



**Yuri dos Reis Oliveira**

**Desenvolvimento de Algoritmos para Estimativa de  
Parâmetros de Ensaio em Alta Tensão em Corrente  
Alternada e Contínua de Acordo com a Norma ABNT NBR  
IEC 60060-1:2013**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa

Rio de Janeiro  
Abril de 2017



**Yuri dos Reis Oliveira**

**Desenvolvimento de Algoritmos para Estimativa de  
Parâmetros de Ensaios em Alta Tensão em Corrente  
Alternada e Contínua de Acordo com a Norma ABNT NBR  
IEC 60060-1:2013**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa**

Orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia - PUC-Rio

**Dr. Marcelo Guimarães Rodrigues**

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

**Dr. Hélio de Paiva Amorim Junior**

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

**Ms. Márcio Thelio Fernandes da Silva**

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel

**Marcio da Silveira Carvalho**

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de abril de 2017

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Yuri dos Reis Oliveira**

Formado em Engenharia Elétrica pelo UNIFOA, Centro universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, Brasil em 2014.

#### Ficha Catalográfica

Oliveira, Yuri dos Reis

Desenvolvimento de Algoritmos para Estimativa de Parâmetros de Ensaio em Alta Tensão em Corrente Alternada e Contínua de Acordo com a Norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013 / Yuri dos Reis Oliveira; Orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa. - Rio de Janeiro: PUC, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, 2017.

169 f.: il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia.

Incluí referências bibliográficas.

1. Metrologia – Dissertação. 2. Metrologia. 3. Ensaio Elétrico. 4. Algoritmo de Medição. 5. ATCA. 6. ATCC. I. Barbosa, Carlos Roberto Hall. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro Técnico Científico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação. III. Título.

CDD: 61157

Deus primeiramente, aos meus pais Evandro e Fabiola, aos meus avós e também aos meus familiares. Por todo incentivo, força nos momentos difíceis e compreensão por minha ausência durante esse período.

## Agradecimentos

A CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este mestrado não poderia ter sido realizado.

Ao meu orientador Professor Doutor Carlos Roberto Hall Barbosa, pelos conselhos, pela oportunidade, paciência, orientação e toda contribuição, o qual sem a sua ajuda este trabalho não seria possível.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho Luiz Carlos de Azevedo, Valdir Remilson Santos e Marcus Vinicius Barros Lopes que me motivaram e incentivaram nessa dissertação, por todo apoio incondicional durante toda a fase de estudos e também a toda equipe dos laboratórios AT1, CA1, UAT e CA2.

Ao pesquisador e também amigo, Márcio Thelio Fernandes da Silva, por toda contribuição e correções deste trabalho. Que foram de suma importância para a conclusão deste trabalho.

Ao gerente de Departamento de Laboratório de Adrianópolis (DLA) Alexandre Neves por todo apoio institucional e pelo incentivo a pesquisa proporcionando o aumento do nosso conhecimento.

Ao técnico e amigo Marcio Ferreira da Costa e Silva, por todos os seus conselhos e ajudas na programação do algoritmo.

A todos do PósMQI, funcionárias da secretaria por toda atenção e despendido suporte e os excelentes professores responsáveis por minha formação.

De forma geral, a todos os amigos do Cepel, muito obrigado.

## Resumo

Oliveira, Yuri dos Reis; Hall, Carlos Roberto Barbosa (Orientador). **Desenvolvimento de Algoritmos para Estimativa de Parâmetros de Ensaio em Alta Tensão em Corrente Alternada e Contínua de Acordo com a Norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013**. Rio de Janeiro, 2017. 169p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os ensaios dielétricos em equipamentos para alta tensão em corrente alternada (ATCA) e corrente contínua (ATCC) requerem medições de grandezas elétricas, e as análises de desempenho dos equipamentos ensaiados são diretamente dependentes dos resultados obtidos por tais medições. Atualmente, para garantir a confiabilidade dos resultados dos ensaios, é necessário que a forma de onda da tensão aplicada ao equipamento esteja dentro dos níveis de distorção exigidos por norma. Para que ensaios possam ser realizados de forma normalizada, todos os parâmetros descritos na norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013 devem ser monitorados durante os ensaios em ATCA e ATCC. Normalmente um Sistema de Medição para Alta Tensão (SMAT) é formado por um divisor de tensão, um cabo de transmissão e um multímetro de bancada, permitindo assim uma análise quantitativa da tensão de ensaio por meio da medição do valor eficaz e/ou do valor médio. Entretanto, esse SMAT é inadequado para o monitoramento de todos os parâmetros normalizados, restringindo sua aplicação a uma análise puramente quantitativa da tensão de ensaio. Deste modo, o objetivo desta dissertação foi o desenvolvimento e validação de algoritmos de medição que fossem capazes de estimar todos os parâmetros normalizados. Sua validação foi realizada mediante ensaios experimentais em alta e baixa tensão, assim como pelo processamento das formas de onda digitais padrão pertencentes ao rascunho da norma IEC 61083-4. Os resultados obtidos foram positivos e dentro de limites aceitáveis, possibilitando a implantação desses algoritmos de medição nos laboratórios de ensaios (AT1, AT2, AT3, LabUAT) do CEPEL.

## Palavras-chave

Metrologia; Ensaio Elétrico; Algoritmo de Medição; ATCA; ATCC

## Abstract

Oliveira, Yuri dos Reis; Hall, Carlos Roberto Barbosa (Advisor). **Development of Algorithms for Estimating Parameters of High Voltage Direct and Alternating Current Tests in Accordance with the Standard ABNT NBR IEC 60060-1: 2013**. Rio de Janeiro, 2017. 169p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Dielectric tests on equipment with high voltage alternating current (HVAC) and direct current (HVDC) require measurements of electrical quantities, and the performance analysis of the tested equipment is directly dependent on the results obtained by those measurements. Currently, to ensure the reliability of the test results, the voltage waveforms applied to the equipment must be within the distortion levels required by standard. For tests to be performed in a standardized way, all parameters described in ABNT NBR IEC 60060-1: 2013 must be monitored during the HVAC and HVDC tests. Normally, a High Voltage Measurement System is formed by a voltage divider, a transmission cable and a multimeter, allowing a quantitative analysis of the test voltage by measuring the RMS value and/or mean value. However, this High Voltage Measurement System is inadequate for the monitoring all standard parameters, restricting its application to a purely quantitative analysis of the test voltage. Therefore, the objective of this dissertation was the development and validation of measurement algorithms that are able to estimate all the normalized parameters. Its validation was carried out through experimental tests in high and low voltage, as well as by the processing of the standard digital waveforms belonging to the draft of the standard IEC 61083-4. The results were positive and within acceptable limits, allowing the implementation of these measurement algorithms in CEPEL test (AT1, AT2, AT3, LabUAT) laboratories.

## Keywords

Metrology; Voltage Testing; Measurement Algorithm; HVAC; HVDC

## Sumário

1. Introdução	21
1.1. Laboratórios do CEPEL	22
1.2. Justificativa	24
1.3. Objetivo	24
1.4. Estrutura da Dissertação	25
2. Ensaio com Alta Tensão em Corrente Contínua (ATCC)	26
2.1. Requisitos para a tensão de ensaio	27
2.1.1. Tolerância para os parâmetros de ensaio em ATCC	29
2.2. Arranjo de Ensaio	29
2.2.1. Sistema de Geração de ATCC	30
2.2.1.1. Retificador de meia onda	32
2.2.1.2. Retificadores em Cascata (COCKROFT-WALTON)	35
2.2.2. Sistema de medição de ATCC	42
2.2.2.1 Dispositivo de conversão	43
2.2.2.2 Sistema de Transmissão	48
2.2.2.3. Instrumentos de Medição	50
2.2.2.4. Qualificação de um sistema de medição	51
2.3. Procedimentos de ensaio	51
3. Ensaio com Alta Tensão em Corrente Alternada (ATCA)	53
3.1. Requisitos para a tensão de ensaio	53
3.1.1. Distorção Harmônica Total (THD)	56
3.1.2. Tolerância para os parâmetros de ensaio em ATCA	56
3.2. Arranjo de Ensaio	57
3.2.1. Sistema de Geração de ATCA	57
3.2.1.1. Transformadores	58
3.2.1.2. Transformador de Ensaio em ATCA	59
3.2.1.3. Transformador em cascata	64
3.2.1.4. Circuitos Ressonantes	68

