinal discretizado obtido no domínio do tempo, para o domínio da frequência e vice-versa, de forma a conhecer os espectros de amplitude e fase dos sinais amostrados. As transformadas discreta direta e inversa de Fourier são definidas pelas equações 2.14 e 2.15:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j\omega n}$$
(2.14)

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega$$
(2.15)

A partir do espectro obtido através das ferramentas de Fourier é possível calcular alguns indicadores utilizados em engenharia elétrica para análise de distorção harmônica. Dentre eles, destacam-se a DHT e a DHI, definidas pelas equações 2.16 e 2.17:

$$DHT(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_{fund}} \times 100$$
 (2.16)

$$DHI(\%) = \frac{V_h}{V_{fund}} \times 100 \tag{2.17}$$

onde:

 $V_h$  é o valor eficaz da componente harmônica de ordem h do sinal amostrado;

 $V_{fund}$ é o valor eficaz da componente fundamental do sinal amostrado.

# 2.4 Estatística aplicada a medições em alta tensão

Um resultado de medição é um experimento aleatório e está sempre associado a uma variável aleatória, com uma determinada distribuição de probabilidade. Seja X uma variável aleatória que pode assumir o valor  $x_i$ . A probabilidade de um resultado possível para uma variável aleatória se repetir em experimentos distintos é  $P(X = x_i) = 0$ . Isto significa que um resultado de medição é sempre um conjunto de valores que podem ser atribuídos ao mensurando [21].

É possível calcular a probabilidade P(X) de uma variável aleatória contínua estar dentro de um intervalo (a < X < b), através da função densidade de probabilidade p(x). A probabilidade de  $x_i$  estar entre o intervalo é calculada pela área da curva da função p(x), como apresentado na Figura 2.6.



Figura 2.6: Função densidade de probabilidade

A integral definida entre os limites do intervalo representa matematicamente a área sob a curva entre os limites e é calculada na equação 2.18 [30].

$$P(a < X < b) = \int_{a}^{b} p(x)dx$$
 (2.18)

Considerando todos os valores possíveis de X,  $p(-\infty < X < +\infty) = 1$ , ou seja, há 100 % de probabilidade do valor de X se encontrar dentro da distribuição de probabilidades, no intervalo entre  $-\infty$  e  $+\infty$ . A distribuição de probabilidade que geralmente caracteriza a componente aleatória do resultado de medição é a distribuição normal ou gaussiana, cuja forma é apresentada na Figura 2.7 [30].



Figura 2.7: Distribuição Normal ou Gaussiana Adaptado de [30].

Na distribuição normal, a função densidade de probabilidade é simétrica em relação ao valor médio ( $\mu$ ) onde apresenta o maior valor. A área abaixo que contempla toda a

curva é unitária e a curva possui assíntotas no eixo horizontal nas duas extremidades. A distância medida horizontalmente entre os pontos de inflexão indicados na Figura 3.8 e a média caracteriza o desvio padrão da distribuição normal ( $\sigma$ ).

A Tabela 2.1 apresenta a área abrangida sob a curva da distribuição normal considerando diferentes limites de desvio padrão  $\sigma$  para o intervalo  $\mu \pm k\sigma$  [30].

k	Área entre µ $\pm$ k $\sigma$
1,000	$68{,}269\%$
1,6449	$90{,}000\%$
1,9600	$95{,}000\%$
2,0000	$95{,}450\%$
2,5758	99,000%
3,0000	99,730%

Tabela 2.1: Valores sob a área da curva da distribuição normal para o intervalo  $\mu \pm k\sigma$ 

O resultado de medição envolve medições repetidas de uma mesma variável aleatória em n experimentos distintos. Essas medições são amostras que apresentam características sobre o mensurando e o representam. Segundo o teorema central do limite, quanto maior o tamanho da amostra, mais a distribuição de probabilidades da média amostral se aproxima de uma distribuição normal. Portanto, a média da população ( $\mu$ ) que seria a média aleatória extraída de um número infinito de medições passa a ser representada pela média amostral e o desvio padrão amostral.

Um processo de medição engloba muitas variáveis aleatórias que podem afetar o valor do mensurando, além da que caracteriza sua variabilidade estatística. Mesmo após correções dos efeitos sistemáticos, o valor do mensurando é uma estimativa. A incerteza de medição é, portanto, o valor que caracteriza a dispersão em torno do qual se encontra o conjunto de valores atribuídos para um mensurando, sendo composta pela combinação das contribuições geradas por várias variáveis aleatórias, com diferentes distribuições de probabilidade [30]. Essas contribuições englobam, mas não se limitam à influência do metrologista, características metrológicas do equipamento utilizado, métodos de medição, condições ambientais e especificidades do mensurando. Nessa seção os dois principais métodos aplicados ao cálculo da incerteza de medição serão abordados.

### 2.4.1 Método de propagação de incertezas

O método de propagação das incertezas é um método clássico para avaliação da incerteza de medição proposto em [31] e baseia-se na propagação das incertezas das grandezas de influência em um resultado de medição. Este método considera, para medições indiretas, uma equação para modelar o mensurando, onde y representa uma estimativa do mensurando, utilizando estimativas das grandezas de entrada  $x_i$  e suas incertezas-padrão  $u(x_i)$ que contribuem no processo de medição. A incerteza padrão é o desvio padrão estimado associado a cada estimativa das grandezas de entrada. A estimativa do mensurando é obtida através da equação de medição 2.19:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \tag{2.19}$$

A equação de medição deve conter todas as correções e fatores de correção que contribuem para a incerteza do resultado. Contribuições de incerteza padrão do tipo A são derivadas da variabilidade aleatória de n observações individuais, repetidas e independentes durante o processo de medição, sendo caracterizada por desvios-padrão experimentais. A melhor estimativa disponível para o valor esperado de uma grandeza que varia de maneira aleatória, em que foram realizadas n observações  $q_k$ , sob as mesmas condições de medição, é a média aritmética ( $\overline{q}$ ), dada pela equação 2.20.

$$\overline{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} q_k \tag{2.20}$$

A estimativa da variância  $(s^2)$  caracteriza a dispersão dos n valores observados  $(q_k)$ em torno da média e é obtida pela equação 2.21:

$$s^{2}(q_{k}) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n} (q_{k} - \overline{q})^{2}$$
(2.21)

A variância da média é dada pela equação 2.22:

$$s^2(\overline{q_k}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \tag{2.22}$$

Sendo uma grandeza de entrada determinada por  $q_k$ , obtida por n repetições independentes, a incerteza padrão do tipo A  $(u(q_k))$  é dada pelo desvio padrão (s) da média de  $q_k$ , de acordo com 2.23:

$$u(q_k) = s(\overline{q_k}) \tag{2.23}$$

Para grandezas de entrada oriundas de outras fontes que não a variabilidade de observações repetidas, a incerteza-padrão é avaliada com base em dados disponíveis do sistema de medição como especificações, certificados de calibração, manuais, análises prévias, conhecimento sobre propriedades de materiais e condições ambientais. Essas incertezaspadrão são definidas como do tipo B.

De acordo com a Lei da propagação das incertezas, as N incertezas-padrão do tipo A e B contribuem para a incerteza-padrão do mensurando. No caso de grandezas de entrada não-correlacionadas e independentes, a incerteza-padrão combinada é dada pela equação 2.24:

$$u_{c}^{2}(y) = \sum_{i=1}^{N} (\frac{\partial f}{\partial x_{i}})^{2} u^{2}(x_{i})$$
(2.24)

onde:

 $u_c^2(y)$  é o quadrado da incerteza padrão combinada da grandeza y a ser determinada;

f é a equação de medição que relaciona y com as grandezas de entrada  $x_i$ ;

 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  é é a derivada parcial da função f em relação a grandeza de entrada  $x_i$ , conhecido como coeficiente de sensibilidade e descreve como a estimativa de saída é influenciada por variações na estimativa de entrada;

 $u(x_i)$  é a incerteza-padrão da grandeza de entrada  $x_i$ .

N é a quantidade de grandezas de entrada que contribuem para estimativa da incerteza do mensurando.

A incerteza combinada pode ser utilizada para expressar a incerteza de um resultado de medição, porém em alguns casos torna-se necessário expressar um intervalo que possa abranger uma fração de valores que podem ser atribuídos ao mensurando. Para estimar o fator de abrangência é necessário definir o nível de confiança para o intervalo y - U < y < y + U [30].

Em metrologia, geralmente para se obter uma maior exatidão com amostras finitas do que a distribuição normal, se utiliza a aproximação por uma distribuição t de Student, considerando um número efetivo de graus de liberdade  $v_{eff}$  e fator de abrangência k. Para cada incerteza-padrão de cada grandeza de entrada, um número de graus de liberdade  $v_i$ é associado. O número de graus de liberdade efetivos para a incerteza padrão combinada é calculado pela equação 2.25 de Welch-Satterthwaite [31].

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}}$$
(2.25)

A fim de quantificar o intervalo para a incerteza de medição utiliza-se a incerteza expandida U, que é obtida a partir do produto da incerteza padrão combinada  $u_c$  pelo fator de abrangência k, correspondente ao número de graus de liberdade  $v_{eff}$  obtido, conforme equação 2.26:

$$U = u_c(y) \cdot k \tag{2.26}$$

A Tabela 2.2 apresenta o fator da abrangência k de acordo com o número de graus de liberdade efetivos, para a probabilidade de 95,45 %.

Tabela 2.2: Valores de k para  $v_{eff}$ 

$v_{eff}$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	$\infty$
k	13,97	4,53	3,31	2,87	$2,\!65$	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

### 2.4.2 Método de simulação numérica para análise de incertezas

O Método de Monte Carlo se utiliza de recursos de simulação numérica, através de um número massivo de dados aleatórios a fim de obter conclusões sobre os fenômenos, por meio de análises estatísticas. A análise de incertezas pelo método Método de Monte Carlo é uma de suas principais aplicações na Metrologia, sendo bem estabelecido [32], [33], [34].

O método de Monte Carlo se distingue do ISO GUM, por utilizar o conceito de propagação das distribuições de probabilidade  $g(x_i)$  ao invés da propagação de incertezas  $u(x_i)$ das grandezas de entrada  $x_i$ . Isto possibilita que uma quantidade maior de informações, além da média e do desvio padrão seja utilizada na análise de incertezas.

Além disso, o método GUM apresenta algumas desvantagens em tratando-se de distribuições assimétricas das grandezas de entrada que não se aproximam da distribuição normal, modelos não lineares, fontes de incerteza com ordens de grandeza muito distintas umas das outras ou casos em que a incerteza de medição é obtida na mesma ordem de



grandeza do resultado [33]. A Figura 2.8 ilustra a principal distinção entre os métodos.

Figura 2.8: Método de propagação de incertezas (a); método de Monte Carlo (b) Adaptado de [30].

O método de Monte Carlo é baseado na definição de um modelo matemático que caracterize o comportamento do mensurando, relacionando-o com as grandezas de entrada  $x_i$  e suas distribuições de probabilidade  $g(x_i)$ . A partir desse modelo, um número aleatório é gerado para cada grandeza com distribuição de probabilidade e incerteza . Estes dados são aplicados na equação do modelo, a fim de obter o valor do mensurando. O processo é repetido n vezes, e posteriormente os valores obtidos são analisados estatisticamente, sendo possível obter o histograma, a média, a incerteza padrão, obtida como o desviopadrão dos valores gerados e os limites que correspondem ao intervalo de abrangência [32].

O número de simulações Monte Carlo  $(n_{MC})$  é definido pela exatidão requerida, com a probabilidade de abrangência PA desejada para expressar a incerteza de medição, conforme equação 2.27 [30].

$$n_{MC} = \frac{1}{1 - PA} \tag{2.27}$$

Após a obtenção do vetor de pontos simulados para o mensurando, deve-se ordenar o vetor de forma crescente  $y_0(xi)$ . A faixa que caracteriza a incerteza de medição é determinada através dos limites superior  $L_S$  e inferior  $L_I$ , expressos pelas equações 2.28 e 2.29:

$$L_I = y_0(ii) \tag{2.28}$$

$$L_S = y_0(is) \tag{2.29}$$

Em que:

$$ii = int[\frac{a}{2}n_{MC}] \tag{2.30}$$

$$is = int[(1 - \frac{a}{2})n_{MC}]$$
 (2.31)

a = 1 - PA é o nível de significância para a probabilidade de abrangência PA.

Neste trabalho o método de Monte Carlo foi utilizado para obtenção da incerteza de medição da curva de ajuste dos dados do FE do CVD em função da frequência.

# 2.5 Conclusões parciais

Este Capítulo apresentou os conceitos relacionados ao sistema de medição utilizado, teoria de processamento de sinais e metrologia em alta tensão, necessários ao desenvolvimento da pesquisa, além de estatística aplicada a estimativa da incerteza de medição.

# Capítulo 3

# Caracterização Metrológica de Divisor de Tensão Capacitivo em frequência

A fim de caracterizar metrologicamente o FE de um sistema capaz de realizar medições de sinais de tensão com rastreabilidade metrológica e que possa ser utilizado para obtenção do espectro harmônico de fontes, transformadores de potencial ou outros dispositivos de conversão foi realizado um método que consiste na determinação por meio de entrada e saída de tensão do FE, alimentando um divisor capacitivo em diferentes frequências, variando do  $2^{\circ}$  ao  $50^{\circ}$  harmônico de 60 Hz. O método é detalhado neste Capítulo.

# 3.1 Características Técnicas do Sistema de Medição

### 3.1.1 Divisor de tensão capacitivo

O sistema de medição caracterizado é composto por um capacitor SF6 de 200 kV e um capacitor a ar de 10 F de 1 kV, compondo um divisor capacitivo. O capacitor SF6 é utilizado como módulo de alta tensão, ou seja, recebe a alimentação direta em alta tensão, enquanto o capacitor a ar atua como módulo de baixa tensão, onde instrumentos para medição dos sinais de tensão são acoplados. O divisor é apresentado na Figura 3.1.



Figura 3.1: Divisor de tensão Capacitivo

Dentre as características técnicas do capacitor a gás, destacam-se os eletrodos internos. O capacitor é composto por um eletrodo de alta tensão para alimentação dos circuitos em alta tensão (1), eletrodos de medição (2-3) para aquisição de sinal em baixa tensão, eletrodo de terra (E) e guarda (0). Estes eletrodos compõem capacitâncias internas, sendo C12 e C13 utilizadas para medição e, C10 e C1E, capacitâncias parciais utilizadas para proteção e redução de efeitos de capacitâncias parasitas e interferências [35]. A configuração interna do capacitor de alta tensão é detalhada na Figura 3.2.



Figura 3.2: Configuração Interna do Capacitor SF6 Adaptado de [35].

Já os capacitores a ar possuem 3 eletrodos, compondo a capacitância de medição

 $C_{cal}$  e as capacitâncias parciais  $C_p$ , conforme diagrama apresentado na Figura 3.3. Para medições de alta exatidão, recomenda-se o uso de  $C_{cal}$  como capacitância principal.



Figura 3.3: Configuração Interna do Capacitor a ar Adaptado de [23].

## 3.1.2 Calibrador Multifunção Fluke 5730A

O calibrador Multifunção 5730A, fabricante Fluke, é uma fonte programável de tensão CA, com saída até 1100 V, faixa de frequências de 10 Hz a 1 MHz. O calibrador foi utilizado para alimentação do circuito de 60 Hz a 3 kHz , sendo utilizadas as faixas de 220 V e 1100 V, em tensão alternada. Para a faixa de 1100 V, a estabilidade em tensão CA é de  $85 \,\mu\text{V/V}$  da saída + 4 mV. Já para a faixa de 220 V, a estabilidade em tensão CA é de  $65 \,\mu\text{V/V}$  da saída + 0,7 mV. [36].