3.2.2. Sistema de Medição de ATCA	71
3.2.2.1. Dispositivo de conversão	72
3.2.2.2. Sistema de transmissão	75
3.2.2.3. Instrumentos de medição	78
3.2.2.4. Qualificação do sistema de medição	79
3.3. Procedimentos de ensaio	81
4. Algoritmo de Medição	83
4.1. Requisitos de Processamento de Sinais	83
4.1.1. IEC 61083-4	83
4.1.2. Gerador de Dados de Teste – TDG	85
4.1.3. Valores de referência	87
4.2. Estruturação do algoritmo de medição	87
4.2.1. Plataforma do algoritmo – Labview	88
4.3. Desenvolvimento do algoritmo	89
4.3.1. Pré-processamento	90
4.3.1.1. Filtro de médias	90
4.3.1.2. Filtro Savitzky-Golay (SG)	93
4.3.1.3. Remoção do <i>Offset</i>	95
4.3.2. Processamento de dados	95
4.3.3. Experimentos para escolha das Vis	108
5. Ensaio experimentais	111
5.1. Ensaio com TDG	112
5.1.1. Ruído Adicionado	113
5.1.2. Avaliação dos parâmetros de ensaio em ATCA	115
5.1.2.1. Algoritmo implementado	115
5.1.2.2. Análise e Resultados	116
5.1.3. Avaliação dos parâmetros de ensaio em ATCC	118
5.1.3.1. Algoritmo Implementado	119
5.1.3.2. Análise e resultados	119
5.2. Ensaio em Baixa Tensão (BT)	121
5.2.1. Ensaio BT em CA	123
5.2.1.1. Algoritmo implementado	125

5.2.1.2. Variando o offset	125
5.2.1.3. Variando a frequência	127
5.2.2. Ensaio em CC	128
5.2.2.1. Algoritmo implementado	129
5.2.2.2. Variando o ripple	129
5.2.3. Análise dos resultados	132
5.3. HVAT AC-DC	133
5.3.1. Interface Inicial	134
5.3.2. Interface de Informações	135
5.3.3. Interface de Configuração	137
5.3.4. Interface de Análise	139
5.4. Ensaio em Alta Tensão (AT)	139
5.4.1. Determinação do fator de escala em ATCA	142
5.4.2. Determinação do fator de escala em ATCC	144
5.4.3. Resultados comparativos	145
6. Discussão e conclusão	147
7. Referências bibliográficas	149
APÊNDICE A – Resultados dos ensaios com TDG	153
APÊNDICE B – Resultados dos ensaios em BT	163
APÊNDICE C – Resultados dos ensaios em AT	168

## Lista de figuras

Figura 1 - Exemplo de voltímetro de crista especial para ensaios com tensão CC e CA, modelo Haefely DMI551.	22
Figura 2 - Laboratório de Ultra Alta Tensão do CEPEL.	23
Figura 3 - Parâmetros do sinal de tensão para ensaios em ATCC. Em azul está a tensão alternada $V(t)$ que alimenta o sistema de geração de tensão contínua. Em vermelho a forma de onda de uma tensão contínua retificada em meia onda, mostrando sua componente alternada (ripple). Onde ripple é o Desvio periódico do valor médio aritmético da tensão de ensaio.	27
Figura 4 - Arranjo de Ensaio Universal. A figura mostra como devem ser interligados os equipamentos que compõem o arranjo de ensaio.	30
Figura 5 - (a) Associação em série dos diodos, formando um (b) bloco de diodos.	30
Figura 6 - Placa de diodos.	31
Figura 7 - Bloco de diodos do multiplicador de tensão do laboratório de Alta Tensão do CEPEL.	31
Figura 8 - (a) Circuito completo do retificador em meia onda, contendo todos os elementos intrínsecos do circuito; (b) Retificador em meia onda do laboratório de Calibração do CEPEL.	32
Figura 9 - (a) Circuito simplificado do retificador em meia onda. (b) Forma de onda da tensão fornecida pelo retificador em meia onda, sem o capacitor C. (c) Forma de onda da tensão fornecida pelo retificador em meia onda com capacitor C.	33
Figura 10 - Duplicador de tensão de Cockcroft e Walton (a) Circuito (b) Análise do sinal de tensão.	35
Figura 11 - Retificador em cascata.	37
Figura 12 – Sinal da tensão de saída do retificador, sem carga.	38
Figura 13 - Transferências de carga entre os capacitores. (a) ciclo de carregamento, (b) ciclo de transferência.	39
Figura 14 - Retificador de tensão nominal de 1MV do tipo Cockcroft –	

Walton.	41
Figura 15 - Sistema de medição genérico. 1- Dispositivo de conversão; 2 – Sistema de transmissão; 3 – Instrumento indicador e/ou registrador.	42
Figura 16 - Circuito básico de um divisor de tensão.	43
Figura 17 - Tipos construtivos de divisores de tensão.	44
Figura 18 - Divisor resistivo para ATCC. (a) diagrama esquemático. (b) Imagem de um divisor de 1 MV.	46
Figura 19 - (a) Detalhe da impedância de alta tensão suspensa. (b) Buchas usadas na unidade de alta.	46
Figura 20 - Circuito elétrico equivalente de um divisor resistivo.	47
Figura 21 - Cabo coaxial componente do Sistema de Transmissão.	48
Figura 22 - Sistema de medição sem atenuador.	49
Figura 23 - Sistema de medição com atenuador.	50
Figura 24 - Parâmetros do sinal de tensão para ensaios em ATCA.	54
Figura 25 - Arranjo genérico para ensaios em ATCA.	58
Figura 26 - Estrutura de um transformador monofásico.	59
Figura 27 - (a) Transformador em funcionamento a vazio, (b) Circuito elétrico equivalente a um transformador ideal com carga.	59
Figura 28 - Transformador de ensaio, (a) Circuito elétrico equivalente, (b) Transformador com tanque aterrado e bucha de alta tensão, (c) Transformador com tanque isolante.	60
Figura 29 - (a) Circuito elétrico do arranjo de ensaio. (b) Circuito elétrico equivalente referido ao secundário. (c) Diagrama de fasores.	62
Figura 30 - Transformador de ensaios.	64
Figura 31 – Transformadores em cascata (duas unidades de 600 kV em série).	65
Figura 32 - Primeiro transformador em cascata desenvolvido para ensaios de alta tensão.	65
Figura 33 - Diagrama elétrico do transformador em cascata.(1)	

Enrolamento primário, (2) Enrolamento secundário, (3) Enrolamento terciário e de excitação.	66
Figura 34 - Circuito simplificado e equivalente ao arranjo de ensaio com circuito ressonante série em ATCA.	68
Figura 35 - (a) Diagrama de potências. (b) Diagrama de fasores.	69
Figura 36 - Resposta em frequência das reatâncias de um circuito ressonante série.	70
Figura 37 - Divisor de tensão capacitivo. (a) Circuito equivalente, (b) Divisor capacitivo de 1,2 MV.	73
Figura 38 - Modelos de divisores capacitivos. (a) Unidade de alta tensão formada por vários capacitores em série. (b) Unidade de alta tensão formada por apenas um capacitor de alta tensão (c) Unidade de alta tensão formada por uma bucha capacitiva do transformador.	74
Figura 39 - Circuito equivalente de um divisor capacitivo.	74
Figura 40 - Cabo coaxial do sistema de transmissão.	76
Figura 41 - Sistema de medição para ensaios em ATCA sem atenuador.	77
Figura 42 - Modelo elétrico de um cabo coaxial.	77
Figura 43 - Sistema de medição para ensaios em ATCA com atenuador.	78
Figura 44 - Limites para respostas normalizadas de amplitude/frequência aceitáveis para sistemas de medição destinados à frequência fundamental única.	80
Figura 45 - Limite para respostas normalizadas de amplitude/frequência aceitáveis para sistemas de medição destinados a uma faixa de frequências fundamentais.	81
Figura 46 - Esquema simplificado do princípio de validação de software usando o TDG.	84
Figura 47- Fluxograma geral do algoritmo de medição.	87
Figura 48 - Painel frontal e Diagrama em Blocos.	89
Figura 49 - Análise do desempenho do filtro de média móvel. (a) Sinal original (ACV-A1); (b) Sinal adicionado a ruído de 2%; (c.1) Sinal filtrado ( $M=1$ ); (c.2) Sinal Filtrado ( $M=2$ ); (c.3) Sinal filtrado ( $M=$	

5); (c.4) Sinal filtrado ( $M=10$ ).	92
Figura 50 - Análise do desempenho do filtro SG. (a) Sinal original (ACV-A1); (b) Sinal mais ruído de 2%; (c.1) Sinal filtrado ( $N_j = 6$ e $Gr = 1$ ); (c.2) Sinal Filtrado ( $N_j = 6$ e $Gr = 2$ ); (c.3) Sinal filtrado ( $N_j = 6$ e $Gr = 5$ ); Sinal filtrado ( $N_j = 6$ e $Gr = 6$ ).	94
Figura 51 - Sinal genérico de tensão.	96
Figura 52 - VI "Cycle Average and RMS".	98
Figura 53 - VI "Basic Average DC-RMS".	99
Figura 54 - VI "Average DC-RMS".	99
Figura 55 - VI "AC & DC Estimator".	100
Figura 56 - Diagrama de blocos do VI "AC & DC Estimator".	100
Figura 57 - VI "Harmonic Distortion Analyzer".	101
Figura 58 - VI "AC & DC Estimator modificado".	102
Figura 59 - Diagrama de blocos do VI "AC & DC Estimator modificado".	102
Figura 60 - VI "Medi. FFT".	102
Figura 61 - Diagrama de blocos do VI "Medi. FFT".	102
Figura 62 - VI "Coeficientes de Fourier".	105
Figura 63 - Diagrama de blocos do VI "Coeficientes de Fourier".	105
Figura 64 - VI "Série de Fourier".	106
Figura 65 - Diagrama de blocos do VI "Série de Fourier".	107
Figura 66 - VI "Amplitude and Levels".	107
Figura 67 - VI "Waveform Peak Detection".	108
Figura 68 - VI "Peak Detector".	108
Figura 69 - Experimentos do desenvolvimento do algoritmo.	109
Figura 70 - Função densidade de probabilidade de uma distribuição normal.	113

Figura 71 - Vi Ruído Branco.	114
Figura 72 - Algoritmo usado nos ensaios em CA com TDG.	116
Figura 73 - Gráfico de erros percentuais dos Vis selecionados para os ensaios em baixa tensão.	118
Figura 74 - Algoritmo usado nos ensaios em CC com TDG.	119
Figura 75 - Gráfico de erros percentuais das Vis selecionadas para os ensaios em baixa tensão (a) VIs para estimativa do valor RMS. (b) VIs para estimativa do valor da tensão de ensaio.	121
Figura 76 - Instrumentos utilizados no ensaio em baixa tensão. (a) Gerador de função <i>Tektronix</i> AFG 3022B. (b) Osciloscópio <i>Tektronix</i> TDS 5104B	122
Figura 77 - Voltímetro de Crista <i>Haefely</i> DMI 551, usado como instrumento de referência.	122
Figura 78 - Circuito dos ensaios em baixa tensão.	123
Figura 79 - Arranjo dos ensaios em BT.	123
Figura 80 - Algoritmo usado nos ensaios em BT para tensão CA.	125
Figura 81 - Gráfico de erros para análise do valor de Crista.	126
Figura 82 - Gráfico de erros para análise da tensão de ensaio.	126
Figura 83 - Gráfico de erros para análise do valor RMS.	127
Figura 84 - Gráfico de erros para análise do valor de Crista.	127
Figura 85 - Gráfico de erros para análise do valor da tensão de ensaio.	128
Figura 86 - Gráfico de erros para análise do valor RMS.	128
Figura 87 - Algoritmo usado nos ensaios em BT para tensão CC.	129
Figura 88 - Gráfico de erros para análise do valor médio na polaridade negativa.	130
Figura 89 - Gráfico de erros para análise do ripple na polaridade negativa.	130
Figura 90 - Gráfico de erros para análise do fator de ripple na	

polaridade negativa.	131
Figura 91 - Gráfico de erros para análise do valor médio na polaridade positiva.	131
Figura 92 - Gráfico de erros para análise do ripple na polaridade positiva.	131
Figura 93 - Gráfico de erros para análise do fator de ripple na polaridade positiva.	132
Figura 94 - Algoritmo utilizado no software para medição dos parâmetros de ensaio ATCA.	133
Figura 95 - Algoritmo utilizado no software para medição dos parâmetros de ensaio ATCC.	134
Figura 96 - Interface Inicial.	135
Figura 97 - Interface de Informações.	135
Figura 98 - Botões para escolha de processamento.	136
Figura 99 - Menu de seleção do tipo da tensão do ensaio e os respectivos parâmetros que os algoritmos são capazes de medir. (a) Parâmetros de ensaios em ATCA. (b) Parâmetros de ensaios em ATCC.	136
Figura 100 - Interface de Configuração. (a) Para processamento dos dados do osciloscópio. (b) Para processamento dos dados simulados. (c) Para processamento dos dados do TDG.	138
Figura 101 - Interface de Análise.	139
Figura 102 - Diagrama elétrico e foto do divisor de tensão de alta impedância com tensão nominal de 15 kV que compõe o SM1.	140
Figura 103 - Diagrama de um arranjo de ensaio para calibração por comparação.	141
Figura 104 - Diagrama elétrico e foto do divisor universal SMR2.	141
Figura 105 - Multímetro <i>Agilent</i> 3458.	142
Figura 106 - Arranjo de ensaio para determinação do fator de escala em ATCA.	143
Figura 107 - Arranjo do ensaio para determinação do fator de escala.	144

Figura 108 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o valor RMS, com pré-processamento na condição sem offset.	154
Figura 109 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o valor RMS, com pré-processamento na condição com offset.	155
Figura 110 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o valor da tensão de ensaio com pré-processamento na condição sem filtro.	156
Figura 111 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o valor da tensão de ensaio com pré-processamento na condição com filtro de médias.	157
Figura 112 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o valor da tensão de ensaio com pré-processamento na condição com filtro Savitzky-Golay.	158
Figura 113 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o valor médio, com pré-processamento na condição e sem filtro.	159
Figura 114 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o valor médio, com pré-processamento na condição e com filtro médias.	159
Figura 115 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o valor médio, com pré-processamento na condição, com filtro Savitzky-Golay.	160
Figura 116 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o fator de ripple, com pré-processamento na condição e sem filtro.	161
Figura 117 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o fator de ripple, com pré-processamento na condição, com filtro de médias.	161
Figura 118 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o fator de ripple com pré-processamento na condição e com filtro Savitzky-Golay.	162
Figura 119 - Gráfico de erros da tensão de ensaio para análise da configuração do osciloscópio.	163
Figura 120 - Gráfico de erros da tensão RMS para análise da configuração do osciloscópio.	163
Figura 121 - Gráfico de erros da tensão de crista para análise da configuração do osciloscópio.	164
Figura 122 - Gráfico de erros da tensão de ensaio para análise da configuração do osciloscópio.	164

Figura 123 - Gráfico de erros da tensão RMS para análise da configuração do osciloscópio.	164
Figura 124 - Gráfico de erros da tensão de crista para análise da configuração do osciloscópio.	165
Figura 125 - Gráfico de erros da tensão média para análise da configuração do osciloscópio na polaridade positiva.	165
Figura 126 - Gráfico de erros da amplitude de ripple para análise da configuração do osciloscópio na polaridade positiva.	166
Figura 127 - Gráfico de erros do fator de ripple para análise da configuração do osciloscópio na polaridade positiva.	166
Figura 128 - Gráfico de erros da tensão média para análise da configuração do osciloscópio na polaridade negativa.	167
Figura 129 - Gráfico de erros da amplitude de ripple para análise da configuração do osciloscópio na polaridade negativa.	167
Figura 130 - Gráfico de erros do fator de ripple para análise da configuração do osciloscópio na polaridade negativa.	167

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Tolerância para os parâmetros em ensaios ATCC.	29
Tabela 2 - Tensão sobre os capacitores.	38
Tabela 3 - Tipos de divisores e suas aplicações.	45
Tabela 4 - Tolerância e incerteza dos parâmetros de ensaio.	57
Tabela 5 - Tipos de transformadores e isolamentos, e alguns parâmetros relevantes.	61
Tabela 6 - Parâmetros de ensaio estimados nas rotinas do software.	84
Tabela 7 - Formas de onda de referência e seus parâmetros para tensão em corrente alternada.	86
Tabela 8 - Formas de onda de referência e seus parâmetros para tensão em corrente contínua.	86
Tabela 9 - Erros médios (RMSE) do filtro de média móvel.	92
Tabela 10 - Erros médios (RMSE) do filtro Savitzky-Golay.	94
Tabela 11 - VIs selecionadas para desenvolvimento do algoritmo e parâmetros estimados por cada VI.	96
Tabela 12 - Análise de erros percentuais dos VIs selecionados para os ensaios em baixa tensão CA.	117
Tabela 13 - Análise de erros das VIs selecionadas para os ensaios em baixa tensão CC.	121
Tabela 14 - Valores obtidos durante o ensaio de determinação do fator de escala do SM1 para ATCA.	143
Tabela 15 - Valores obtidos durante o ensaio de determinação do fator de escala do SM1 para ATCC.	145
Tabela 16 - Comparação entre os fatores de escala.	145
Tabela 17 - Análise dos VIs que estimam o valor RMS, com pré-processamento na condição sem offset.	153
Tabela 18 - Análise dos VIs que estimam o valor RMS, com pré-	