Figura 3.4: Calibrador Multifunção 5730A Fonte: [36].

## 3.1.3 Amplificador Fluke 5725A

O amplificador Fluke 5725A é uma unidade externa que opera sob o controle do calibrador, estendendo os recursos de acionamento de tensão CA. Os limites de frequência em tensões

mais altas aumentam para 100 kHz a 750 V e 30 kHz a 1100 V. Há também aumento no limite de carga para 70 mA, para frequências acima de 5 kHz [37]. Este equipamento foi utilizado a fim de alcançar a frequência de 3 kHz, na tensão de 700 V, aplicada ao circuito.



Figura 3.5: Amplificador 5725A Fonte: [37].

## 3.1.4 Multimetro Digital 3458A

Os multímetros utilizados são do modelo Keysight/Agilent 3458A de alta exatidão, 8,5 dígitos, True RMS, sendo utilizados de maneira consolidada em metrologia elétrica, em trabalhos para medição de tensão, corrente e resistência elétrica, devido a sua estabilidade na referência interna de tensão e resistência [38].

Neste trabalho, os multímetros podem ser considerados os principais instrumentos utilizados para caracterização dos CVDs, pois são responsáveis pela amostragem dos sinais de tensão elétrica de entrada e saída do divisor de tensão respectivamente, por meio de interface *General Purpose Interface Bus* (GPIB). A Figura 3.6 apresenta o painel frontal do 3458A. A faixa de operação em Tensão CA varia de 1 mV a 1000 V, com melhor especificação de estabilidade no modo DCV menor que 0,001 % da faixa por ano.



Figura 3.6: Painel Frontal do Multímetro 3458A

# 3.2 Método de Medição

O método de caracterização do sistema de medição de harmônicos utilizada consiste na determinação do FE por meio de entrada e saída de tensão, alimentando os divisores capacitivos em diferentes frequências harmônicas em baixa tensão e obtendo as tensões de saída. Neste caso, o sistema de medição é considerado um sistema do tipo "caixa preta". A fim de avaliar o comportamento do FE em uma determinada frequência  $\omega$ , pode-se definir a equação 3.1:

$$FE(\omega) = \frac{V_{in}(\omega)}{V_{out}(\omega)}$$
(3.1)

Onde:

 $V_{in}$  é a tensão de alimentação medida na entrada do CVD;

 $V_{out}$  é a tensão medida na saída do CVD;

O detalhamento do método é disposto nas seções seguintes.

### 3.2.1 Sistema de medição

O CVD foi alimentado em 200 V e 700 V por um Calibrador Multifunção modelo Fluke 5730A, acoplado a um amplificador Fluke 5725A, a fim de analisar o comportamento do FE, com aplicação de um sinal senoidal, na faixa de frequências de 60 Hz a 3 kHz, conforme 3.1 e 3.2.

Tendo em vista a aplicação do sistema para medições de harmônicos em alta tensão e visando manter as condições reais de operação, as medições foram realizadas na área de testes do Lamat, com o sistema de aterramento principal de alta tensão e um cabo de medição BNC de 10 metros. Foram utilizados dois multímetros digitais modelo 3458A, para leituras de tensão de entrada e saída do CVD.

A temperatura e umidade relativa foram mantidas em 23 °C  $\pm$  2 °C e < 65 % U.R, conforme especificações dos procedimentos de calibração do laboratório. A Figura 3.7 mostra o diagrama com os equipamentos utilizados e a Figura 3.8 apresenta o circuito do sistema de medição.



Figura 3.7: Diagrama de medição FE por entrada e saída de tensão



Figura 3.8: Circuito para caracterização metrológica do Sistema de Medição

### 3.2.2 Amostragem com software TWM

As medições foram realizadas de maneira simultânea e automática, através do *software* TWM, desenvolvido e validado pelo Euramet, para amostragem com multímetros 3458A [39]. A tela de operação inicial do *software* é apresentada na Figura 3.9.

		TW	M - TracePQM Wattmeter
Edit Operate Tools Wi	ndow Help		
6⊃ Digitizer	RFADY		Server
Corrections RAW QWTB	START SETUP MEASUREMENT ST	ART SETUP & STOP	
Measurement selection	Selected measurement:	Algorithm selection Current: TWM-FPNLSF	
Max. shown dimension	Uncertainty display Res. order mode	Phase mode Ref. channel	Select quantities
Scalar V	None Group quantities Convert amplitude	± pi [rad] v None v	Select all A
Current result	V Amplitude V	10	Å
Info: Note: Results (right click to table to	o show actions)	Ĵ.	ofs
		^	
¢		v	~

Figura 3.9: Tela principal do TWM Fonte: [39].

A amostragem foi realizada através do TWM com o algoritmo *Windowed FFT for harmonic Analysis* (WFFT), no método de amostragem DCV, com 5000 amostras e a frequência de amostragem foi ajustada a fim de atender o teorema de Nyquist, tendo como valor mínimo o dobro da frequência máxima do sinal que se deseja avaliar. Neste método de amostragem, o múltimetro realiza medições em tensão em *corrente contínua* (CC) e o algoritmo é responsável pela reconstrução do sinal em tensão CA. A largura de banda é de 150 kHz e a frequência de amostragem máxima é de 100 kSa/s, com a resolução limitada a 15 bits.

O algoritmo fornece como resultado as amostras, o valor rms e a amplitude da tensão do sinal amostrado, valores de frequência e componentes harmônicas. Foram realizados 15 ciclos de medição, com intervalo de 10 segundos para cada frequência. A Figura 3.10 ilustra a tela de seleção do algoritmo e a Figura 3.11 apresenta a tela de definição dos parâmetros de amostragem.

AW command QW ist of algorithms IVM-WFFT: Windowed F	FT for harmonic analysis.			T C R	LOAD ALGS	Description
ariable description Name of window function	1					addition to an give indexent in taken to a analysis using windowed FFT. The algorithm performs windowed FFT of the signal, applies TVM corrections and extracts FFT bin(s) with selected frequencies. It also calculates rms value estimate, however rms will be usable only for coherent sampling. The main purpose of the algorithm is interchange (base aid)?
Algorithm expects t Algorithm supports arameters of the algorith	two input (U and I) differential transducer conne m	ection		💥 р/	CLEAR	and voltage ratio analysis. That will work even for non-coherent sampling, when non- rectangular window is used.
	value					
f_nom (opt.)	1000					<u>×</u>
h_num (opt.)						Note
window (opt.)	flattop_248D					Note the harmonics spacing in the spectrum must be higher, then width of the selected windowi E.g. the wide flattop_2480' needs at least some 25 FFT bins spacing.
					_	Citation -
					_	-
4					×	
ncertainty calculation m SUF	ede Level of Confid	ence [%] Monte	Carlo cycles Proc	cessing timeout [s]	Time-stamps Relative to 1	handing . record  Multicore
Start offeat [cample]		Input data length	[samples]	o data ran dt iust ooor	ubao al racorde	ter man red

Figura 3.10: Tela de seleção de algoritmo Fonte: [39].

le Edit View Proje	t configuration ct Operate Tools Window	Heb
Voltage range sele Keep defaults	ction	PROCESSING SETUP
0	0	Sampling Setup Assistant
Frequency	·	Measurement comment
Sampling rate [Hz] (-) 50000 Aperture [s] (-) 0	Sampling rate range [Hz]           50k         15M           Aperture range [s]         0	test measurement comment can be multiple lines
Samples count	Max. samples count 2G Max. time [s] 40k	Use following variables in the name base: %id% - measurement number in format DDDD %date% - date of the measurement YYYYMMDD %time% - time of the measurement HH-MM-SS Example: my_measurement_%id%
Repetition cycles	Repetition setting [s]	Folder for measurements data files
Trigger mode	Level [V]	A G: Work/AM/2/pata Measurement name base spec_hv2_open_n10V 24207
Trigger slope POS	Trigger coupling	Full measurement base path preview & G: \work\AFM2\data\spec_hv2_open_n10V\session.info

Figura 3.11: Configuração dos parâmetros de amostragem Fonte: [39].

# 3.2.3 Sincronização

As medições do sinal de entrada e saída de tensão são realizadas de maneira síncrona, através do método *Mestre-Escravo*. Neste método um multímetro denominado *Mestre* envia um pulso de *trigger* ao outro multímetro, denominado *Escravo*, que recebe o comando e inicia a medição. O *trigger* neste caso indica o momento em que a digitalização do sinal deve iniciar. As configurações dos endereços dos multímetros e do modo de sincronização são apresentados na Figura 3.12.

	inscope on our ouring	
gitizer type	DMM Channels	AWG type
458A 💌	VISA & GP181::15::INSTR Range (Vok)	Tektronix AFG3101C
escription		AWG VISA
n this mode MASTER unit's	VISA 🔓 GP180:: 16::INSTR 💌 Range [Vpk] 🕣 1 🗰 🦝 🙅	GP181::11::INSTR
ample clock is generated by its	VISA 🐇 💌 Range (Vpk) 🗍 1 🗰 🐼 😥	Use external 10 MHz for AWG
ASTER unit via their EXT TRIG	ures L W Rama Divit / L W To Ja	Counter type
put.	And the state that at the state	Picotest U6200A
	VISA 🖞 💌 Range [Vpk] 🖉 1 🗰 🥁	Counter VISA
		19
	VISA 🐇 💌 Range [Vpk] 🥑 1 🗰 🛣 💇	Annotation to address that
		fs < 7 [Hz] Aperture [s]
	CLEAR LIST REMOVE LAST	Sk 102u
		10k 70u
	DMM descriptor mode DMM digitizing mode	100k 1.4u
	Synchronization mode	
	MASTER-SLAVE, MASTER dooled by TIMER	Anather schedus and
	Use streaming mode Measure temperature Disable display	Aperture selection mode
		1.000
	Identification/Status:	
Di device close		
Delay [s]		
30		
Force reset on open		

Figura 3.12: Configuração dos multímetros e método de sincronização

Através do comando *EXT*, o multímetro *Escravo* é acionado por meio de um pulso aplicado ao conector *Ext Trig* localizado em seu painel traseiro. No caso do método *Mestre-Escravo*, este pulso é gerado pelo próprio multímetro *Mestre*, através do comando *Ext Out*, que programa o mesmo para utilizar sua base de tempo interna, a fim de sincronizar equipamentos externos. A Figura 3.13 apresenta a conexão de *trigger* externo.



Figura 3.13: Conexão de trigger nos multímetros 3458A (Mestre-Escravo)

# 3.3 Considerações sobre o Sistema de Medição

# 3.3.1 Variação na Capacitância do Capacitor SF6 em função da tensão

Um ponto relevante a ser considerado na utilização de capacitores padrão SF6 está relacionado à variação de sua capacitância com a tensão. A calibração desses equipamentos geralmente é realizada em baixa tensão, sendo necessário conhecer a variação de sua capacitância quando utilizados em aplicações em alta tensão. A influência da tensão no valor de capacitância ocorre devido à deformação de seus eletrodos. Os eletrodos internos são montados em um tubo na base, que também atua como blindagem para os cabos. Se os eixos dos eletrodos estiverem centralizados, a força resultante é anulada. Contudo, com a elevação de tensão, os eixos dos eletrodos podem ser deslocados devido à ação da força elétrica, resultando em variações de capacitância [40].

Em estudos realizados em [41] e [42], foi observado que o valor da capacitância obtido em baixa tensão em capacitor SF6 não apresentou variações maiores que 15  $\mu$ F/F em níveis até 40% da tensão nominal, sendo seu valor de calibração em baixa tensão suficiente, desde que esta variação seja considerada na contribuição da incerteza de medição. No caso do sistema de medição utilizado, os valores de FE obtidos em baixa tensão podem ser utilizados para medição de harmônicos em alta tensão até 80 kV, devido a limitações da variação da capacitância com a tensão e limites de medição dos multímetros. A capacitância do capacitor SF6 foi calibrada em baixa tensão [43] e os resultados considerados na incerteza de medição.

# 3.3.2 Variação na capacitância de capacitores de referência em função da temperatura

Outro ponto a ser considerado é a variação na capacitância com a temperatura ambiente. Para medições de alta exatidão, a temperatura pode causar variações na dimensão dos eletrodos, alterando a capacitância dos capacitores que compõem o divisor capacitivo. Estudos realizados em [44], apresentam a variação de capacitância com a temperatura para capacitores SF6 em torno de 24  $\mu$ F/(F°C). Esse valor foi considerado como contribuição na incerteza de medição. No caso de capacitores a ar, foi considerado um coeficiente de temperatura de 30  $\mu$ F/(F°C), conforme especificação do fabricante [23].

### 3.3.3 Capacitâncias parasitas

Outro aspecto a ser considerado na caracterização de divisores de tensão diz respeito a indutância de componentes e cabos e capacitâncias desviadas para o solo e para os eletrodos. As capacitâncias parasitas podem afetar o comportamento do FE na frequência. A Figura 3.14 apresenta o diagrama esquemático [3], onde  $C_e$  representa as capacitâncias parasitas,  $C_1$  e  $C_2$  são as capacitâncias do módulos de alta e baixa tensão do CVD, respectivamente. Em particular para altas frequências, a corrente pode fluir através de  $C_e$ , não atingindo a capacitância  $C_2$  e, portanto, alterando o resultado da medição.



Figura 3.14: Representação de capacitâncias parasitas em um CVD Adaptado de [3].

De forma a minimizar estes efeitos, foi realizada a caracterização metrológica de todo o sistema de medição, incluindo cabos e adaptadores de forma conjunta. A medição deve ser reproduzida sob as mesmas condições de comprimento de cabos e conectores, o mais próximo possível de sua utilização, de forma a garantir a validade dos resultados.

# 3.4 Resultados do Fator de Escala

Através do algoritmo de amostragem, foi possível obter os sinais de tensão de entrada  $(V_{in})$ e saída  $(V_{out})$  do CVD e calcular o FE para cada ponto de frequência, conforme equação 3.1. A rastreabilidade metrológica dos resultados é garantida através da calibração dos multímetros aos padrões de referência do Inmetro.

Com o objetivo de analisar a influência da tensão primária no FE do divisor capacitivo, foram realizadas medições em 200 V = 700 V. A Figura 3.15 apresenta o gráfico da forma de onda das tensões amostradas de entrada e saída na frequência de 180 Hz em 200 V, a

fim de demonstrar os dados obtidos pelo algoritmo. O Plot 1 na cor branca refere-se a tensão de entrada  $(V_{in})$  e o Plot 2 em vermelho refere-se a tensão de saída  $(V_{out})$ , reduzida pelo CVD.



Figura 3.15:  $V_{in} \in V_{out}$  amostradas com TWM em 180 Hz

Os resultados obtidos para o FE, com a respectiva incerteza  $U_{FE}$  e incerteza relativa  $U_{FE}(\%)$  para cada frequência estão apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2. Os resultados apresentados já foram corrigidos de acordo com os certificados de calibração dos multímetros.