processamento na condição com offset.	154
Tabela 19 - Análise dos VIs que estimam o valor da tensão de ensaio, com pré-processamento na condição sem filtro.	155
Tabela 20 - Análise dos VIs que estimam o valor da tensão de ensaio com pré-processamento na condição com filtro de médias.	156
Tabela 21 - Análise dos VIs que estimam o valor da tensão de ensaio com pré-processamento na condição com filtro Savitzky-Golay.	157
Tabela 22 - Análise dos VIs que estimam o valor médio com pré-processamento na condição e sem filtro.	158
Tabela 23 - Análise dos VIs que estimam o valor médio, com pré-processamento na condição, com filtro de médias.	159
Tabela 24 - Análise dos VIs que estimam o valor médio com pré-processamento na condição e com filtro Savitzky-Golay.	160
Tabela 25 - Análise dos VIs que estimam o fator de ripple com pré-processamento na condição e sem filtro.	160
Tabela 26 - Análise dos VIs que estimam o fator de ripple com pré-processamento na condição e com filtro de médias.	161
Tabela 27 - Análise dos VIs que estimam o fator de ripple com pré-processamento na condição e com filtro Savitzky-Golay.	162
Tabela 28 - Parâmetros medidos pelo HVAT AC-DC nos ensaios em alta tensão em ATCA.	168
Tabela 29 - Parâmetros medidos pelo HVAT AC-DC nos ensaios em alta tensão em ATCC.	169

# 1 Introdução

Ensaaios dielétricos realizados em alta tensão, contínua (ATCC) ou alternada (ATCA), devem ser executados em conformidade à norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013 [1], que determina quais parâmetros devem ser monitorados durante o ensaio.

Atualmente, nos laboratórios brasileiros destinados a ensaios elétricos em equipamentos de alta tensão, as medições de todos os parâmetros descritos na norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013 ainda não estão implementadas. Em sua totalidade os ensaios são realizados com sistemas de medição compostos por divisores de tensão e multímetros de bancada, possibilitando uma medição muito exata do valor eficaz ou valor médio. Entretanto, é necessário e de fundamental importância conhecer com exatidão a forma de onda do sinal aplicado ao objeto sob ensaio, a fim de identificar quaisquer distorções provenientes da fonte de alimentação, ou em decorrência de alguma característica ou falha do equipamento sob ensaio, que possam comprometer o resultado do ensaio.

Para que os laboratórios possam se adequar à norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013 e monitorar todos os parâmetros da tensão que são requeridos, é necessário um investimento na compra de equipamentos de medição, como os voltímetros de crista especiais (ilustrado na Figura 1), que são capazes de medir todos os parâmetros requeridos dentro dos limites aceitáveis de incerteza de medição. Uma alternativa para que os laboratórios tenham seus sistemas de medição em conformidade com as normas ABNT NBR IEC 60060-1:2013 e ABNT NBR IEC 60060-2:2016 [2] é a implementação de software de medição dedicado, integrado a osciloscópios ou registradores digitais que tenham uma resolução maior ou igual a 8 bits, tendo essa alternativa um menor custo, uma vez que a maioria dos laboratórios já possui osciloscópios que atendem aos requisitos normalizados.



Figura 1 - Exemplo de voltímetro de crista especial para ensaios com tensão CC e CA, modelo Haefely DMI551.

Embora o desenvolvimento de algoritmos específicos para ensaios em ATCC e ATCA seja uma alternativa viável, sua validação ainda carece de alguns recursos, pois a norma [3], que definirá os dados digitais das formas de onda padronizadas para a validação dos algoritmos usados em ensaios de ATCA e ATCC, ainda se encontra em rascunho, com previsão de sua primeira publicação pela IEC em abril de 2017.

### 1.1. Laboratórios do CEPEL

O CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, foi fundado em 1974 pela Eletrobrás e suas subsidiárias Furnas, Chesf, Eletronorte e Eletrosul, com a missão de conceber e fornecer soluções tecnológicas voltadas à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Desde sua criação, desenvolve projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P&D+I) e presta serviços tecnológicos e laboratoriais para as empresas Eletrobrás e todo o setor elétrico brasileiro. Desde sua fundação, o Cepel participa da formulação da política energética sob a responsabilidade do Ministério de Minas e Energia e conselhos políticos, contribuindo também para o planejamento de longo prazo do setor [4, 5].

O CEPEL possui um complexo de 35 laboratórios, sendo 25 deles instalados em sua sede, na Unidade da Ilha do Fundão, no Rio de Janeiro; e 10 na unidade de Adrianópolis, em Nova Iguaçu (RJ). Vários desses laboratórios são pioneiros em suas atividades no Brasil, e por vezes únicos na América do Sul. As principais

especialidades envolvidas são: alta tensão e potência; materiais; eficiência energética; medição; calibração; supervisão e controle e computação intensiva [6].

Além de possuir uma infraestrutura laboratorial com grande variedade de serviços, o CEPEL vem formando, ao longo das últimas três décadas, equipes de técnicos e especialistas com amplo conhecimento em técnicas de ensaio e medição em alta tensão, possibilitando, em um curto espaço de tempo, a operação satisfatória das novas instalações laboratoriais em Ultra Alta Tensão (tensão acima de 1 MV em CA, ilustrado na Figura 2). Entre suas linhas de pesquisa, encontra-se o estudo da configuração de arranjos de linhas de transmissão CA ou CC em ultra alta tensão, possibilitando que sistemas de transmissão utilizados para esses níveis de tensão tenham as menores perdas, ou seja, que transmitam grandes blocos de potência com maior eficiência.



Figura 2 - Laboratório de Ultra Alta Tensão do CEPEL.

Além dos diferentes ensaios realizados para pesquisa em diversas áreas da engenharia elétrica, o CEPEL também é conhecido como referência no campo da calibração de instrumentos de medição e sistemas de medição. Os laboratórios de calibração do CEPEL, CA1 e CA2, localizados no complexo de Adrianópolis, são os laboratórios que possuem a capacidade técnica e estrutural para atuar na

calibração de instrumentos de medição e sistemas de medição, respectivamente, utilizados em ensaios de alta tensão para CA, CC, impulso atmosférico pleno e cortado e impulso de manobra [5, 6].

## **1.2. Justificativa**

A grande maioria dos serviços de calibração dos laboratórios CA1 e CA2 são acreditados pelo CGCRE (Coordenação Geral de Acreditação) do INMETRO de acordo com a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025. Os laboratórios CA1 e CA2 contribuem para a manutenção das garantias metrológicas e apoiam o desenvolvimento de novas tecnologias que o CEPEL coloca à disposição do sistema elétrico brasileiro. Todos os seus procedimentos, de ensaio e calibração, são realizados com base em normas nacionais e internacionais, garantindo a reprodutibilidade e execução dos ensaios e calibrações de forma adequada. Porém, os laboratórios de ensaios em ATCA e ATCC necessitam estar adequados para a realização de ensaios e/ou calibrações de acordo com a norma [1] e a futura norma [3]. Nesse sentido, um ganho significativo da Qualidade será alcançado monitorando toda a forma de onda do sinal de tensão aplicado, e não somente indicando o valor eficaz ou médio. Assim, para adequar os laboratórios do CEPEL ao menor custo possível, foi proposto o desenvolvimento de um software dedicado em plataforma LabVIEW, utilizando como instrumentos digitalizadores os osciloscópios digitais que estão disponíveis em cada laboratório.

Assim, uma nova metodologia de ensaios em alta tensão em corrente contínua e corrente alternada está sendo proposta, de modo a realizá-los monitorando todos os parâmetros de ensaio e utilizando apenas um instrumento de medição, garantindo assim uma análise completa da tensão de ensaio de forma quantitativa e qualitativa.

## **1.3. Objetivo**

O objetivo desta dissertação é desenvolver algoritmos computacionais para processamento e análise de sinais relativos a ensaios em equipamentos de alta tensão e ultra alta tensão alternada e contínua, visando estimar os parâmetros

estabelecidos pela Norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013 e validá-los de acordo com a futura Norma IEC 61083-4.

#### **1.4. Estrutura da Dissertação**

Essa dissertação encontra-se estruturada nos sete capítulos a seguir:

O **capítulo 1** possui Introdução, contexto, justificativa, objetivo, descrição do CEPTEL e a estrutura da dissertação.

No **capítulo 2** são descritos os requisitos dos ensaios em alta tensão em corrente contínua (ATCC) segundo a norma ABNT NBR IEC 60060-1/2013. São abordados todos os requisitos normalizados para todos os elementos do arranjo do ensaio, assim como os procedimentos de ensaio e parâmetros medidos durante a execução do ensaio.

No **capítulo 3** são descritos os requisitos dos ensaios em alta tensão em corrente alternada (ATCA) segundo a norma ABNT NBR IEC 60060-1/2013. São abordados todos os requisitos normalizados para todos os elementos do arranjo do ensaio, assim como os procedimentos de ensaio e parâmetros medidos durante a execução do ensaio.

No **capítulo 4** são tratados os elementos normativos para a validação software e também são descritos os métodos selecionados para desenvolvimento do algoritmo, os elementos de pré-processamento e processamento de sinal.

No **capítulo 5**, são realizados todos os experimentos práticos, para a escolha do melhor método de pré-processamento e processamento conforme cada parâmetro medido. Também neste capítulo são apresentados os algoritmos utilizados em cada experimento, durante a fase de desenvolvimento. Neste capítulo também são analisados todos os dados obtidos durante os experimentos, possibilitando o desenvolvimento final do algoritmo de medição.

As conclusões, discussões e trabalhos futuros são relatados no **capítulo 6**.

## 2 Ensaio com Alta Tensão em Corrente Contínua (ATCC)

Há algumas décadas, tensões elevadas em corrente contínua eram utilizadas predominantemente em investigações para trabalhos de pesquisa científica. Atualmente, este tipo de tensão também é utilizada industrialmente e em sistemas de transmissão [7].

A transmissão em ATCC apresenta algumas vantagens se comparada à transmissão em Alta Tensão em Corrente Alternada (ATCA). A principal vantagem é a diminuição das perdas durante a transmissão pois, devido à frequência idealmente nula da tensão CC, perdas devido a correntes capacitivas para terra seriam igualmente nulas, sendo esta característica de fundamental importância para a transmissão em longas distâncias. Entretanto, para transmissão em ATCC, é necessário inicialmente retificar a tensão alternada proveniente dos geradores e, posteriormente, no final da transmissão, empregar inversores de tensão, pois os sistemas de distribuição nos centros urbanos utilizam a tensão alternada [8].

Em laboratórios de ensaios utiliza-se a tensão contínua para verificar a suportabilidade dielétrica dos equipamentos do sistema de transmissão em ATCC, tais como geradores CC, isoladores e cabos de transmissão. Outra aplicação de grande importância são os ensaios de cabos com capacitâncias relativamente elevadas, que exigiriam uma corrente muito alta caso fossem ensaiados em ATCA. Entretanto, se ensaiados em ATCC, a corrente de carregamento será baixa, demandando, contudo, um tempo maior para execução do ensaio [9].

A diversidade atual de equipamentos do setor elétrico estabelece a necessidade de uma grande variedade de ensaios em ATCC, que podem estar ligados à física experimental ou ao comissionamento de equipamentos industriais e para o setor elétrico. Para que os ensaios tivessem garantia de confiabilidade e de repetibilidade, foi necessário estabelecer alguns parâmetros que deveriam ser analisados no sinal de tensão ao qual estaria submetido o equipamento sob ensaio, conforme descrito nas seções subsequentes [10].

## 2.1. Requisitos para a tensão de ensaio

Nesta seção serão descritos os requisitos da tensão de ensaio em ATCC, conforme a norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013 [1].

Os requisitos do sinal de tensão do ensaio em ATCC devem ser analisados e monitorados durante os ensaios. Assim, caso o equipamento ensaiado não atenda às expectativas, o laboratório estará respaldado mediante estes dados para fornecer o diagnóstico referente ao ensaio.

Segundo a norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013, devem ser analisados os seguintes parâmetros:

- Tensão de ensaio – Valor médio aritmético.
- Amplitude de ripple – Metade da diferença entre os valores máximo e mínimo da tensão de ensaio.
- Fator de ripple – Relação entre a amplitude da ondulação e o valor da tensão de ensaio.

Estes parâmetros são visualizados de forma mais clara por meio da Figura 3.

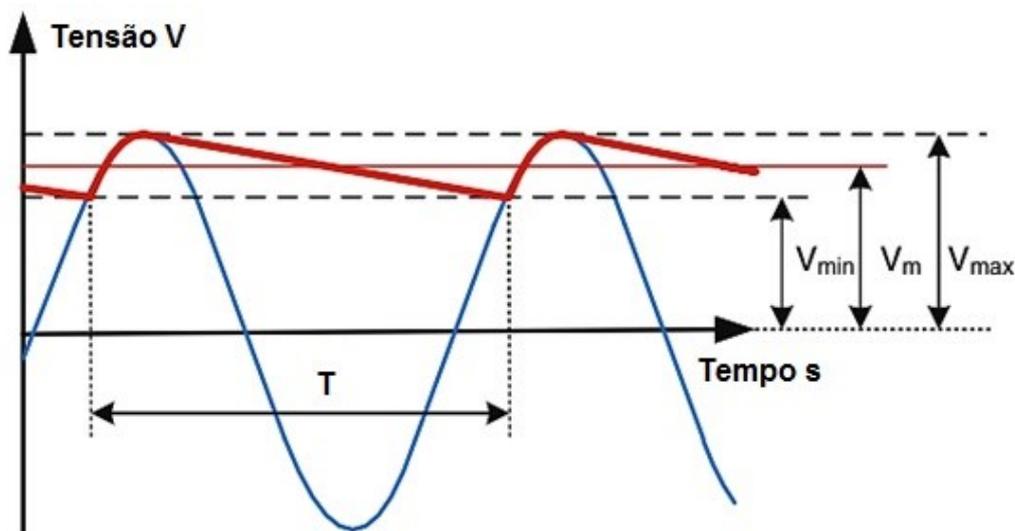


Figura 3 - Parâmetros do sinal de tensão para ensaios em ATCC. Em azul está a tensão alternada  $V(t)$  que alimenta o sistema de geração de tensão contínua. Em vermelho a forma de onda de uma tensão contínua retificada em meia onda, mostrando sua componente alternada (ripple). Onde ripple é o Desvio periódico do valor médio aritmético da tensão de ensaio.

O valor da tensão de ensaio  $V_m$  é dado pela média aritmética da tensão aplicada  $V(t)$  durante um período  $T$ . Como se pode ver na Figura 3, a tensão aplicada é normalmente oscilante e periódica, devido ao carregamento e

descarregamento dos capacitores no retificador. Deste modo, como o sinal de tensão é variante no tempo, o valor de  $V_m$  pode ser definido mediante a integral da tensão aplicada durante um período  $T$ , dividida pelo próprio período, ou seja,

$$V_m = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V(t) dt. \quad (1)$$

A *amplitude de ripple* é definida como a metade da diferença entre os valores máximo e mínimo da oscilação do sinal de tensão  $V(t)$ , sendo esta oscilação a componente alternada presente no sinal de tensão CC. A amplitude de ripple é, portanto, dada por

$$\Delta\delta = \frac{V_{max} - V_{min}}{2}. \quad (2)$$

O outro parâmetro que a norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013 solicita que seja avaliado é o fator de *ripple*  $\delta$ . O fator de *ripple* é adimensional e obtido por meio da relação entre a amplitude de ripple  $\Delta\delta$  e a tensão de ensaio  $V_m$ , conforme

$$\delta = \frac{V_{max} - V_{min}}{2 \cdot V_m} \cdot 100 \quad (3)$$

Embora muitos laboratórios não monitorem este parâmetro durante os ensaios, pelo fato da necessidade de instrumentos que tenham capacidade de indicar o valor da tensão de ensaio e o valor da amplitude de *ripple*, este parâmetro é de grande importância para avaliação do sinal de tensão a que está sendo submetido o equipamento, pois representa a qualidade da tensão CC. Em ensaios em que a tensão CC possui um fator de *ripple* elevado o surgimento de descargas parciais ocorre em níveis de tensão mais baixos que o normal [8, 9].

### 2.1.1.

#### Tolerância para os parâmetros de ensaio em ATCC

O conceito de tolerância, em muitas ocasiões, é confundido com o conceito de incerteza de medição. Define-se tolerância como a diferença permitida entre o valor medido e o valor especificado [11]. Segundo a norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013, a tolerância permitida para os parâmetros analisados durante a execução do ensaio pode ou não estar associada ao tipo e ao tempo de duração do ensaio, assim como na norma ABNT NBR IEC 60060-2:2016 são definidos os valores das incertezas de medição destes parâmetros, conforme a Tabela 1 apresenta.

Tabela 1 - Tolerância para os parâmetros em ensaios ATCC.