Freq (Hz)	$V_{in}~({ m V})$	$V_{out}$ (V)	$\mathbf{FE}$	$U_{FE}$	$U_{FE}~(\%)$
60	199,914	1,641	121,851	0,023	0,019
120	199,939	$1,\!674$	119,460	0,022	0,018
180	199,947	$1,\!680$	119,006	0,022	0,018
240	199,955	$1,\!682$	118,845	0,022	0,018
300	199,962	1,684	118,771	0,022	0,018
360	199,966	1,684	118,727	0,022	0,018
420	199,971	$1,\!685$	118,701	0,022	0,018
480	199,975	$1,\!685$	118,683	0,022	0,018
540	199,979	$1,\!685$	118,671	0,022	0,018
600	199,928	$1,\!685$	118,660	0,022	0,018
660	199,933	$1,\!685$	118,654	0,022	0,018
720	199,941	$1,\!685$	118,650	0,022	0,018
780	199,946	$1,\!685$	118,647	0,022	0,018
840	199,951	$1,\!685$	118,643	0,022	0,018
900	199,958	$1,\!685$	118,648	0,022	0,018
1200	199,961	$1,\!686$	118,631	0,022	0,018
1620	199,962	$1,\!686$	118,623	0,022	0,018
1800	199,968	$1,\!686$	118,622	0,022	0,018
2400	199,970	$1,\!686$	118,621	0,022	0,018
3000	199,971	$1,\!686$	118,613	0,022	0,018

Tabela 3.1: Resultados FE 200 V

Freq (Hz)	$V_{in}~({ m V})$	$V_{out}$ (V)	FE	$U_{FE}$	$U_{FE}~(\%)$
60	699,751	5,741	121,887	0,023	$0,\!019$
120	699,941	5,862	119,401	0,022	0,018
180	699,926	5,882	118,986	0,022	0,018
240	$699,\!935$	$5,\!890$	118,842	0,022	0,018
300	699,930	$5,\!893$	118,770	0,022	0,018
360	699,931	$5,\!895$	118,731	0,022	0,018
420	699,940	$5,\!896$	118,707	0,022	0,018
480	699,934	$5,\!897$	118,691	0,022	0,018
540	699,932	5,897	118,683	0,022	0,018
600	699,931	5,898	118,668	0,022	0,018
660	699,836	5,897	118,668	0,022	0,018
720	699,932	$5,\!899$	118,659	0,022	0,018
780	699,939	$5,\!899$	118,653	0,022	0,018
840	699,937	$5,\!899$	118,649	0,022	0,018
900	699,931	$5,\!899$	118,647	0,022	0,018
1200	699,936	$5,\!900$	118,637	0,022	0,018
1620	699,937	$5,\!900$	118,630	0,022	0,018
1800	699,933	$5,\!900$	118,626	0,022	0,018
2400	699,944	5,901	118,622	0,022	0,018
3000	699,931	5,901	118,618	0,022	0,018

Tabela 3.2: Resultados FE 700 V

A Figura 3.16 apresenta o comportamento do FE do Sistema de Medição na faixa de frequência analisada para as tensões de 200 V e 700 V. Pode-se verificar através da curva que o comportamento do FE apresenta uma redução com o aumento da frequência até 300 Hz. A partir desta frequência há uma estabilização, com variações < 0,003% entre as frequências de 2400 Hz e 3000 Hz.



Figura 3.16: Comportamento do FE em frequência – comparativo 200 V e 700 V

Verifica-se que mesmo com a variação na tensão de entrada, o comportamento da curva do FE em frequência se manteve o mesmo para ambas as tensões. Na faixa de frequências analisada, o aumento da tensão de entrada implicou em uma variação menor que 0,03 % no para os dois níveis de tensão, com maior variação na frequência de 60 Hz. Segundo [45], a estabilidade do FE de um sistema de medição não pode variar mais de 2 % dentro da faixa de tensão utilizada, temperatura ambiente e umidade. Neste caso, a comparação entre as tensões foi considerada satisfatória, pois a diferença entre os resultados obtidos do FE para as tensões de 200 V e 700 V foi inferior a 1 %. A Tabela 3.3 apresenta a variação  $\Delta$ FE (%) entre as tensões de 200 V e 700 V.

Freq (Hz)	FE (200V)	FE (700V)	$\Delta \mathrm{FE}~(\%)$
60	121,851	121,887	0,0297
120	119,460	119,401	-0,0492
180	119,006	118,986	-0,0163
240	118,845	118,842	-0,0028
300	118,771	118,770	-0,0008
360	118,727	118,731	0,0034
420	118,701	118,707	0,0056
480	118,683	118,691	0,0064
540	118,671	118,683	0,0105
600	118,660	118,668	0,0071
660	118,654	118,668	0,0121
720	118,650	118,659	0,0074
780	118,647	118,653	0,0053
840	118,643	118,649	0,0051
900	118,648	118,647	-0,0009
1200	118,631	118,637	0,0048
1620	118,623	118,630	0,0056
1800	118,622	118,626	0,0039
2400	118,621	118,622	0,0004
3000	118,613	118,618	0,0043

Tabela 3.3: FE CVD em frequência – comparativo 200V e 700V

# 3.5 Estimativa da Incerteza de Medição do Fator de Escala

# 3.5.1 Modelo de Medição

Para determinar a incerteza do FE através da medição de entrada e saída de tensão foi utilizado o método de propagação das incertezas. O modelo matemático que expressa o valor do FE é apresentado na equação 3.2:

$$FE(\omega) = \frac{V_{in}(\omega)}{V_{out}(\omega)}$$
(3.2)

Sendo:

$$V_{in} = V_{inmed} + \delta_{repin} + \delta_{calin} + \delta_R in + \delta_{Din}$$
(3.3)

$$V_{out} = V_{outmed} + \delta_{repout} + \delta_{calout} + \delta_{Rout} + \delta_{Dout} + \delta_{\Delta T_{CAT}} + \delta_{\Delta T_{CBT}} + \delta_{\Delta V_{CAT}}$$
(3.4)

Em que:

FE é o Fator de escala do CVD na frequência  $\omega$ ;

 $V_{inmed}$  é a tensão de entrada do CVD medida;

Voutmed é a tensão de saída do CVD medida;

 $\delta_{repin} \in \delta_{repout}$  são os desvios referentes a repetibilidade da medição de  $V_{inmed} \in V_{outmed}$ , respectivamente;

 $\delta_{calin} \in \delta_{calout}$  são os desvios referentes a incerteza de calibração dos multímetros 3458A;

 $\delta_{Rin}$  e  $\delta_{Rout}$  são os desvios referente a resolução dos multímetros 3458A;

 $\delta_{Din} \in \delta_{Dout}$  são os desvios referente à derivas dos multímetros 3458A;

 $\delta_{\Delta T_{CAT}}$  e  $\delta_{\Delta T_{CBT}}$  são os desvios referentes à variação de capacitância, devido a variação de temperatura dos capacitores dos módulos de alta e baixa tensão do CVD;

 $\delta_{\Delta V_{CAT}}$  é o desvio referente à variação de capacitância, devido a variação de tensão do módulo de alta tensão do CVD;

### 3.5.2 Estimativa da incerteza da Tensão de Entrada

Através da lei de propagação de incertezas, a estimativa da incerteza padrão combinada para a tensão de entrada  $V_{in}$ , é determinada pela equação 3.5:

$$u_{Vin}^{2} = u_{repin}^{2} + u_{calin}^{2} + u_{Rin}^{2} + u_{Din}^{2}$$
(3.5)

Onde:

 $u_{repin}$  é a incerteza-padrão referente a repetibilidade da medição de  $V_{in}$ ;

 $u_{calin}$  é a incerteza-padrão referente a incerteza de calibração do multímetro 3458A utilizado para medição de  $V_{in}$ ;

 $u_{Rin}$  é a incerteza-padrão referente a resolução do multímetro 3458A utilizado para medição de  $V_{in}$ ;

 $u_{Din}$  é a incerteza-padrão referente a deriva do multímetro 3458 A utilizado para medição de  $V_{in}$ .

### 3.5.2.1 Repetibilidade - $u_{repin}$

Foram realizadas 15 leituras para cada ponto de frequência na entrada do CVD. A dispersão entre as leituras foi considerada como componente da incerteza por meio do desvio padrão da média (S). A incerteza padrão devido a repetibilidade das medições é calculada pela equação 3.6, com grau de liberdade v = N - 1, onde N é número de medições repetidas.

$$u_{repin} = \frac{S}{\sqrt{N}} \tag{3.6}$$

### 3.5.2.2 Certificado 3458A - $u_{calin}$

A incerteza padrão na medição da tensão de entrada, devido a calibração do multímetro 3458A, foi calculada através da incerteza expandida do certificado de calibração  $(U_{calin})$ [46] dividida pelo respectivo k, conforme Tabela 2.2, para a probabilidade de 95,45%. A equação 3.7 apresenta a incerteza devido a calibração do multímetro:

$$u_{calin} = \frac{U_{calin}}{k} \tag{3.7}$$

#### 3.5.2.3 Resolução 3458A - $u_{Rin}$

A incerteza padrão devido a resolução (R) do multímetro 3458A para a medição da tensão de entrada foi calculada com distribuição retangular e grau de liberdade  $v = \infty$ , conforme equação 3.8:

$$u_{Rin} = \frac{R/2}{\sqrt{3}} \tag{3.8}$$

#### 3.5.2.4 Deriva 3458A - $u_{Din}$

A deriva (D) do multímetro 3458A foi obtida do manual do fabricante [38]. A incerteza padrão foi calculada com distribuição retangular e grau de liberdade  $v = \infty$ , conforme equação 3.9:

$$u_{Din} = \frac{D}{\sqrt{3}} \tag{3.9}$$

A Figura 3.17 apresenta, em forma de gráfico de barras, as principais contribuições de incerteza na medição na tensão de entrada  $V_{in}$  do CVD, na frequência de 60 Hz.



Figura 3.17: Contribuições para incerteza de  $V_{in}$  60Hz

A contribuição de maior peso na incerteza da tensão de entrada  $V_{in}$  foi a incerteza da calibração do multímetro 3458A, por conta da faixa de tensão de 1000 V. Uma forma de reduzir a contribuição seria utilizar outro divisor de tensão na saída do CVD, a fim de alcançar uma melhor faixa do 3458A.

### 3.5.3 Estimativa da incerteza da Tensão de Saída $V_{out}$

Através da lei de propagação de incertezas, a estimativa da incerteza padrão combinada para a tensão de saída  $V_{out}$  é dada pela equação 3.10:

$$u_{Vout}^{2} = u_{repout}^{2} + u_{calout}^{2} + u_{Rout}^{2} + u_{Dout}^{2} + u_{\Delta T_{CAT}}^{2} + u_{\Delta T_{CBT}}^{2} + u_{\Delta V_{CAT}}^{2}$$
(3.10)

Onde:

 $u_{repout}$  é a incerteza-padrão referente a repetibilidade da medição de  $V_{out}$ ;

 $u_{calout}$  é a incerteza-padrão referente a incerteza de calibração do multímetro 3458A utilizado para medição de  $V_{out}$ ;

 $u_{Rout}$  é a incerteza-padrão referente a resolução do multímetro 3458A utilizado para medição de  $V_{out}$ ;

 $u_{Dout}$  é a incerteza-padrão referente a deriva do multímetro 3458A utilizado para medição de  $V_{out}$ ;

 $u_{\Delta T_{CAT}}$  e  $u_{\Delta T_{CBT}}$  são as incertezas-padrão referentes a variação da capacitância dos módulos de alta e baixa tensão, devido a variação de temperatura, respectivamente;

 $u_{\Delta V_{CAT}}$  é a incerteza-padrão referente a variação da capacitância do capacitor do módulo de alta tensão, devido a variação de tensão.

### 3.5.3.1 Repetibilidade - $u_{repout}$

Foram realizadas 15 leituras para cada ponto de frequência na saída do CVD. A dispersão entre as leituras foi considerada como componente da incerteza por meio do desvio padrão da média (S). A incerteza padrão da média das indicações é calculada pela equação 3.11, com grau de liberdade v = N - 1, onde N é número de medições repetidas.

$$u_{rep} = \frac{S}{\sqrt{N}} \tag{3.11}$$

#### 3.5.3.2 Certificado 3458A - $u_{calout}$

A incerteza padrão na medição da tensão de entrada devido a calibração do multímetro 3458A foi calculada através da incerteza expandida do certificado de calibração  $(U_{calout})$ [47] dividida pelo respectivo k, conforme Tabela 2.2, para a probabilidade de 95,45%. A equação 3.12 apresenta a incerteza devido a calibração do multímetro:

$$u_{calout} = \frac{U_{calout}}{k} \tag{3.12}$$

### 3.5.3.3 Resolução 3458A - $u_{Rout}$

A incerteza padrão devido a resolução R do multímetro 3458A para a medição da tensão de entrada foi calculada com distribuição retangular e grau de liberdade  $v = \infty$ , conforme equação 3.13:

$$u_R = \frac{R/2}{\sqrt{3}} \tag{3.13}$$

#### 3.5.3.4 Deriva 3458A - $u_{Dout}$

A deriva do multímetro 3458A foi obtida do manual do fabricante [38]. A incerteza padrão foi calculada com distribuição retangular e grau de liberdade  $v = \infty$ , conforme equação 3.14:

$$u_D = \frac{D}{\sqrt{3}} \tag{3.14}$$

# 3.5.3.5 Variação da capacitância devido a variação de Temperatura nos módulos de baixa e alta tensão - $u_{\Delta T}$

Para consideração do efeito da variação de temperatura na capacitância do módulo de baixa tensão  $(u_{\Delta T}(C_{BT})$  do CVD foi utilizado coeficiente de temperatura do capacitor a ar, especificado pelo fabricante de 30  $(\mu F/F)^{\circ}C$  [23].

A incerteza-padrão associada é dada pela equação 3.15:

$$u_{\Delta T}(C_{BT}) = (\gamma_{CBT} \cdot \Delta T \cdot C_{BT}) \cdot C_{i(CBT)}$$
(3.15)

Onde:

 $\Delta T$  é a variação da temperatura ambiente;

 $\gamma_{C_{BT}}$ é o coeficiente de temperatura do capacitor do módulo de baixa tensão do CVD;

 $C_{BT}$  é o valor nominal da capacitância do módulo de baixa tensão do CVD;

 $C_i(C_{BT})$  é o coeficiente de sensibilidade da tensão de saída  $V_{out}$  com relação a capacitância do módulo de baixa tensão  $C_{BT}$ .

Para consideração do efeito da variação de temperatura na capacitância do módulo de alta tensão  $(u_{\Delta T}(C_{AT})$  do CVD, composto por capacitor SF6, foi utilizado coeficiente de temperatura obtido pelo estudo realizado em [44], de 24 ( $\mu$ F/F)°C.

A incerteza-padrão associada é dada pela equação 3.16:

$$u_{\Delta T}(C_{AT}) = (\gamma_{CAT} \cdot \Delta T \cdot C_{AT}) \cdot C_{i(CAT)}$$
(3.16)

Onde:

 $\Delta T$  é a variação da temperatura ambiente;

 $\gamma_{C_{AT}}$  é o coeficiente de temperatura do capacitor do módulo de alta tensão do CVD;  $C_{AT}$  é o valor nominal da capacitância do módulo de alta tensão do CVD;

 $C_i(C_{AT})$  é o coeficiente de sensibilidade da tensão de saída  $V_{out}$  com relação a capacitância do módulo de alta tensão  $C_{AT}$ .

Considerando o modelo do CVD puramente capacitivo, pode-se relacionar a capacitância dos dois módulos, com a tensão de saída, através da expressão do FE por meio de parâmetros de capacitância, de acordo com as equações 3.17 e 3.18:

$$\frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{C_{AT} + C_{BT}}{C_{AT}} \tag{3.17}$$

$$V_{out} = \frac{V_{in} \cdot C_{AT}}{C_{AT} + C_{BT}} \tag{3.18}$$

Os coeficientes de sensibilidade são dados pelas derivadas parciais da função da tensão de saída  $V_{out}$ , com relação as estimativas das grandezas de entrada  $C_{BT}$  e  $C_{AT}$ , conforme equações 3.19 e 3.20:

$$C_i(C_{BT}) = \frac{\partial V_{out}}{\partial C_{BT}} \tag{3.19}$$

$$C_i(C_{AT}) = \frac{\partial V_{out}}{\partial C_{AT}} \tag{3.20}$$
#### 3.5.3.6 Variação da capacitância do capacitor SF6 com a Tensão - $u_{\Delta V}$

Em relação ao capacitor SF6, o valor da capacitância obtido em baixa tensão pode ser utilizado em níveis até 40 % da tensão nominal dos capacitores, considerando que há uma pequena variação nessa faixa [42]. No balanço da incerteza de medição a fim de considerar este efeito, foi incluída uma variação na capacitância com relação a tensão de 15  $\mu$ F/F. A incerteza-padrão associada é dada pela equação 3.21:

$$u_{\Delta V} = u_{VCAT} \cdot C_i(C_{AT}) \tag{3.21}$$

Onde:

 $u_{VCAT}$  é a incerteza na capacitância  $C_{AT}$  devido a variação de tensão;

 $C_i(C_{AT})$  é o coeficiente de sensibilidade da tensão de saída  $V_{out}$  com relação a capacitância do módulo de alta tensão  $C_{AT}$  do CVD.

O coeficiente de sensibilidade é dado pela derivada parcial da função da tensão de saída  $V_{out}$ , com relação a estimativa da grandeza de entrada  $C_{AT}$ , conforme equação 3.22:

$$C_i(C_{AT}) = \frac{\partial V_{out}}{\partial C_{AT}} \tag{3.22}$$

A Figura 3.18 apresenta, em forma de gráfico de barras, as contribuições de incerteza na medição da tensão de saída  $V_{out}$ , na frequência de 60 Hz. Pode-se verificar que a contribuição de maior peso na incerteza da tensão de entrada  $V_{out}$  foi a devido a variação de temperatura dos capacitores. Uma forma de reduzir esta contribuição seria realizar uma análise mais aprofundada da variação da capacitância com a temperatura em ambos os capacitores, em intervalos de tempos reduzidos. A segunda maior contribuição foi devido ao coeficiente de tensão de  $C_{AT}$ . Uma forma de se reduzir a incerteza devido ao coeficiente de tensão é realizar um levantamento deste coeficiente de forma a aplicar uma correção e, assim, reduzir essa contribuição de incerteza.



Figura 3.18: Contribuições para incerteza de  $V_{out}$  60 Hz

#### 3.5.4 Estimativa da incerteza do Fator de Escala

A incerteza combinada do FE do CVD é estimada a partir da equação de medição 3.2. Considerando as contribuições das incertezas das grandezas de entrada  $u(V_{in}) \in u(V_{out})$ , através do método de propagação das incertezas, a incerteza do FE é obtida pela equação 3.23:

$$u_{FE}^2 = u_{FE}^2(V_{in}) + u_{FE}^2(V_{out})$$
(3.23)

As incertezas-padrão  $u_{FE}(V_{in}) \in u_{FE}(V_{out})$ , devido as grandezas de entrada  $V_{in} \in V_{out}$ , são apresentadas nas equações 3.24 e 3.25, sendo calculadas através dos coeficientes de sensibilidade  $C_i(V_{in}) \in C_i(V_{out})$  e das incertezas das grandezas de entrada  $u(V_{in}) \in u(V_{out})$ .

$$u_{FE}(V_{in}) = u(V_{in}) \cdot C_i(FE_{Vin}) \tag{3.24}$$

$$u_{FE}(V_{out}) = u(V_{out}) \cdot C_i(FE_{Vout})$$
(3.25)

Os coeficientes de sensibilidade são calculados através das derivadas parciais da função do FE com relação as estimativas das grandezas de entrada  $V_{in} \in V_{out}$ , conforme equações 3.26 e 3.27.

$$C_i(FE_{Vin}) = \frac{\partial FE}{\partial V_{in}} = \frac{1}{V_{out}}$$
(3.26)

$$C_i(FE_{Vout}) = \frac{\partial FE}{\partial V_{out}} = \frac{-V_{in}}{V_{out}^2}$$
(3.27)

A incerteza de medição do Fator de Escala obtido por entrada e saída de tensão é composta pela combinação das contribuições de incertezas das tensões medidas nos módulos de alta e baixa tensão do CVD. A Figura 3.19 apresenta, em forma de gráfico de barras, as contribuições de incerteza na medição do Fator de escala, na frequência de 60 Hz.



Figura 3.19: Contribuições para incerteza do FE 60 Hz

Pode-se verificar que a contribuição de incerteza de maior peso deveu-se à medição da tensão de saída  $V_{out}$ , cujas principais contribuições de incerteza foram os coeficientes de temperatura e coeficiente de tensão dos capacitores.

# 3.5.5 Análise do conteúdo harmônico das tensões de entrada e saída do CVD

A fim de verificar se a linearidade entre a tensão de entrada e a tensão de saída se mantém constante, independentemente da frequência aplicada, foram analisadas suas formas de onda quanto ao conteúdo harmônico. A partir da ferramenta FFT no *software Matlab* foram obtidas as componentes harmônicas para cada frequência fundamental aplicada até

3 kHz nas tensões de 200 V e 700 V. O código desenvolvido é apresentado no ApêndiceA. As Tabelas 3.4 - 3.7 apresentam o DHI obtidas nas tensões de entrada  $(V_{in})$  e saída  $(V_{out})$  medidas no CVD, para alimentação em 200 V e 700V em 60 Hz.

Freq (Hz)	Tensão de pico (V)	DHI (%)
60	282,722	DIII (70)
120	0,0038	0,0013
180	0,0150	$0,\!0053$
240	0,0060	0,0021
300	0,0002	0,0001
360	0,0020	$0,\!0007$
420	0,0026	0,0009
480	0,0037	0,0013
540	0,0120	0,0042
600	0,0061	0,0022
720	0,0040	0,0014
780	0,0021	0,0007
840	0,0003	0,0001
900	0,0065	0,0023
1200	0,0023	0,0008
1620	0,0017	0,0006
1800	0,0029	0,0010
3000	0,0011	0,0004
	DHT (%)	0,0084

Tabela 3.4: Conteúdo Harmônico 60 H<br/>z $V_{in}$ 200 V

Freq (Hz)	Tensão de pico (V)	DUI (07)
60	2,320	DHI (70)
120	0,000035	0,0015
180	0,000083	0,0036
240	0,000062	$0,\!0027$
300	0,000009	0,0004
360	0,000015	0,0006
420	0,000046	0,0020
480	0,000020	0,0008
540	0,000078	0,0033
600	0,000057	0,0024
720	0,000034	0,0014
780	0,000023	0,0010
840	0,000003	0,0001
900	0,000042	0,0018
1200	0,000018	0,0008
1620	0,000018	0,0008
1800	0,000007	0,0003
3000	0,000008	0,0003
	0,0072	

Tabela 3.5: Conteúdo Harmônico 60 H<br/>z $V_{out}$ 200 V

Freq (Hz)	Tensão de pico (V)	<b>ЛШ</b> (07)	
60	$989,\!597$	EIII (70)	
120	0,0078	0,00079	
180	0,1470	0,01485	
240	0,0155	0,00157	
300	0,0325	0,00328	
360	0,0102	0,00103	
420	0,0225	0,00227	
480	0,0075	0,00076	
540	0,0299	0,00302	
600	0,0248	0,00251	
720	0,0104	0,00105	
780	0,0063	0,00064	
840	0,0007	0,00007	
900	0,0147	0,00149	
1200	0,0012	0,00012	
1620	0,0050	0,00051	
1800	0,0017	0,00017	
3000	0,0028	0,00028	
	DHT (%)	0,0162	

Tabela 3.6: Conteúdo Harmônico 60 H<br/>z $V_{in}$ 700 V

Freq (Hz)	Tensão de pico (V)	DUI (07)
60	8,119	DHI (70)
120	0,000163	0,0020
180	0,001110	$0,\!0137$
240	0,000156	0,0019
300	0,000229	0,0028
360	0,000055	$0,\!0007$
420	0,000151	0,0019
480	0,000042	0,0005
540	0,000251	0,0031
600	0,000213	0,0026
720	0,000096	0,0012
780	0,000034	0,0004
840	0,000048	0,0006
900	0,000133	0,0016
1200	0,000019	0,0002
1620	0,000043	0,0005
1800	0,000018	0,0002
3000	0,000018	0,0002
	0,0151	

Tabela 3.7: Conteúdo Harmônico 60 H<br/>z $V_{out}$ 700 V

O valor do DHT da tensão de entrada  $V_{in}$  obtido foi de 0,008 % para 200 V e 0,016 % para 700 V. Para a tensão de saída  $V_{out}$ , o DHT obtido foi 0,007 % para 200 V e 0,015 % para 700 V.

O conteúdo harmonico da tensão de saída foi praticamente o mesmo que o conteúdo harmonico da tensão de entrada, independentemente da frequencia, para os mesmos níveis de tensão. O FE se manteve constante, nestas duas situações, para frequências até 3 kHz. Este é um comportamento desejado para uso do Divisor de Tensão Capacitivo para medição de harmonicos em Alta Tensão, conforme pesquisas na área, apresentadas no Capítulo 2.

## 3.6 Validação dos Resultado do Método com Transformador de Potencial padrão

Com o objetivo de validar os resultados obtidos em níveis de média tensão, foi realizada uma comparação com um transformador de potencial de referência modelo NVRD40, conforme tabela 3.8, calibrado em alta tensão em 60 Hz. Ambos os dispositivos de conversão são alimentados em paralelo, nas tensões de 700 V, 1,5 kV, 3 kV, 5 kV e 7 kV e a tensão de saída é obtida de maneira simultânea por dois multímetros 3458A. O diagrama esquemático de medição e o circuito de medição são apresentados nas Figuras 3.20 e 3.21, respectivamente.



Figura 3.20: Diagrama esquemático de medição para comparação com TP de referência



Figura 3.21: Circuito de medição para comparação com TP de referência

A Tabela 3.8 apresenta as especificações técnicas do TP padrão utilizado na comparação.

Modelo:	TP de referência NVRD-40
Fabricante	EPRO
Tensão Primária Nominal:	$3 \mathrm{kV} - 40 \mathrm{kV}$
Tensão Secundária Nominal:	100 V
Carga Nominal:	5 VA; $\cos \beta = 1;$

Tabela 3.8: Especificações técnicas NVRD 40

O Erro na tensão primária  $\epsilon_u$  do TP padrão foi determinado no certificado de calibração [48] e é dado pela equação 3.28:

$$\epsilon_u = \frac{V_{outTP} \cdot K_n - V_{in}}{V_{in}} \tag{3.28}$$

Onde:

 $K_n$ : relação de transformação nominal do TP;

 $V_{in}$ : tensão primária aplicada;

 $V_{outTP}$ : tensão secundária medida na saída do TP;

Através da tensão medida na saída do TP Padrão  $V_{outTP}$ ,  $\epsilon_u$  fornecido pelo certificado de calibração e  $K_n$ , é possível obter uma referência para a tensão de entrada do CVD. O FE do CVD é então determinado através da relação apresentada na equação 3.29:

$$FE_{ref} = \frac{V_{inTP}}{V_{outCVD}} \tag{3.29}$$

Onde:

 $V_{outCVD}$ : tensão secundária medida na saída do CVD;

Para a faixa de tensão analisada, foram utilizadas as relações nominais de  $K_n = 30$ ,  $K_n = 50$  e  $K_n = 100$ .

#### 3.6.1 Resultados da validação com TP padrão

Os resultados do FE de referência, com sua incerteza de medição relativa  $U_{FE}(\%)$  e a comparação com os valores obtidos em 200 V e 700 V, através do método de comparação com o TP padrão NVRD 40, são apresentados na Tabela 3.9.

$V_{in}~({ m kV})$	$FE_{ref}$	$U_{FE}~(\%)$	$\Delta \mathrm{FE}~(\%)~700~\mathrm{V}$	$\Delta \mathrm{FE}~(\%)~200~\mathrm{V}$
0,7	121,850	0,048	0,030	0,0008
$1,\!5$	121,889	0,024	-0,001	-0,031
$^{3,0}$	121,927	0,023	-0,033	-0,062
$^{5,0}$	121,901	0,021	-0,011	-0,046
$^{7,0}$	121,890	0,021	-0,003	-0,032

Tabela 3.9: Resultados - comparação com TP de referência 60 Hz

A ferramenta utilizada para caracterizar o desempenho do método de medição foi Erro Normalizado  $(E_N)$ . O Erro Normalizado avalia a compatibilidade dos resultados quando comparados a um valor de referência [49]. Neste caso, o valor de referência utilizado foi o FE obtido através do TP de referência, sendo o  $E_N$  calculado pela equação 3.30:

$$E_N = \frac{FE_{med} - FE_{ref}}{\sqrt{U_{ref}^2 + U_{med}^2}}$$
(3.30)

Onde:

 $FE_{med}$  - FE do CVD obtido através do método de entrada e saída de tensão, em baixa tensão;

 $FE_{ref}$  - FE do CVD obtido através da comparação com o TP de referência;

 $U_{med}$  - incerteza do FE obtida através do método de entrada e saída de tensão, em baixa tensão;

 $U_{ref}$  - a incerteza do FE obtida na comparação com o TP de referência, através do certificado de calibração do TP;

Os resultados são considerados compatíveis quando apresentam  $E_N$  menor ou igual a unidade e não compatíveis quando  $E_N$  maior que a unidade. Os valores obtidos na comparação, utilizando o NVRD 40 como referência, são apresentados na Tabela 3.10.

$V_{in}~({ m kV})$	$FE_{ref} \ ({ m NVRD40})$	<i>FE<sub>med</sub></i> (CVD 700 V)	FE <sub>med</sub> (CVD 200 V)	$ E_N $ 700V	$ E_N $ 200V
0,7	121, 848			0,6	0,002
1,5	121,882			0,04	1,0
3,0	121,919	121,887	121,851	1,0	2,0
5,0	121,902			0,6	1,6
7,0	121,884			0,1	1,0

Tabela 3.10: Erro Normalizado - Comparação TP

As Figuras 3.22 e 3.23 mostram a comparação dos resultados, com suas incertezas de medição. Os resultados para 700 V obtidos apresentam  $E_N \leq 1$ , e, portanto, podem ser considerados satisfatórios. Já quando comparados a 200 V, apresentam  $E_N \leq 1$  para as tensões de 700 V, 1,5 kV e 7 kV. As tensões de 3 kV e 5 kV quando comparados ao valor de referência obtido pelo TP não foi considerado satisfatório, pois  $E_N > 1$ . Neste caso os dados do FE medidos em 700 V foram escolhidos para utilização nas análises seguintes.