Parâmetros da tensão de ensaio	Tempo de Ensaio	Tolerância	Incerteza de Medição
Valor da tensão de ensaio	≤60 s	± 1%	≤ 3%
	> 60 s	± 3%	
Amplitude de ripple	-	-	≤ 10%
Fator de ripple	-	≤ 3%	-

### 2.2.

#### Arranjo de Ensaio

O arranjo de ensaio é composto por sistemas com funções bem definidas, que contribuem para a execução de um ensaio em conformidade com as normas aplicáveis e para uma correta avaliação dos resultados obtidos.

Os sistemas que compõem o arranjo são definidos conforme sua função e, embora estes sistemas possuam subsistemas, os principais são descritos a seguir:

- Sistema de Geração de tensão
- Sistema de Medição de tensão

A configuração do posicionamento dos sistemas irá depender de cada ensaio e/ou objeto ensaiado. Porém, a interligação será comum a qualquer tipo de ensaio. A Figura 4 mostra o modelo de conexão dos sistemas que formam o arranjo, e na sequência os diversos componentes são detalhados.

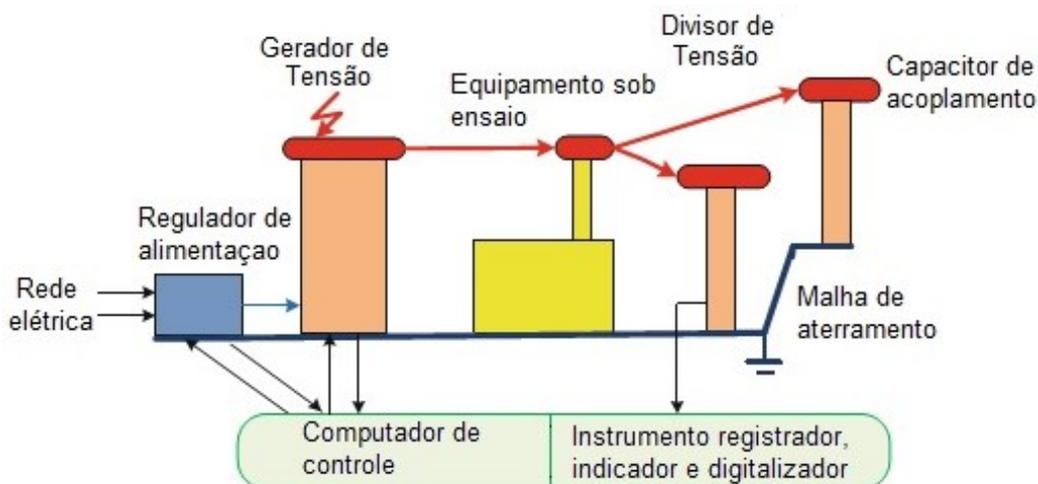


Figura 4 - Arranjo de Ensaio Universal. A figura mostra como devem ser interligados os equipamentos que compõem o arranjo de ensaio.

### 2.2.1. Sistema de Geração de ATCC

O circuito retificador é a forma mais utilizada e também a mais eficiente para se obter uma tensão contínua com amplitude elevada. A conversão CA-CC é realizada mediante o uso de retificadores de estado sólido modernos, ou seja, diodos retificadores e, conforme a sua configuração no circuito, pode ser utilizada para diferentes aplicações [8].

Os diodos utilizados nos retificadores são dispositivos semicondutores de silício que, embora suportem tensões reversas de pico de 2500 V, são associados em série em retificadores de alta tensão (Figura 5), formando blocos de diodos, de maneira que, durante o período de não condução, a tensão reversa seja distribuída igualmente pelos diodos associados em série, obtendo assim a capacidade de suportar uma maior tensão reversa. Por questões de projeto, cada bloco de diodos possui a simbologia de um único diodo, conforme indicado na Figura 5. Nas Figuras 6 e 7 podem ser vistas as placas dos diodos, que empilhadas formam o bloco de diodos, respectivamente [7].

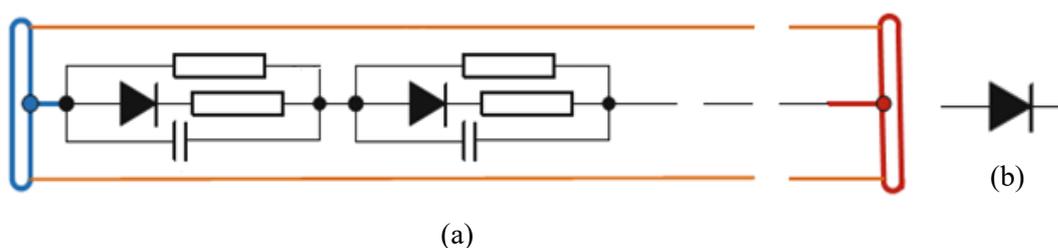


Figura 5 - (a) Associação em série dos diodos, formando um (b) bloco de diodos.

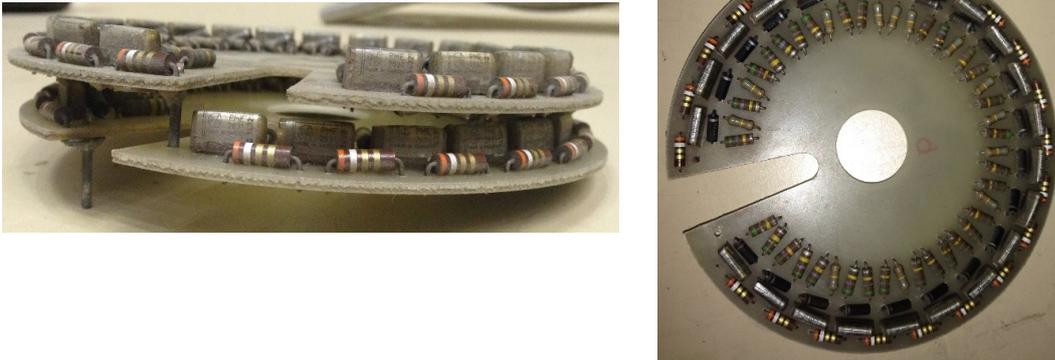


Figura 6 - Placa de diodos.



Figura 7 - Bloco de diodos do multiplicador de tensão do laboratório de Alta Tensão do CEPEL.

A tensão reversa à qual o bloco de diodos será submetido é o dobro do valor de pico da tensão de alimentação. Assim, como o bloco de diodos suporta uma tensão reversa maior, é possível realizar a conversão CA-CC em níveis de tensão mais elevados [12, 7].

Embora a conversão seja feita de modo a obter uma tensão contínua, pequenos traços da componente alternada (que formam o *ripple*) podem ser encontrados na saída do retificador, sendo que esta variação aumenta proporcionalmente conforme a corrente de carga. A maneira encontrada para suprimir essa componente alternada é a inserção de um capacitor em paralelo com

o equipamento sob ensaio. No entanto, caso o equipamento tenha uma grande componente capacitiva, a inserção do capacitor não é necessária [12, 13].

Devido à grande variedade de circuitos retificadores existentes, nesta dissertação serão apresentados somente os retificadores encontrados nos laboratórios do CEPEL.

### 2.2.1.1. Retificador de meia onda

O retificador monofásico de meia onda é o circuito mais simples utilizado para a obtenção de ATCC. Seu nome “meia onda” é atribuído ao fato deste circuito aproveitar apenas meio ciclo da tensão de alimentação CA. O seu circuito completo pode ser visto na Figura 8.

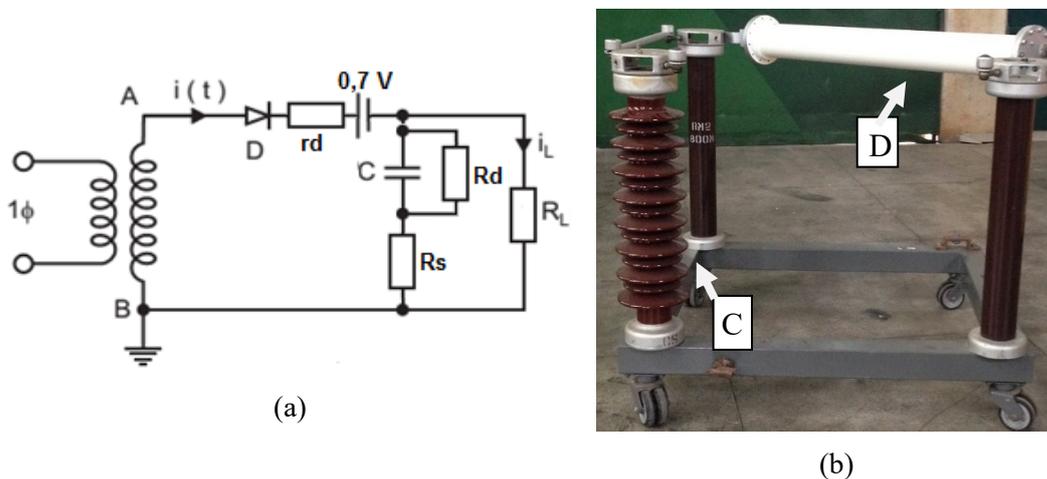


Figura 8 - (a) Circuito completo do retificador em meia onda, contendo todos os elementos intrínsecos do circuito; (b) Retificador em meia onda do laboratório de Calibração do CEPEL.