Figura 3.22: Comparação com TP de referência 700V



Figura 3.23: Comparação com TP de referência 200V

## 3.7 Modelagem em frequência de Divisor de tensão capacitivo

A partir dos dados do medidos experimentalmente, juntamente com a incerteza de medição, obtidos para a faixa de frequência mencionada, foi realizado um ajuste da curva do FE pela frequência, a fim de obter um modelo de seu comportamento.

Embora o método de interpolação polinomial possa ser utilizado, o mesmo não permite a inclusão das incertezas nos valores experimentais. Por esta razão, para o cálculo da incerteza de medição do modelo foi utilizado o método dos mínimos quadrados, a partir de simulações numéricas para obtenção da incerteza do ajuste, por meio do Método de Monte Carlo. Desta forma, foi possível determinar o valor do Fator de Escala e sua incerteza de medição para qualquer ponto de frequência desejado. Em termos de medição de harmônicos, obter uma curva que modele o comportamento do Fator de Escala de um divisor capacitivo, para qualquer frequência, com rastreabilidade metrológica, pode ser considerado uma vantagem, tratando-se do tempo despendido e limitação dos equipamentos em medições repetidas para uma grande quantidade de pontos de frequência.

#### 3.7.1 Método para obtenção da curva de ajuste

Foram testados alguns possíveis modelos de ajuste com funções compostas por polinômios e exponenciais. Contudo, o modelo racional foi o que obteve maior aproximação com os dados medidos, para descrever o comportamento do módulo do FE na frequência. Um modelo racional é definido como a razão de polinômios, apresentado na equação 3.31:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} p_i x^{n+1-i}}{x^m + \sum_{i=1}^m q_i x^{m-1}}$$
(3.31)

Onde:

n é o grau do polinômio numerador;

m é o grau do polinômio denominador;

 $p_i$  são os coeficientes do polinômio numerador;

 $q_i$  são os coeficientes do polinômio denominador;

Para o ajuste foi utilizada a função *fit rat* no  $Matlab(\mathbb{R})$ . Essa função retorna a estimativa dos coeficientes do ajuste e encontra a melhor aproximação para os dados medidos, através do método dos mínimos quadrados. O código desenvolvido para realizar a modelagem é apresentado no ApêndiceB. Para obter os coeficientes, o método realiza a minimização da soma quadrática dos resíduos. O resíduo (r) para o ponto é definido como a diferença entre o valor medido  $y_i$  e o ajustado  $y_{aj}$ , conforme equação 3.32:

$$r_i = y_i - y_{aj} \tag{3.32}$$

A soma quadrática dos resíduos é dada pela equação 3.33:

$$S = \sum_{i=1}^{n} r_i^2$$
 (3.33)

Foram realizadas simulações com diferentes graus de polinômios para o numerador e denominador para modelagem do comportamento do FE na frequência. O melhor ajuste obtido foi a razão de polinômios de grau 2. A equação para o modelo torna-se 3.34:

$$FE(\omega) = \frac{p_1\omega^2 + p_2\omega + p_3}{\omega^2 + q_1\omega + q_2\omega}$$
(3.34)

Onde:

 $FE(\omega)$  é o vetor de valores de FE para cada frequência;

 $p_1, p_2, p_3, q_1 \in q_2$  são os coeficientes do ajuste;

 $\omega$ é o vetor de frequências.

A Figura 3.24 apresenta o gráfico com os valores medidos e ajustados, com a função polinomial racional para o CVD.



Figura 3.24: Ajuste polinomial racional CVD

#### 3.7.2 Estimativa da Incerteza do Modelo através do Método de Monte Carlo

A fim de determinar a incerteza de medição do modelo, através do Método de Monte Carlo foram realizadas 220 mil iterações, com geração de valores de Fator de Escala aleatórios, para uma probabilidade de abrangência de 95,45 %, considerando uma distribuição normal com média  $FE(\omega)$  e desvio padrão como a incerteza expandida  $U(\omega)$ , obtida pelo método de propagação de incertezas, de acordo com a recomendação do Suplemento do ISO GUM [32].

Os valores aleatórios gerados foram aplicados no modelo polinomial racional em cada iteração e comparados com os valores medidos, através do cálculo do resíduo. Os valores do FE ajustados, os coeficientes dos polinômios gerados e os resíduos foram armazenados em matrizes a cada iteração para posterior análise estatística.

Após serem armazenados, os valores obtidos tanto para o FE quanto para os coeficientes foram ordenados em ordem crescente. A partir do histograma de dados ordenados, foram determinados os limites superior e inferior da faixa que caracteriza a incerteza de medição, conforme equações 2.28 e 2.29.

A partir dos histogramas obtidos foram determinados os limites inferior e superior do intervalo da incerteza de medição para o FE em cada frequência e dos coeficientes gerados nos ajustes. A fim de observar a qualidade do ajuste realizado, a Figura 3.25 apresenta a dispersão dos resíduos para o CVD. O valor máximo do resíduo para o CVD foi no ponto de 180 Hz, com o valor medido variando do valor ajustado em 0,0048 %.

As Figuras 3.26 e 3.27 apresentam os histogramas obtidos para o ajuste do FE nas frequências de 60 Hz e 120 Hz, através do método de Monte Carlo, com a marcação dos limites inferior e superior da incerteza de medição, a fim de ilustrar o método.



Figura 3.25: Residuo CVD Ajuste polinomial racional



Figura 3.26: Histograma CVD - MMC 60Hz



Figura 3.27: Histograma CVD - MMC 120 Hz

A Tabela 3.11 apresenta os coeficientes da equação que modela o comportamento do FE do CVD na frequencia, juntamente com suas incertezas de medição.

Coeficiente	Limite Inferior	Limite Superior	Multiplicador
p1	1,096	1,097	$10^{2}$
p2	-1,639	-0,628	$10^{4}$
p3	2,116	5,925	$10^{5}$
q1	-1,499	-0,575	$10^{2}$
$\mathbf{q2}$	1,884	5,4233	$10^{3}$

Tabela 3.11: Resultados coeficientes do ajuste racional - MMC

A Tabela 3.12 apresenta os valores encontrados para o FE em cada frequência, considerando a incerteza de medição do ajuste.

Freq (Hz)	Limite Superior	Limite Inferior
60	121,84027	121,93324
120	119,35502	119,44609
180	118,94610	119,01890
240	118,81816	118,86709
300	118,75434	118,79453
360	118,71679	118,75327
420	118,69259	118,72646
480	118,67594	118,70772
540	118,66387	118,69400
600	118,65486	118,68373
720	118,64236	118,66982
780	118,63790	118,66500
840	118,63426	118,66116
900	118,63119	118,65805
1200	118,62013	118,64912
1620	118,61064	118,64499
1800	118,60771	118,64442
2400	118,60087	118,64495
3000	118,59662	118,64717

Tabela 3.12: Resultados FE ajuste racional - MMC

## 3.8 Conclusões parciais

Este Capítulo apresentou a metodologia utilizada para caracterização do FE de CVD através da medição direta de entrada e saída de tensão em cada frequência na faixa de 60 Hz a 3 kHz. Os resultados obtidos foram comparados com TP de referência em 60 Hz e o FE obtido em 700 V foi considerado satisfatório em todas as tensões, com Erro normalizado  $\leq$  1.Entretanto, em 200 V não foi considerado satisfatório em duas faixas de tensão. Isto pode estar relacionado ao valor estar abaixo de 10% do valor nominal de tensão de ambos os equipamentos.

Através das medições obtidas, foi realizado um ajuste da curva com o Matlab, através de função polinomial racional e aplicado o método de Monte Carlo para cálculo da incerteza do ajuste no comportamento na frequência do CVD. Foi realizado o cálculo dos resíduos a fim de verificar a aderência do modelo.

## Capítulo 4

## Estudos de caso

Esse capítulo busca demonstrar a aplicação do sistema de medição de harmônicos composto por divisor capacitivo e multímetros de alta exatidão, através da determinação do espectro harmônico de duas fontes de alta tensão utilizadas para alimentação de circuitos de calibração. São apresentadas as especificações técnicas das duas fontes, os cenários avaliados e os resultados dos níveis de DHT e DHI, em diferentes faixas de tensão, de acordo com o controlador das fontes, na frequência fundamental de 60 Hz e harmônicos até 3 kHz.

## 4.1 Método de Medição

A partir da caracterização metrológica do CVD realizou-se uma avaliação de dois equipamentos de alta tensão, a fim de determinar o conteúdo harmônico. O método de medição utilizado envolve a alimentação do divisor capacitivo com as tensões provenientes dos equipamentos e a medição direta das tensões de saída do divisor com multímetros 3458A, através da técnica de amostragem digital, utilizando o mesmo *software TWM* e algoritmo WFFT aplicados no Capítulo 3, para amostragem com multímetros 3458A [39].

Foi também aplicado o método de amostragem DCV, com 5000 amostras e 6 kHz de frequência de amostragem, sendo realizadas 15 leituras com intervalo de 10 segundos cada, na frequência fundamental de 60 Hz. Para obtenção dos harmônicos foi utilizada a FFT, através de programação no *software Matlab*  $\mathbb{R}$ .

O programa desenvolvido lê as amostras obtidas pelo TWM e calcula as componentes harmônicas presentes no sinal. São avaliadas a forma de onda fundamental (60 Hz) da tensão e suas componentes harmônicas até 3 kHz, com contribuição até 0,001 % da tensão fundamental, na faixa de 100V até 10 kV, dentro da resolução dos controladores das fontes.

A rastreabilidade metrológica deste sistema é garantida pela calibração dos multímetros e pelos resultados obtidos na caracterização por entrada e saída de tensão do divisor capacitivo para medição de harmônicos, descrita no Capítulo 3. A temperatura e umidade relativa do laboratório foram mantidas em 23 °C  $\pm$  2 °C e < 65 % U.R.

## 4.2 Cenário 1: Sistema de alimentação ATCA (200 kV)

O sistema de alimentação ATCA 200 kV é composto por uma fonte de potência 220 V e um transformador elevador até 200 kV. Este sistema é utilizado em calibrações de dispositivos de conversão em ATCA, como divisores de tensão e transformadores de potencial. O transformador elevador é alimentado pela fonte, sendo acionada por uma chave para operação em alta tensão. As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam o transformador elevador e a fonte de potência, respectivamente, que compõem o sistema de alimentação ATCA.



Figura 4.1: Transformador elevador Sistema ATCA



Figura 4.2: Fonte de Potência 220 V

Para ajuste do nível de tensão, a fonte possui um controlador localizado na área de controle do laboratório, apresentado na Figura 4.3. A Tabela 4.1 apresenta as características técnicas do Sistema ATCA.



Figura 4.3: Controlador Fonte de Potência

Fabricante	Tettex
Tabricante	ICOUR
Tensão de alimentação regulador	220 V
Tensão de saída regulador	(0-240) V
Frequência de saída regulador	$47~\mathrm{Hz}$ a $63~\mathrm{Hz}$
Modelo	5270/250/50-T
Tensão primária	4x220V
Tensão secundária	(62,5/125/250) kV
Potência nominal	50 kVA
Frequência	60 Hz

Tabela 4.1: Especificações técnicas Sistema ATCA 200 kV

O CVD foi alimentado na faixa de tensão de 200 V até 10 kV pelo sistema ATCA, em 60 Hz. As medições foram realizadas na área de testes do laboratório, com o sistema de aterramento principal de alta tensão. Foi utilizado um multímetro digital modelo 3458A acoplado a um cabo de medição BNC de 10 metros, para medição do sinal da tensão de saída do CVD. A Figura 4.4 mostra o diagrama esquemático do circuito utilizado e a Figura 4.5 apresenta o circuito de medição na área de testes do laboratório.



Figura 4.4: Diagrama esquemático medição harmônicos Sistema ATCA



Figura 4.5: Medição de harmônicos Sistema ATCA - área de testes

Os instrumentos de baixa tensão que compõem o sistema de medição de harmônicos (multímetro, controlador da fonte e computador) foram dispostos na sala de controle, enquanto os equipamentos de alta tensão (Divisor Capacitivo e Sistema ATCA 200 kV) se encontram na área de testes, devido aos procedimentos de segurança para o nível de tensão aplicado. A Figura 4.6 demonstra a sala de controle com os multímetros, controlador da fonte e computador com *software*.



Figura 4.6: Medição de harmônicos Sistema ATCA - sala de controle

## 4.3 Cenário 2: Transformador de potencial 36 kV

O transformador de potencial analisado é utilizado como fonte auxiliar para tensões mais baixas até 36 kV, em calibrações de dispositivos de conversão ATCA, como divisores de tensão, transformadores de potencial e pontas de prova. A Tabela 4.2 apresenta as características técnicas do TP.

Fabricante	ISOLET	Vin	34,5  kV
Modelo	BDE FF26	Ano fab.	11/97
Tensão máxima	36 kV	Relação de transformação	300:1

Tabela 4.2: Especificações técnicas TP 36 kV

O CVD foi alimentado pelo TP através de um variador de tensão (Variac) na faixa de tensão de 220 V até 10 kV em 60 Hz. As medições foram realizadas na área de testes do laboratório, com o sistema de aterramento principal de alta tensão. Foi utilizado um multímetro digital modelo 3458A, e um cabo de medição BNC de 10 metros acoplado a saída do CVD. A Figura 4.7 mostra o diagrama esquemático do circuito utilizado e a Figura 4.8 apresenta o circuito de medição.



Figura 4.7: Diagrama esquemático medição harmônicos TP 36 kV



Figura 4.8: Circuito medição harmônicos TP 36 kV

Os instrumentos de baixa tensão que compõem o sistema de medição de harmônicos (multímetro, controlador da fonte e computador com *software*) foram dispostos na sala de controle, enquanto os equipamentos de alta tensão (Divisor Capacitivo e TP 36 kV) se encontram na área de testes, devido aos procedimentos de segurança para o nível de tensão aplicado, conforme já apresentado na Figura 4.6.

## 4.4 Resultados

#### 4.4.1 Espectro harmônico Sistema ATCA

Através do  $Matlab(\mathbf{R})$  foi possível obter o espectro harmônico para cada faixa de tensão. Os valores de DHT são apresentados na Tabela 4.3. A Figura 4.9 apresenta o comportamento do indicador com o aumento da tensão.

Тар	Vin (V)	DHT(%)	Тар	Vin (V)	DHT(%)
0.1	150,0	3,187	0.75	1723,7	0,127
0.15	268,9	1,431	0.8	1835,7	0,193
0.20	383,5	1,423	0.85	$1973,\! 6$	0,254
0.25	510,2	0,836	0.9	2085,7	0,160
0.25.1	625,7	$0,\!676$	0.95	2215,0	0,154
0.3	749,8	0,569	1.0	2327,0	0,240
0.4	870,5	$0,\!650$	1.25	$3059,\!6$	0,115
0.45	991,1	0,430	1.5	3671,5	0,113
0.5	1111,8	$0,\!386$	1.75	4266,2	0,172
0.55	1241,1	0,437	2.0	4878,2	0,176
0.6	1353,1	$0,\!455$	2.25	5481,5	0,143
0.65	1482,4	0,255	2.5	6102,0	0,133
0.7	1603,0	0,326	5.0	12066,1	0,120

Tabela 4.3: DHT (%) por nível de tensão (Sistema ATCA)



Figura 4.9: DHT (%) por nível de tensão (Sistema ATCA)

Percebe-se uma redução do nível do DHT da fonte ATCA com o aumento da tensão de alimentação da fonte, se estabilizando em níveis de 0,1%. As contribuições harmônicas maiores que 0,001% da tensão fundamental são apresentadas na Figura 4.10 e os maiores valores de DHI foram obtidos na menor tensão medida (150 V). Os principais harmônicos são de ordem h=2, h=3, h=4, h=5 e h=7. Verificou-se também a presença do harmônico

de ordem h=27.



Figura 4.10: DHI (%) - 150 V (Sistema ATCA)

As Figuras 4.11-4.13 apresentam o índice DHI de acordo com o nível de tensão para o  $3^{\circ}$ ,  $5^{\circ}$  e  $7^{\circ}$  harmônicos obtidos para o Sistema ATCA. Verifica-se que para estas componentes harmônicas o maior nível de DHI ocorre na tensão mais baixa de 150 V, o que é coerente com o DHT obtido. Para o  $3^{\circ}$  harmônico o DHI alcança 2,3% da fundamental. Para o 5 ° e 7° harmônicos é de aproxidamente 1% da fundamental.



Figura 4.11: DHI (%) -  $3^{\circ}$  harmônico por nível de tensão (Sistema ATCA)



Figura 4.12: DHI (%) -  $5^{\circ}$  harmônico por nível de tensão (Sistema ATCA)



Figura 4.13: DHI (%) - 7º harmônico por nível de tensão (Sistema ATCA)

Os índices de DHI para a tensão de 150 V, com maior nível de DHT são apresentados na Tabela 4.4. Verifica-se que a maior contribuição ocorre no 3° harmônico (180 Hz).

Freq (Hz)	FE CVD	Vp lado BT (V)	Vp lado AT (V)	DHI
60	121,887	1,73996	212,079	lado AT (%)
120	119,401	0,0153	1,827	0,861
180	118,986	0,0403	4,795	2,261
240	118,842	0,0271	3,221	1,519
300	118,770	0,0188	2,233	1,053
360	118,731	0,0061	0,727	0,343
420	118,707	0,0142	1,686	0,795
480	118,691	0,0019	0,223	0,105
540	118,683	0,0043	0,512	0,241
600	118,668	0,0006	0,070	0,033
720	118,659	0,0005	0,062	0,029
780	118,653	0,0021	0,247	0,116
840	118,649	0,0001	0,012	0,006
900	118,647	0,0011	0,128	0,060
1200	118,637	0,0001	0,011	0,005
1620	118,630	0,0036	0,428	0,202
1800	118,626	0,0002	0,022	0,011
2400	118,622	0,0001	0,009	0,004
3000	118,618	0,0004	0,048	0,023

Tabela 4.4: DHI (%) Sistema ATCA - 150 V

#### 4.4.2 Espectro harmônico TP 36 kV

Através do  $Matlab_{(R)}$  foi possível obter o nível de DHT para diferentes faixas de tensão do TP 36 kV. O DHT para cada nível de tensão é apresentado na Tabela 4.5, com maior valor ocorrendo na tensão de 400 V, segundo menor valor de tensão aplicado.

A Figura 4.14 apresenta o comportamento do indicador com o aumento da tensão. Percebe-se que, mesmo com o aumento de tensão, diferentemente da fonte ATCA 200 kV, o nível de DHT se mantém entre 0.9 % e 1.3 %.

$V_{in}$	DHT(%)
220	$0,\!998$
400	1,245
500	0,929
600	$0,\!966$
700	0,976
900	0,921
1000	0,982
2000	0,974
3000	0,949
5000	1,244
7000	0,932
10000	1,067

Tabela 4.5: DHT (%) por nível de tensão (TP 36 kV)



Figura 4.14: DHT (%) por nível de tensão (TP 36 kV)

Os níveis de DHI maiores que 0,001% da tensão fundamental são apresentadas na Figura 4.15 para a tensão de 400 V. Os principais harmônicos são de ordem h=3, h=5 e h=13.



Figura 4.15: DHI (%) 400 V (TP 36 kV)

As Figuras 4.16-4.18 apresentam o DHI de acordo com o nível de tensão para o  $3^{\circ}$ ,  $5^{\circ}$  e  $13^{\circ}$  harmônicos, mais influentes, obtidos para o TP.



Figura 4.16: DHI (%) -  $3^{\circ}$  harmônico por nível de tensão (TP 36 kV)



Figura 4.17: DHI (%) - 5º harmônico por nível de tensão (TP 36 kV)



Figura 4.18: DHI (%) -  $13^{\circ}$  harmônico por nível de tensão (TP 36 kV)

Verifica-se que para o  $3^{\circ}$  harmônico, o maior nível de distorção ocorre na tensão de 400 V, atingindo 1,1% da fundamental. Para o  $5^{\circ}$  e  $13^{\circ}$  harmônico o maior nível de distorção ocorre em 5 kV, com aproximadamente 0,5% da fundamental.

O indicador DHI para a tensão de 400 V, com maior nível de DHT, é apresentado na Tabela 4.6. Para este nível de tensão observa-se a presença mais significativa do  $3^{\circ}$ ,  $5^{\circ}$  e  $13^{\circ}$  harmônicos.

Freq (Hz)	FE CVD	Vp	Vp	
		lado BT (V)	lado AT (V)	DHI
60	121,887	4,84997	591,148	lado AT (%)
120	119,401	0,0033	0,394	0,067
180	118,986	0,0552	6,568	1,111
240	118,842	0,0021	0,250	0,042
300	118,770	0,0186	2,209	0,374
360	118,731	0,0017	0,196	0,033
420	118,707	0,0111	1,318	0,223
480	118,691	0,0018	0,212	0,036
540	118,683	0,0078	0,922	$0,\!156$
600	118,668	0,0014	0,166	0,028
720	118,659	0,0012	0,140	0,024
780	118,653	0,0142	1,685	0,285
840	118,649	0,0014	0,170	0,029
900	118,647	0,0046	$0,\!546$	0,092
1200	118,637	0,0004	0,047	0,008
1620	118,630	0,0005	0,060	0,010
1800	118,626	0,0003	0,031	0,005
2400	118,622	0,0002	0,020	0,003
3000	118,618	0,0002	0,021	0,003

Tabela 4.6: DHI (%) TP 36 kV - 400 V

## 4.5 Estimativa da Incerteza de Medição

### 4.5.1 Modelo de Medição para Harmônicos da Tensão de Entrada

Para o cálculo da incerteza dos harmônicos obtidos para a tensão de alimentação  $V_{hin}$ , foi utilizado o modelo matemático que expressa o valor da componente harmônica da tensão de entrada no dispositivo de conversão avaliado, na frequência  $\omega$ , dado pela equação 4.1:

$$V_{hin}(\omega) = V_{hout} \cdot FE(\omega) \tag{4.1}$$

Em que:

 $FE(\omega)$  é o Fator de escala determinado por entrada e saída de tensão na frequência  $\omega$ , com rastreabilidade metrológica;

 $V_{hin}$  é a contribuição em tensão do harmônico h na frequência harmônica  $\omega$  na entrada do CVD;

 $V_{hout}$ é a contribuição em tensão do harmônico hna frequência harmônica  $\omega$ na saída do CVD.

#### 4.5.2 Estimativa da incerteza padrão devido ao FE do CVD

O FE do CVD para cada frequência foi determinado no Capítulo 3 e foi considerado como do tipo B, sendo utilizado o valor obtido para 700 V, com incertezas apresentadas na tabela 3.12.

### 4.5.3 Estimativa da Incerteza Padrão das componentes harmônicas da Tensão de Saída

Através da lei de propagação de incertezas, a estimativa da incerteza padrão combinada para a tensão na frequência  $\omega$  na saída do CVD é obtida pela equação 4.2 :

$$u(V_{hout})^{2} = u(repV_{hout})^{2} + u(calV_{hout})^{2} + u(RV_{hout})^{2} + u(DV_{hout})^{2}$$
(4.2)

Onde:

 $u(repV_{hout})$  é a incerteza-padrão referente a repetibilidade da medição de  $V_{hout}$ ;

 $u(calV_{hout})$  é a incerteza-padrão referente a incerteza de calibração do multímetro 3458 utilizado para medição de  $V_{hout}$ ;

 $u(RV_{hout})$  é a incerteza-padrão referente a resolução do multímetro 3458A utilizado para medição de  $V_{hout}$ ;

 $u(DV_{hout})$  é a incerteza-padrão referente a deriva do multímetro 3458 utilizado para medição de  $V_{hout}$ ;

#### 4.5.3.1 Repetibilidade - $u(repV_{hout})$

Foram realizadas 15 leituras para cada ponto de frequência. A dispersão entre as leituras foi considerada como componente da incerteza por meio do desvio padrão da média (S).

A incerteza padrão devido a repetibilidade da medição é calculada pela equação 4.3, com grau de liberdade igual ao número de medições repetidas menos um, v = N - 1, onde N é número de medições repetidas.

$$u_{repVhout} = \frac{S}{\sqrt{N}} \tag{4.3}$$

#### 4.5.3.2 Certificado 3458A - $u(calV_{hout})$

A incerteza padrão na medição da tensão de entrada, devido a calibração do multímetro 3458A, [47] foi calculada através da incerteza expandida do certificado de calibração, dividida pelo respectivo k, conforme tabela 2.2, de acordo com a equação 4.4 :

$$u_{calVhout} = \frac{U_{cal}}{k} \tag{4.4}$$

#### 4.5.3.3 Resolução 3458A - $u(RV_{hout})$

A incerteza padrão devido a resolução R do multímetro para a medição da tensão de entrada foi calculada com distribuição retangular e grau de liberdade  $v = \infty$ , conforme 4.5.

$$u_{RVhout} = \frac{R/2}{\sqrt{3}} \tag{4.5}$$

#### 4.5.3.4 Deriva 3458A - $u(DV_{hout})$

A deriva D do multímetro 3458A foi obtida do manual do fabricante [38]. A incerteza padrão foi calculada com distribuição retangular e grau de liberdade  $v = \infty$ , conforme equação 4.6

$$u_{DVhout} = \frac{D}{\sqrt{3}} \tag{4.6}$$

A Tabela 4.7 apresenta o resumo das grandezas de entrada e os valores mínimos de incerteza obtidos para a medição dos harmônicos da tensão de saída  $(V_{hout})$ , juntamente com a distribuição de probabilidade, fator de divisão e coeficientes de sensibilidade  $C_i$ , na frequência de 180 Hz. Para as demais frequências, o procedimento para o cálculo da
incerteza de medição é o mesmo.

Fontes de Incerteza	Incerteza (V)	Distribuição	Fator de Divisão	$C_i$
Calibração do Multímetro	$3,05 \times 10^{-6}$	Normal	2	1
Deriva Multímetro	$2,32 \times 10^{-9}$	Retangular	$\sqrt{3}$	1
Resolução Multímetro	$2,89 \times 10^{-6}$	Retangular	$\sqrt{12}$	1
$u_c$ - Incerteza combinada (V)		$4,22 \times 10^{-6}$		

Tabela 4.7: Balanço de Incertezas - 180 Hz  $V_{hout}$ 

Para cada harmônico, no cálculo da incerteza final deve-se considerar também a contribuição do tipo A devido a repetibilidade para a obtenção da incerteza final.

A Figura 4.19 apresenta, em forma de gráfico de barras, as contribuições de incerteza na medição do tipo B dos harmônicos presentes na tensão de saída do CVD, na frequência de 180 Hz.



Figura 4.19: Contribuições para incerteza componente harmônica  $V_{hout}$  180 Hz

A contribuição de maior peso na incerteza da tensão de saída, para a frequência de 180 Hz, foi devido à calibração do multímetro 3458A.

#### 4.5.4 Estimativa da Incerteza Padrão das componentes harmônicas da Tensão de Entrada

Para estimativa da incerteza padrão das componentes harmônicas da tensão de entrada  $(V_{hin})$  são consideradas a incerteza u(FE) e a incerteza das componentes harmônicas da tensão de saída  $u(V_{hout})$ , combinadas conforme a equação 4.7:

$$(u_{Vhin})^2 = u(V_{hin(FE)})^2 + u(V_{hin(Vhout)})^2$$
(4.7)

As incertezas padrão são calculadas através do coeficiente de sensibilidade  $C_i(FE)$ e  $C_i(V_{hout})$ , e das incertezas das grandezas de entrada u(FE) e  $u(V_{hout})$ , dadas pelas equações 4.8 e 4.9:

$$u(V_{hin(FE)}) = u_{FE} \cdot C_i(FE) \tag{4.8}$$

$$u(V_{hin(Vhout)}) = u_{Vhout} \cdot C_i(V_{hout}) \tag{4.9}$$

Os coeficientes de sensibilidade são calculados através das derivadas parciais da função de  $V_{hin}$  com relação as estimativas das grandezas de entrada  $V_{hout}$  e FE conforme equações 4.10 e 4.11.

$$C_i(FE) = \frac{\partial V_{hin}}{\partial FE} \tag{4.10}$$

$$C_i(V_{hout}) = \frac{\partial V_{hin}}{\partial V_{hout}} \tag{4.11}$$

A Figura 4.20 apresenta, em forma de gráfico de barras, as contribuições de incerteza das componentes harmônicas da tensão de entrada Vin do CVD, nas frequências de 60 Hz e 180 Hz.



Figura 4.20: Contribuições para incerteza Fund 60 Hz



Figura 4.21: Contribuições para incerteza componente harmônica  $V_{hin}$  180 Hz

As Tabelas 4.8 e 4.9 apresentam o resumo das contribuições para a medição dos harmônicos da tensão de entrada  $(V_{hin})$  e os valores mínimos de incerteza obtidos na frequência fundamental de 60 Hz e para a frequência harmônica de 180 Hz. Para as demais frequências, o procedimento para o cálculo da incerteza de medição é o mesmo.

Fontes	Valor (V)	Distribuição	Fator	$C_i$
de Incerteza			de Divisão	
Fator de Escala	$2,0 \times 10^{-2}$	Normal	2	V <sub>hout</sub>
Tensão de saída	$5,1 \times 10^{-4}$	Normal	2	FE
$u_c$ - Incerteza combinada (V)	$2,0  imes 10^{-2}$			
U – Incerteza expandida (k=2) (V)	$4,0 \times 10^{-2}$			

Tabela 4.8: Balanço de Incertezas - 60 H<br/>z $V_{hin}$ 

Tabela 4.9: Balanço de Incertezas - 180 Hz  $V_{hin}$ 

Fontes	Valor	Distribuição	Fator	$C_i$	
de Incerteza	$(\mathbf{V})$		de Divisão		
Fator de Escala	$4,\!43\times10^{-4}$	Normal	2	V <sub>hout</sub>	
Tensão de saída	$5,02 \times 10^{-4}$	Normal	2	FE	
$u_c$ - Incerteza combinada (V)	$6,7  imes 10^{-4}$				
U – Incerteza expandida (k=2) (V)	$1,3 \times 10^{-3}$				

Para cada harmônico, no cálculo da incerteza final deve-se considerar também a contribuição do tipo A devido a repetibilidade. As incertezas tipo A e B são combinadas e expandidas ao nível de confiança de 95,45%.

#### 4.6 Conclusões parciais

Este Capítulo apresentou a aplicação do sistema de medição caracterizado neste trabalho através de um estudo de caso, com a medição do espectro harmônico de dois equipamentos utilizados em calibrações em alta tensão, na faixa de frequências de 60 Hz a 3 kHz. Foram medidos os harmônicos individuais e o DHT, em diferentes níveis de tensão de entrada. Foram apresentadas também as principais grandezas que contribuem para a incerteza de medição dos harmônicos, juntamente com os cálculos para sua estimativa.