Na Figura 8(a) são consideradas todas as perdas elétricas do circuito ( $R_d$ ,  $r_d$ ,  $R_s$ ) e  $R_L$  o equipamento sob ensaio. Porém, estas perdas são desprezadas. Assim, o circuito do retificador pode ser analisado por meio do circuito simplificado da Figura 9(a), no qual foram retiradas as reatâncias do transformador, a resistência de condução do diodo, e o capacitor é considerado ideal.

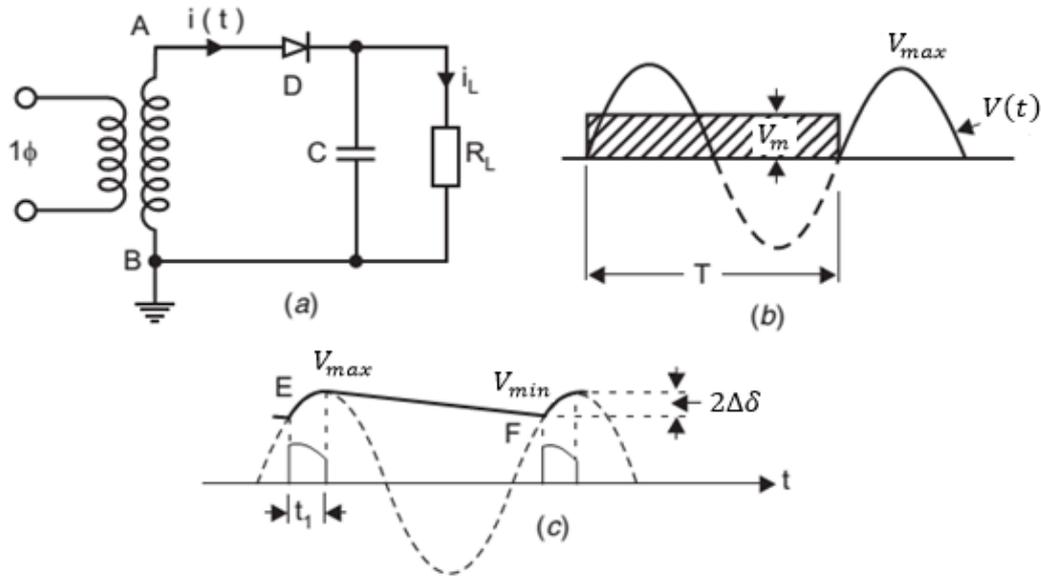


Figura 9 - (a) Circuito simplificado do retificador em meia onda. (b) Forma de onda da tensão fornecida pelo retificador em meia onda, sem o capacitor C. (c) Forma de onda da tensão fornecida pelo retificador em meia onda com capacitor C.

Neste circuito têm-se dois momentos, o período de condução do diodo e o período de não condução do mesmo. Assim, quando o diodo está conduzindo o capacitor é carregado com a máxima tensão de pico fornecida através do transformador, ou seja,  $V_{max}$ . O período de não condução do diodo é definido a partir do momento que a tensão de alimentação for menor que a tensão com a qual o capacitor está carregado. No semiciclo em que não há condução, o diodo é submetido a uma tensão reversa máxima igual a duas vezes a tensão máxima,  $2V_{max}$ , devido à soma das tensões da fonte e do capacitor. Logo, os diodos devem ser dimensionados para suportarem esta tensão reversa.

O sinal de tensão fornecido pelo retificador pode ser visto na Figura 9(c), onde se pode perceber que, durante o período em que o diodo não está conduzindo, a tendência do capacitor é descarregar, conforme a constante de tempo dado pelo produto  $R_L C$ . O carregamento do capacitor ocorrerá quando a tensão do transformador for maior que a tensão  $V_{min}$  do ripple, assim o diodo estará conduzindo novamente, carregando então o capacitor com a tensão máxima [14].

Durante o descarregamento do capacitor, a carga  $Q$  fornecida durante um período  $T$  pode ser equacionada como

$$Q = \int_0^T i_L(t) dt = \int_0^T \frac{V_{R_L}(t)}{R_L} dt = IT = \frac{I}{f}, \quad (4)$$

onde  $I$  é a corrente média que percorre o equipamento sob ensaio e  $i_L(t)$  e  $V_{R_L}(t)$  são as componentes instantâneas da corrente e tensão do equipamento sob ensaio.

A pequena carga  $dQ$  consumida pelo equipamento ocasiona uma pequena variação da tensão elétrica  $dV$ , nos terminais do capacitor, em um breve período  $dt$ , onde

$$dQ = CdV. \quad (5)$$

A pequena variação da tensão é delimitada pelos valores  $V_{min}$  e  $V_{max}$ . Logo, a carga  $Q$  entregue pelo capacitor também pode ser equacionada como

$$\int dQ = \int_{V_{max}}^{V_{min}} C dV = -C(V_{max} - V_{min}) \therefore Q = -C(V_{max} - V_{min}). \quad (6)$$

Como descrito anteriormente (equação (2)), esta pequena variação de tensão é conhecida como *amplitude de ripple*.

Substituindo a equação (2) na equação (6) tem-se

$$Q = -2\Delta\delta C. \quad (7)$$

Igualando-se as equações (7) e (4) obtém-se o valor da variação de tensão como

$$\Delta\delta = \frac{IT}{2C} = \frac{I}{2fC} \quad (8)$$

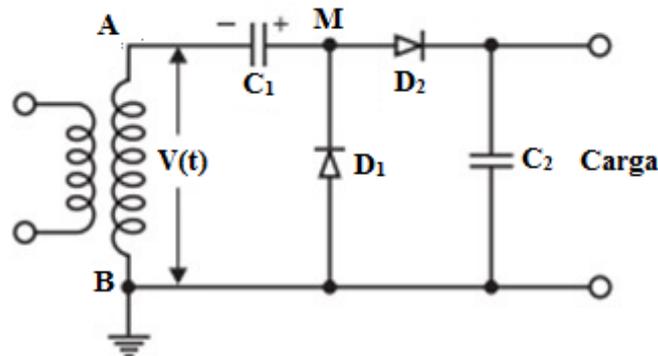
A equação (8) mostra que a amplitude de *ripple* da tensão fornecida pelo retificador depende da corrente de carga do equipamento sob ensaio, como também dos parâmetros do próprio circuito,  $f$  e  $C$ . Assim, o produto  $fC$  é de fundamental importância para a estabilidade do sinal fornecido pelo retificador.

Porém, como a frequência da fonte do retificador é considerada constante, a variação da capacitância será inversamente proporcional ao *ripple*. [14]

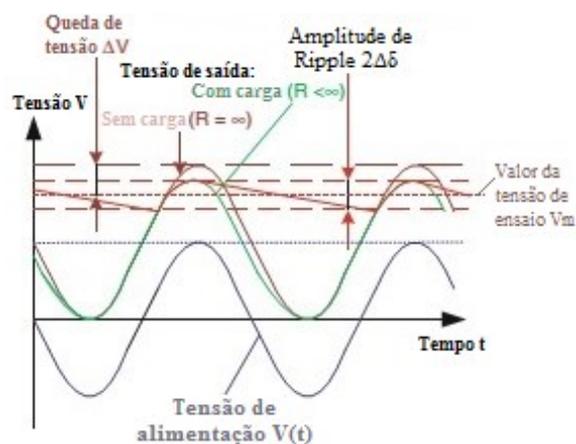
### 2.2.1.2. Retificadores em Cascata (COCKROFT-WALTON)

A grande forma de utilização dos circuitos retificadores nos laboratórios de ensaio em alta tensão é sua conexão em cascata, permitindo que níveis de tensão mais elevados sejam alcançados, sem a necessidade de uma fonte de alimentação muito elevada com elementos especialmente projetados. Assim, é possível obter retificadores a um custo mais baixo.

O circuito básico que constitui cada estágio do retificador em cascata é um circuito duplicador, proposto por Greinacher em 1920 e aperfeiçoado por Cockcroft e Walton em 1932 [15], conforme indicado na Figura 10(a). Para maior entendimento primeiramente será explicado o funcionamento do circuito duplicador.