Para as frequências harmônicas, a contribuição de maior peso na incerteza dos harmônicos na tensão de entrada  $V_{hin}$  foi devido a medição da tensão de saída da fonte, cuja contribuição principal é a incerteza da calibração do multímetro 3458A. Uma forma de reduzir estas contribuições seria utilizar mais um divisor de tensão na saída do CVD, a fim de reduzir a faixa de tensão utilizada. Já para a frequência fundamental, a contribuição de maior peso na incerteza da tensão de entrada  $V_{hin}$  foi devido a incerteza do FE do CVD, cujas principais contribuições foram apresentadas no Capítulo 3.

## Capítulo 5

### Conclusões e trabalhos futuros

Os resultados obtidos fazem parte da caracterização metrológica de divisores de tensão capacitivos para medição de harmônicos. O objetivo deste trabalho foi verificar o comportamento na frequência do FE de um CVD composto por capacitores de referência, através do método de medição direta de entrada e saída de tensão, com rastreabilidade metrológica. Além disto, também foi estimada a incerteza do FE, que se apresentou na ordem de 0,018 %, na faixa de frequências de 60 Hz a 3 kHz, o que foi considerado satisfatório. A melhor incerteza atual para calibração de divisores de tensão em 60 Hz é de 0,0032 % [50].

Os Capítulos 1 e 2 apresentaram os objetivos do trabalho e os principais conceitos teóricos necessários a compreensão dos métodos e ferramentas aplicadas. O Capítulo 3 apresentou a caracterização do sistema de medição, com a estimativa da incerteza e uma validação dos resultados obtidos com TP de referência. No âmbito da estimativa de incerteza, a componente mais significativa na obtenção do FE por entrada e saída de tensão, foi devido ao coeficiente de temperatura dos capacitores que compõem o divisor. A segunda maior contribuição foi devido ao coeficiente de tensão de  $C_{AT}$ . Com relação às capacitâncias parasitas dos cabos e conexões, mesmo o divisor capacitivo tendo sido caracterizado como sistema, a contribuição da incerteza do tipo A poderia ser reduzida com a melhora dos adaptadores e conexões, tendo em vista que a capacitância é muito sensível a essas interferências. A faixa de medição do multímetro 3458A para a tensão de entrada (200 V e 700 V) também teve influência significativa na incerteza do FE.

A fim de validar os resultados do FE obtido, foi realizada uma comparação com um TP de referência. A comparação dos resultados do FE em 700 V, apresentou  $E_N \leq 1$ em todas as tensões analisadas até 7 kV, sendo considerada satisfatória e confirmando a aplicabilidade do método em 60 Hz. Já para a tensão de 200 V, em dois dos cinco níveis de tensão medidos, os resultados não foram satisfatórios e devem ser investigados.

No Capítulo 4, para avaliar a aplicabilidade do sistema de medição, foi realizado estudo de caso, com a medição com rastreabilidade metrológica, do espectro harmônico da tensão de entrada  $V_{in}$  de um sistema ATCA 200 kV e um TP 36 kV, utilizados nas calibrações do Lamat. A melhor incerteza obtida foi de  $4 \times 10^{-2}$  V em 60 Hz e para faixa de harmônicos, o valor obtido de incerteza expandida foi de  $1,3 \times 10^{-3}$  V.

O DHT do sistema ATCA apresentou resultados menores que 5 % na faixa de tensão inicial, apresentando estabilização em níveis < 0,1 % até 10 kV. No caso do TP 36 kV, os resultados obtidos para o DHT são da ordem de 1 % em todas as faixas medidas de tensão, o que demonstra a qualidade dos equipamentos avaliados. Já para o indicador DHI, o sistema ATCA, composto por transformador elevador de 200 kV, os maiores indices obtidos foram na tensão inicial de 150 V, sendo a maior contribuição no 3<sup>o</sup> harmônico (180 Hz). Já para o TP 36 kV, o maior nível de distorção ocorre na tensão de 400 V, tendo a presença mais significativa do 3<sup>o</sup>, 5<sup>o</sup> e 13<sup>o</sup> harmônicos de 60 Hz.

A componente mais significativa na obtenção dos níveis de DHI, para ambos os equipamentos, foi devido a medição da tensão de saída do CVD, cuja grandeza de entrada mais impactante é a incerteza da calibração do multímetro 3458A. Já para a frequência de 60 Hz, a contribuição de maior peso na incerteza da tensão de entrada  $V_{hin}$  foi devido a incerteza do FE do CVD, cujas principais contribuições foram apresentadas no Capítulo 3.

Este trabalho contribuiu para o início dos estudos para medição de harmônicos em alta tensão, com a utilização de divisores capacitivos. Verificou-se a aplicabilidade do dispositivo através de validação com TP em 60 Hz e confirmou-se que a linearidade entre a tensão de entrada e a tensão de saída do CVD se mantém constante, independentemente da frequência aplicada, através da obtenção do espectro harmônico, quando alimentado puramente por calibrador. Os resultados podem ser considerados satisfatórios dentro das limitações da investigação para aplicação do sistema de medição.

#### 5.1 Trabalhos futuros

De modo a dar prosseguimento ao conhecimento obtido neste projeto e estabelecer um sistema de medição de referência utilizando um CVD, alguns tópicos são recomendados, tais como: - Realizar caracterização em tensão dos capacitores CAT e CBT, que compõem o CVD, a fim de aplicar correções e reduzir a incerteza de medição;

- Realizar caracterização mais aprofundada em temperatura de CAT e CBT, que compõem o CVD, a fim de aplicar correções e reduzir a incerteza de medição.

- Aplicação de outro divisor de tensão na entrada do CVD, metrologicamente rastreado, a fim de reduzir a faixa de tensão utilizada no multímetro 3458A.

- Caracterizar as capacitâncias dos cabos e conectores, de forma a deixar a medição mais independente;

- Realizar comparação com divisor de referência que possua o comportamento do FE em frequências harmônicas metrologicamente rastreado;

- Validar os resultados com TP de referência acima de 7 kV;

- Validar os resultados com TP de referência em 60 Hz com outro método;

- Testar o método em outro TP calibrado em 60 Hz;

- Repetir o método, realizando a amostragem com outro *software* em todas as frequências e comparar os resultados dos harmônicos obtidos com o TWM;

- Realizar a amostragem utilizando base de tempo externa aos multímetros, para acionamento simultâneo e analisar a influência da utilização do método Mestre-Escravo no FE.

### Referências

- [1] ONS. Planejamento Elétrico de Médio Prazo do SIN 2020-2024. [S.l.], 2019.
- [2] ABNT. ABNT NBR IEC 60060-2/2016 Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão Parte 2: Sistemas de medição. Maio 2016.
- [3] SCHON, K. High voltage measurement techniques. [S.I.]: Springer, 2019.
- [4] FILHO, O. B.; SILVA, M. T. F.; AZEVEDO, L. C.; VITORIO, P. C. O.; SOUZA, L. A. A. Calibração e Rastreabilidade de Sistemas de Medição em Alta Tensão. In: Colóquio Sobre Materiais Dielétricos e Técnicas Emergentes de Ensaios e Diagnósticos. [s.n.], 2016. Disponível em: <a href="http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.24920.08966">http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.24920.08966</a>>.
- [5] INMETRO. Laboratórios de Eletricidade e Magnetismo, Alta Tensão. Acessado em 22 de Abril de 2020. Disponível em: <a href="https://www.gov.br/inmetro/ptbr/assuntos/metrologia-cientifica/laboratorios-de-metrologia-do-inmetro/eletricidadee-magnetismo/alta-tensao>.</a>
- [6] CROTTI, G.; GALLO, D.; GIORDANO, D.; LANDI, C.; LUISO, M.; MODARRES, M. Frequency calibration of mv voltage transformer under actual waveforms. In: 2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016). [s.n.], 2016.
   p. 1–2. Disponível em: <a href="http://dx.doi.org/10.1109/CPEM.2016.7540709">http://dx.doi.org/10.1109/CPEM.2016.7540709</a>>.
- [7] CATALIOTTI, A.; COSENTINO, V.; CROTTI, G.; FEMINE, A. D.; DI CARA, D.;
   GALLO, D.; GIORDANO, D.; LANDI, C.; LUISO, M.; MODARRES, M.; TINÈ, G.
   Compensation of Nonlinearity of Voltage and Current Instrument Transformers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 68, n. 5, p. 1322–1332, 2019.
   Disponível em: <a href="http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2018.2880060">http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2018.2880060</a>>.
- [8] ABNT. IEC 61000-4-30 Compatibilidade Eletromagnética Parte 4-30: Técnicas de medição e ensaio Métodos de medição de qualidade da energia. 2011.
- [9] IEC. IEC 61869-3: Instrument Transformers Part 3: Additional requirements for Inductive Voltage Transformers. 2011.
- [10] CROTTI, G.; GALLO, D.; GIORDANO, D.; LANDI, C.; LUISO, M.; MODAR-RES, M.; ZUCCA, M. Frequency compliance of mv voltage sensors for smart grid application. *IEEE Sensors Journal*, v. 17, n. 23, p. 7621–7629, 2017. Disponível em: <a href="http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2017.2726116">http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2017.2726116</a>>.
- [11] ARISTOY, G.; TRIGO, L.; SANTOS, A.; BREHM, M.; SLOMOVITZ, D. Measuring system for calibrating high voltage instrument transformers at distorted waveforms. In: 2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016). [s.n.], 2016. p. 1–2. Disponível em: <a href="http://dx.doi.org/10.1109/CPEM.2016.7540742">http://dx.doi.org/10.1109/CPEM.2016.7540742</a>>.

- [12] FILIPOVIĆ-GRČIĆA, D.; FILIPOVIĆ-GRČIĆB, B.; KRAJTNER, D. Frequency response and harmonic distortion testing of inductive voltage transformer used for power quality measurements. In: 4th International Colloquium "Transformer Research and Asset Management. [s.n.]. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.703>.
- [13] ONS. 2.1- 028/2005 Definição das Metodologias e Procedimentos Necessários às campanhas de medição dos indicadores de desempenho. [S.1.], 2007.
- [14] IEC. IEC/TR 61869-103: Instrument transformers, The use of instrument transformers for power quality measurement. 2012.
- [15] MANUAL VosViewer. https://www.vosviewer.com/getting-started# vosviewer-manual. Acessado em 15/06/2021.
- [16] LEI, T.; CRISTALDI, L.; FAIFER, M.; OTTOBONI, R.; TOSCANI, S.; CHERBAUCICH, C.; MAZZA, P. Behavior of voltage transformers under distorted conditions. In: 2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. [s.n.], 2016. p. 1–6. Disponível em: <http://doi.org/10.1109/I2MTC.2016.7520344>.
- [17] FAIFER, M.; FERRERO, A.; LAURANO, C.; OTTOBONI, R.; TOSCANI, S.; ZA-NONI, M. Expressing uncertainty of voltage transformers: A proposal. In: 2019 IEEE 10th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS).
   [s.n.], 2019. p. 1–6. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.1109/AMPS.2019.8897770">http://doi.org/10.1109/AMPS.2019.8897770</a>>.
- [18] CROTTI, G.; GALLO, D.; GIORDANO, D.; LANDI, C.; LUISO, M.; MODAR-RES, M. Frequency response of mv voltage transformer under actual waveforms. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 66, n. 6, p. 1146–1154, 2017. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.1109/TIM.2017.2652638">http://doi.org/10.1109/TIM.2017.2652638</a>>.
- [19] FAIFER, M.; LAURANO, C.; OTTOBONI, R.; TOSCANI, S.; ZANONI, M. Characterization of voltage instrument transformers under nonsinusoidal conditions based on the best linear approximation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 67, n. 10, p. 2392–2400, 2018. Disponível em: <http://doi.org/10.1109/TIM.2018.2806949>.
- [20] SLOMOVITZ, D.; ARISTOY, G.; A.SANTOS; BREHM, M.; TRIGO, L. Behavior of voltage transformers under distorted waveforms. In: 2017 Congresso Brasileiro de Metrologia (Metrologia 2017). [S.l.: s.n.], 2017.
- [21] INMETRO. Vocabulário Internacional de Metrologia. [S.l.]: JCGM, 2012.
- [22] SILVA, M. Projeto e desenvolvimento de padrão para alta tensão em corrente contínua na faixa de 1 kV a 50 kV. 2011. 85 f. Dissertação (Mestrado)-Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2011.
- [23] HAEFELY. Standard Air Capacitor 3330 Manual and Specifications.
- [24] CAMILOTTI, L. E. Resposta em frequência de transformadores de potencial e suas implicações para o sistema elétrico de potência. In: . [S.l.: s.n.], 2017.

- [25] TOTH, E.; FRANCO, A. M. R.; DEBATIN, R. M. Power and energy reference system, applying dual-channel sampling. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 54, n. 1, p. 404–408, 2005. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.1109/TIM.2004.839772">http://doi.org/10.1109/TIM.2004.839772</a>>.
- [26] LANDIM, R. P.; BENZ, S. P.; DRESSELHAUS, P. D.; BURROUGHS, C. J. Systematic-error signals in the ac josephson voltage standard: Measurement and reduction. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 57, n. 6, p. 1215– 1220, 2008. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.1109/TIM.2007.915100">http://doi.org/10.1109/TIM.2007.915100</a>>.
- [27] VASCONCELLOS, R. T. d. B. e.; CAMPOS, M. L. R. Sampling systems with fractional-delay applied to high-accuracy measurements. In: 2012 Conference on Precision electromagnetic Measurements. [s.n.], 2012. p. 438–439. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.1109/CPEM.2012.6250991">http://doi.org/10.1109/CPEM.2012.6250991</a>>.
- [28] MARTINS, M. B.; DEBATIN, R. M.; FRANCO, A. M. System for metrological assessment of pmus under voltage sags. In: 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). [s.n.], 2016. p. 535–538. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.1109/ICHQP.2016.7783336">http://doi.org/10.1109/ICHQP.2016.7783336</a>>.
- [29] OPPENHEIM, A. V.; S. WILLSKY, A. Sinais e Sistemas. [S.l.]: Pearson Education do Brasil, 2010.
- [30] ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. d. Fundamentos de Metrologia científica e industrial 2<sup>a</sup> edição. [S.l.]: Manole - Barueri, SP, 2018.
- [31] INMETRO. Guia para expressão de incerteza de medição ISO GUM 2008,1<sup>a</sup> edição brasileira. [S.l.]: INMETRO, 2012.
- [32] JCGM. Evaluation of measurement data Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement. [S.l.]: JCGM, 2008.
- [33] COUTO, J. C. D. P. R. G.; OLIVEIRA, S. P. D. "Monte Carlo simulations applied to uncertainty in measurement," in Theory and Applications of Monte Carlo simulations. In: . [s.n.], 2020. p. 27–51. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.5772/53014">http://doi.org/10.5772/53014</a>>.
- [34] SOUZA, L. A. A.; PINTO, M. V. V.; MARTINS, M. B.; LIMA, A. C. S. Modeling of a resistive voltage divider by rational functions: Uncertainty evaluation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 70, p. 1–8, 2021. Disponível em: <a href="http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2020.3047956">http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2020.3047956</a>>.
- [35] TETTEX. Compressed-gas Standard Capacitor Description and direction for use Type 3370/100/200. [S.l.].
- [36] FLUKE. 5730A Multifunction Calibrator Operators Manual, 2013. https://br. flukecal.com/products/electrical-calibration/electrical-calibrators/ calibrador-multifun%C3%A7%C3%A3o-de-alto-desempenho-flu?quicktabs\_ product\_details=4. Acessado em 25/05/2021.
- [37] FLUKE. 5725A Amplifier Instruction Manual, 1989. https://br.flukecal.com/ products/electrical-calibration/electrical-calibrators/5725a-amplifier? quicktabs\_product\_details=4. Acessado em 25/05/2021.

- [38] KEYSIGHT. 3458A Multimeter User's Guide, 2020. https://www.keysight. com/br/pt/support/3458A/digital-multimeter-8-5-digit.html. Acessado em 25/05/2021.
- [39] RADOSLAVA, H.; ANTOANETA, Y.; SANMAMED, Y. A.; AGUILAR, J. D. de; STANISLAV, M.; MARTIN, S.; ZACHOVALOVA, V. N.; TRINCHERA, B. O.; KRIS-TIAN, E.; HELGE, M. Guide for sampling power and power quality measurements. 2019.
- [40] SLOMOVITZ, D.; BREHM, M.; IZQUIERDO, D.; FAVERIO, C.; CASAIS, J. L.; CAZABAT, M. Determination of voltage dependence in high-voltage standard capacitors. In: 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018). [s.n.], 2018. p. 1–2. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8501133">http://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8501133</a>>.
- [41] ANDERSON, W. E.; DAVIS, R. S.; PETERSONS, O.; MOORE, W. J. M. An international comparison of high voltage capacitor calibration. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-97, n. 4, p. 1217–1223, 1978. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.1109/TPAS.1978.354603">http://doi.org/10.1109/TPAS.1978.354603</a>>.
- [42] LATZEL, H.; SCHON, K. Precise capacitance measurements of high-IEEE voltage compressed gas capacitors. Transactions onInstrumentation and Measurement, IM-36, 2,381 - 384, 1987. Disponível em: n. р. <http://doi.org/10.1109/TIM.1987.6312705>.
- [43] INMETRO. Certificado de Calibração DIMCI 0999/2019. [S.l.], 2019.
- [44] LIMA, V. R.; VITORIO, P. C.; SOUZA, L. A. A.; FILHO, O. B.; ASENCIOS, O. W. Relatório Técnico: Implementação de rastreabilidade própria em ATCA. [S.l.], 2015.
- [45] IEC. IEC 60060-3: High Voltage test techniques Part 3: Definitions and requirements for on-site testing. 2006.
- [46] INMETRO. Certificado de Calibração DIMCI 0394/2019. [S.l.], 2019.
- [47] INMETRO. Certificado de Calibração DIMCI 0158/2020. [S.I.], 2020.
- [48] PTB. Certificado de Calibração 21868 PTB13. [S.l.], 2013.
- [49] ABNT. ABNT NBR ISO/IEC 17043: Avaliação da conformidade Requisitos gerais para ensaios de proficiência. 2011.
- [50] INMETRO. Calibração Divisão de Metrologia Elétrica Lamat (Laboratório de Metrologia em Alta Tensão). Acessado em 26 de agosto de 2021. Disponível em: <a href="http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/servicos/calibDiele.asp#lamat">http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/servicos/calibDiele.asp#lamat</a>>.

# APÊNDICE A – Código Matlab FFT

```
clc;
clear all;
close all;
```

%Dados do sinal amostrado n\_amostras\_ciclo = 100; freq = 60.0; n\_ciclos=50; periodo = 1/freq n\_total\_amostras = 5000 n\_total\_amostras = n\_amostras\_ciclo\*n\_ciclos

%Dados referentes ao intervalo de an lise

amostras\_inicio = 0; %interv = periodo/n\_amostras\_ciclo interv = n\_ciclos/(n\_total\_amostras\*freq) %intervalo de amostragem fs = 1/interv %frequ ncia de amostragem amostras\_fim = n\_ciclos\*periodo

% vetor de tempo vet\_amostras = 0:interv:amostras\_fim-interv; length(vet\_amostras) sinal = load('arquivo.txt');
figure(1)
plot(sinal)
sinal fft = fft(sinal);

sinal\_fft\_modulo = abs(sinal\_fft(1:n\_total\_amostras/2)); %Calculo do modulo

```
%"Ajuste" do eixo Y para unidade original (Volts)
sinal_fft_modulo_Volts = sinal_fft_modulo*2/n_total_amostras;
```

```
%"Ajuste" do eixo X para unidade original (Hz)
fbin=fs/n_total_amostras;
vet_freq_fft=[0:fbin:fs/2-fbin];
A = length(vet_freq_fft)
B = length(sinal_fft_modulo_Volts)
```

%Looping para as compomentes mais significativas k=1; % Definicao da faixa de analise faixa\_harmonico = A %inserir a toler ncia de analise; %apenas as componentes >=A menores que a fundamental ser o analisadas.

for w = 1:length(sinal\_fft\_modulo\_Volts)

if sinal\_fft\_modulo\_Volts(w)>=
faixa\_harmonico\*max(sinal\_fft\_modulo\_Volts)

```
sinal_fft_modulo_Volts_large(k) = sinal_fft_modulo_Volts(w);
sinal_fft_modulo_percent(k) =
sinal_fft_modulo_Volts_large(k)*100/max(sinal_fft_modulo_Volts);
```

```
\begin{array}{rl} {\rm freqharmonico\,(k)= \ vet\_freq\_fft\,(w)\,;} \\ & k \ = \ k{+}1; \\ & {\rm end} \\ & {\rm end} \end{array}
```

figure(3)
plot(vet\_freq\_fft,sinal\_fft\_modulo\_Volts)
ylabel('Modulo [V]'); xlabel('Freq [Hz]')

digits(10)
D = vpa(sinal\_fft\_modulo\_Volts\_large)
sinal\_fft\_modulo\_percent
freqharmonico

H1 = zeros(A,2);

H1 = [freqharmonico; sinal\_fft\_modulo\_percent]

H2 = zeros(A, 2);H2 = [freqharmonico;D]

# APÊNDICE B – Código Matlab Método de Monte Carlo

clc; clear all format long N = 220000; %numero de iteracoes "monte Carlo" p = 2; %ordem do polinomio numerador do fit racional q = 2; %ordem do polin mio denominador do fit racional nrat = p+1+q; %numero de coeficientes do fit racional %vetor de frequencias freq = [% inserir vetor de frequencias] % matriz de uma coluna para a fun o fit rat mediaFEdiv= [% inserir vetor de medias FE para cada frequencia]; %vetor "coluna" para a funcao fit rat desvioFEdiv = [% inserir vetor de incertezas]; M⊨% inserir numero de pontos de FE medidos na curva; %declaracao dos vetores e matrizes utilizados no programa vetFE aleat = zeros(1,M); matrizFE aleat = zeros (N,M);  $FE\_aleat= zeros(1,M);$ matrizres = zeros (N,M);

vetfit = zeros(1,M);

```
matrizfit = zeros (N,M);
vetcoef= zeros (1,nrat);
matrizcoef = zeros (N,nrat);
vetdesviomatrizfit= zeros (1,M);
vetmediamatrizfit = zeros (1,M);
vetmediamatrizres = zeros (1,M);
vetdesviomatrizres = zeros (1,N);
vetdesviomatrizcoef= zeros (1,nrat);
vetmediamatrizcoef = zeros (1,nrat);
```

%loop geracao de matriz de numeros aleatorios %Distribuicao normal (mediaFEdiv1 e desvioFEdiv)

for i=1:N  $\% \$  numero de iteracoes "montecarlo"

for j = 1:M % M = numero de pontos medidos

%vetor para montar a matriz vetFE\_aleat(j) = normrnd(mediaFEdiv(j),desvioFEdiv(j));

% matriz de numeros aleatorios % distribuicao normal, media FEdiv e desvioFEdiv matrizFE\_aleat(i,j)= vetFE\_aleat(j);

end

%loop para realizar o fit, armazenar coeficientes e calcular o residuo %f= fit(freq,FE\_aleat,'ratij); %retorna o fit polinomial racional onde: %i ordem polinomio numerador %j ordem polinomio denominador %f(freq)= retorna os valores do polinomio fitado p para cada freq (valor de FE estimado na curva fitada com as frequencias freq); %vetcoef = retorna o vetor de coeficintes com nrat colunas;

for i=1:N %vetor auxiliar com cada linha da matriz dos FEs aleatorios FE aleat=matrizFE aleat(i,:); %transposicao do para funcao fit rat: FE aleat2 = FE aleat';%Especifica o modelo ratij, %onde i = o grau do polinomio numerador; %j= o grau do polinomio denominador. (y=(p1x2+p2x+p3)/(x2+q1x+q2) ordem 22 f = fit (freq, FE aleat2, 'rat22', 'StartPoint', [100,100,100,100,100]); vetfit = f(freq); %vetor de coeficintes com nrat colunas vetcoef = coeffvalues(f);%matriz de residuos (diferenca entre os pontos originais e os fitados) matrizres (i, :) = vetfit - mediaFEdiv;%matriz com os elementos fitados matrizfit(i,:) = vetfit;%matriz de coeficientes para cada rodada de fit matrizcoef(i,:) = vetcoef;

%loop para: %analise estatistica dos FE aleatorios fitados e do residuo %(media e desvio padrao dos elementos)

for i= 1: M
%media dos elementos aleatorios gerados
%para cada ponto na coluna i
mediamatrizfit = mean (matrizfit(:,i));

%desvio padrao dos elementos aleatorios %gerados para cada ponto na coluna i: desviomatrizfit= std(matrizfit(:,i));

%media dos residuos para cada ponto de FE aleatorio gerado mediamatrizres = mean(matrizres(:,i));

%desvio padrao dos residuos para cada ponto de FE aleatorio gerado desviomatrizres = std(matrizres(:,i));

%vetor com as medias dos FEs aleatorios %geradas para cada frequencia medida; vetmediamatrizfit(i)=mediamatrizfit;

%vetor com os desvios padrao dos FEs %aleatorios geradas para cada frequencia medida; vetdesviomatrizfit(i)=desviomatrizfit;

%vetor com as medias dos residuos %para cada ponto aleatorio gerado e medido; vetmediamatrizres(i) = mediamatrizres;

%vetor com os desvios padrao dos residuos

```
%obtidos para cada ponto aleatorio gerado e medido;
vetdesviomatrizres(i) = desviomatrizres;
end
```

%loop para analise estatistica dos coeficientes (media e desvio padrao dos elementos)

for i = 1:nrat

%media dos coeficientes para cada grau
% dos N polinomios gerados para cada fit
%de FE aleat rio (mediap0 mediap1 mediap2 mediap3)
 mediamatrizcoef = mean(matrizcoef(:,i));

%vetor com as medias para cada grau %dos coeficientes dos N polinomios %gerados no fit

vetmediamatrizcoef(i) = mediamatrizcoef;

```
%vetor com os desvios padrao para cada
%grau dos coeficientes dos N polinomios gerados no fit
    vetdesviomatrizcoef(i)= desviomatrizcoef;
    end
```

%resultados vetmediamatrizfit vetdesviomatrizfit vetmediamatrizcoef vetdesviomatrizcoef vetmediamatrizres vetdesviomatrizres

%ordenar os valores aleatorios simulados %determinar os limites superior e inferior %com nivel de significancia/2 %nivel de significancia a = 1-PA; PA = 95,45% %Limite superior = int((a/2)\*n) %onde n = o numero total de iteracoes monte carlo %Limite inferior = int ((1-a/2)\*n)

% ordenar os elementos da matrizfit para cada frequencia %(distribuicao do histograma para cada frequencia) a = 1 - 0.9545;ii = round((a/2)\*N); %arredonda os limites para definicao das incertezas is = round((1-a/2)\*N); vetfitordenado = zeros (1,M);mediafitordenado = zeros (1,M);incertfitordenado = zeros (1,M);Li = zeros (1, M);Ls=zeros (1,M); Li1 = zeros (1,M);Ls1 = zeros (1, M);for j=1:M %ordena a linha com os valores de FE para frequencia da coluna j vetfitordenado = sort(matrizfit(:,j));

```
Li= vetfitordenado(ii);
Ls= vetfitordenado(is);
Li1(j) = Li;
Ls1(j)=Ls;
mediafitordenado(j)= (Li+Ls)/2;
incertfitordenado(j)= (Ls-Li)/2;
```

```
figure (j) %histograma frequencia j
histfit(vetfitordenado(ii:is))
title('Valores aleatorios de FE CVD');
ylabel ('Frequencia');
grid on
end
```

```
y=p1x2+p2x+p3/x2+q1x+q2 ordem 22
```

```
%ordena a coluna com os valores do coeficiente "p1"
vetfitcoefplordenado = sort(matrizcoef(:,1));
Licoefp1 = vetfitcoefplordenado(ii)
Lscoefp1 = vetfitcoefplordenado(is)
mediafitcoefp1 = (Licoefp1+Lscoefp1)/2
incertfitcoefp1 = (Lscoefp1-Licoefp1)/2
```

```
%ordena a coluna com os valores do coeficiente "p2"
vetfitcoefp2ordenado = sort(matrizcoef(:,2));
Licoefp2 = vetfitcoefp2ordenado(ii)
Lscoefp2 = vetfitcoefp2ordenado(is)
mediafitcoefp2 = (Licoefp2+Lscoefp2)/2
incertfitcoefp2 = (Lscoefp2-Licoefp2)/2
```

```
%ordena a coluna com os valores do coeficiente "q1"
vetfitcoefq1ordenado = sort(matrizcoef(:,3));
Licoefq1 = vetfitcoefp3ordenado(ii)
Lscoefq1 = vetfitcoefp3ordenado(is)
mediafitcoefq1 = (Licoefq1+Lscoefq1)/2
incertfitcoefq1 = (Lscoefq1-Licoefq1)/2
```

```
%ordena a coluna com os valores do coeficiente "q2"
vetfitcoefq2ordenado = sort(matrizcoef(:,4));
Licoefq2 = vetfitcoefq2ordenado(ii)
Lscoefq2 = vetfitcoefq2ordenado(is)
```

```
mediafitcoefq2 = (Licoefq2+Lscoefq2)/2
incertfitcoefq2 = (Lscoefq2-Licoefq2)/2
%grafico de residuos
residuo = zeros(1,19);
for i=1:19
residuo(i) = mediafitordenado(i)/mediaFEdiv(i)
            end
             for i=1:19
residuo2(i) = mediaFEdiv(i)/mediaFEdiv(i)
            end
           for i=1:19
residuo3(i) =
(1000000*(mediafitordenado(i)-mediaFEdiv(i))/mediaFEdiv(i))
          end
figure (24)
errorbar (freq, residuo, incertfitordenado, 'bv')
hold on
errorbar(freq, residuo2, desvioFEdiv, 'r:s')
    grid on
    xlabel('Frequ ncia (Hz)')
ylabel ('Residuo')
title('Res duo relativo');
legend ('Pontos ajustados', 'Pontos medidos') %legenda
       hold off
figure (25)
errorbar (freq, mediafitordenado, incertfitordenado, 'bv')
hold on
errorbar(freq, mediaFEdiv, desvioFEdiv, 'r:s')
```

```
grid on
xlabel('Frequencia (Hz)')
ylabel ('FE')
title('Valores FE');
legend ('Pontos ajustados MC','Pontos medidos' ) %legenda
hold off
```