(a)



(b)

Figura 10 - Duplicador de tensão de Cockcroft e Walton (a) Circuito (b) Análise do sinal de tensão.

O funcionamento do duplicador se baseia em utilizar capacitores como dobradores de tensão a fim de se obter uma tensão contínua de saída mais elevada que a tensão de pico da fonte senoidal de entrada. O funcionamento é explicado da seguinte forma:

- Durante o semiciclo negativo da tensão alternada ( $V(t)$ ) que alimenta o circuito, o diodo  $D_1$  irá conduzir, retificando-a e então carregando o capacitor  $C_1$  com a máxima tensão ( $V_{max}$ ) fornecida por  $V(t)$ . O capacitor  $C_1$  será carregado na polaridade conforme a Figura 10(a).
- Com o capacitor  $C_1$  carregado a referência da tensão  $V(t)$  é elevada, como mostra a Figura 10(b), pois o mesmo está em série com o transformador. Então, durante o seu semiciclo positivo o diodo  $D_2$  irá conduzir, carregando o capacitor  $C_2$  com até  $2V_{max}$ . Assim, o nó A estará submetido a uma tensão senoidal que varia de 0 a  $2V_{max}$ , conforme a Figura 10(b).

Considerando que exista um item sob ensaio ( $R < \infty$ ) acoplado à saída do duplicador, o capacitor  $C_2$  será descarregado, pois estará fornecendo corrente para a carga, logo o potencial em seus terminais diminuirá devido a sua perda de carga. Assim o diodo  $D_2$  voltará a conduzir somente quando a tensão no nó A for maior que a tensão em  $C_2$ .

O valor da tensão de saída deve ser observado, pois seu valor estará sujeito à queda de tensão  $\Delta V$  provocada por perdas na carga e também nos elementos presentes no circuito.

Com o conhecimento *a priori* do funcionamento do duplicador é possível analisar com maior facilidade o circuito em cascata de Cockcroft e Walton, pois seu circuito é formado por duplicadores conectados em série, ou seja, em cascata.

Nas Figuras 11 e 12 são apresentados o circuito em cascata e o sinal de tensão gerado, respectivamente. O sinal visto na Figura 12 corresponde à saída de tensão do retificador em cascata, quando o mesmo não possui nenhuma carga acoplada.

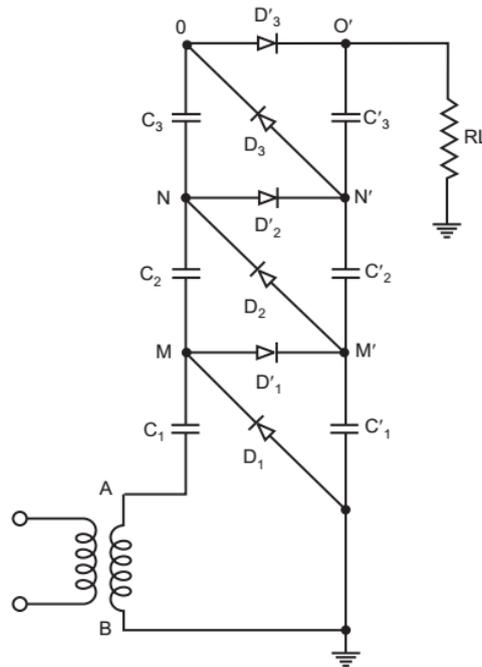


Figura 11 - Retificador em cascata.

Conforme na Figura 12, os diodos  $D_1$ ,  $D_2$  e  $D_3$ , estão conduzindo no semiciclo negativo da senoide, enquanto os diodos  $D'_1$ ,  $D'_2$  e  $D'_3$  conduzem no semiciclo positivo. O funcionamento do circuito é explicado da seguinte forma:

- Durante o semiciclo negativo a fonte carrega o capacitor  $C_1$  com o valor máximo da tensão da fonte,  $V_{max}$ .
- Durante o semiciclo positivo o capacitor  $C'_1$  é carregado com o dobro da tensão máxima da fonte,  $2V_{max}$ , devido à soma das tensões da fonte e sobre  $C_1$ .
- Devido à oscilação da tensão no ponto M entre 0 e  $2V_{max}$ , o capacitor do estágio seguinte  $C_2$ , começará a ser carregado no semiciclo negativo, quando a tensão no ponto M for nula. Logo, o potencial máximo atingido no capacitor  $C_2$  será  $2nV_{max}$  em referência à terra.
- No semiciclo positivo seguinte ao carregamento de  $C_2$ , será carregado o capacitor  $C'_2$  com o dobro da tensão máxima da fonte  $2V_{max}$ .
- O processo de carregamento dos capacitores irá continuar até que o capacitor  $C'_3$  do último estágio esteja carregado com  $2V_{max}$ . Logo, a tensão final fornecida pelo retificador será  $2nV_{Max}$ , sendo  $n$  o número de estágios do retificador.

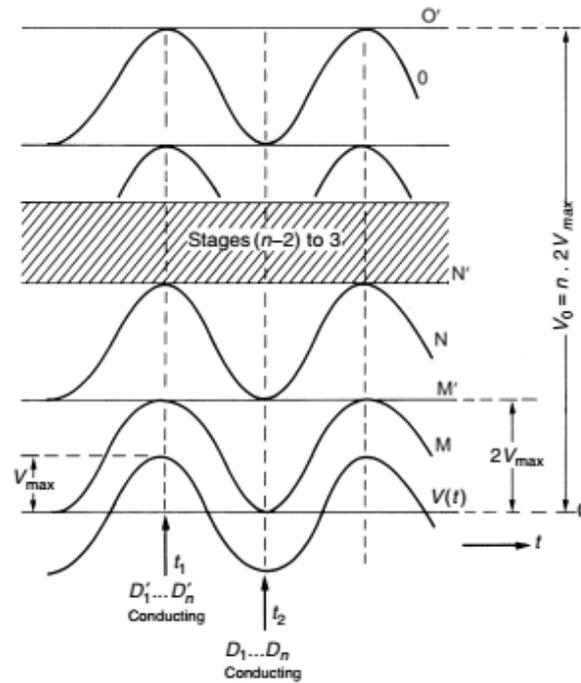


Figura 12 – Sinal da tensão de saída do retificador, sem carga.

Na Tabela 2 é possível analisar o nível de tensão sobre os capacitores conforme cada ciclo referente à fonte de alimentação.

Tabela 2 - Tensão sobre os capacitores.

Ciclo \ Nó	0	T/2	T	3T/2	2T	5T/2	3T	7T/2	4T	9T/2	5T	11T/2	6T
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
M'	0	$2V_{max}$	0	$2V_{max}$	0	$2V_{max}$	0	$2V_{max}$	0	$2V_{max}$	0	$2V_{max}$	0
M'	0	$2V_{max}$											
N	0	0	$2V_{max}$	$4V_{max}$	$2V_{max}$								
N'	0	0	0	$4V_{max}$									
O	0	0	0	0	$4V_{max}$	$6V_{max}$	$4V_{max}$	$6V_{max}$	$4V_{max}$	$6V_{max}$	$4V_{max}$	$6V_{max}$	$4V_{max}$
O'	0	0	0	0	0	$6V_{max}$							

Sendo conectado o equipamento sob ensaio na saída do retificador, o valor da tensão de saída jamais será  $2nV_{max}$ , devido ao descarregamento dos capacitores  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ . Logo, os fatores a serem observados na instabilidade do sinal de saída são a queda de tensão  $\Delta V$  e o *ripple*.

Embora o *ripple* possa ser minimizado com a utilização de capacitores maiores nos estágios inferiores, o risco de ruptura dielétrica durante o ensaio torna esta prática não utilizada, pois estressaria muito os capacitores de menor valor dos

estágios superiores. Assim, preferencialmente utilizam-se capacitores de mesmo valor em todos os estágios [8, 14].

Como no retificador em meia onda, o *ripple* da tensão é causado pela transferência de carga  $Q$  (equação (4)) devido ao descarregamento dos capacitores. Logo, no retificador em cascata, sendo desconsiderada a transferência de carga  $Q$  entre os capacitores  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  para os capacitores  $C'_1$ ,  $C'_2$  e  $C'_3$ , o valor do *ripple* é equacionado como o somatório das cargas  $Q$  fornecidas por cada capacitor  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  ao equipamento sob ensaio, conforme

$$2\Delta\delta = IT \sum_{i=1}^n \frac{1}{C'_i} \quad (9)$$

Na prática, a transferência de carga  $Q$  entre os capacitores é verdadeira, como mostra a Figura 13.

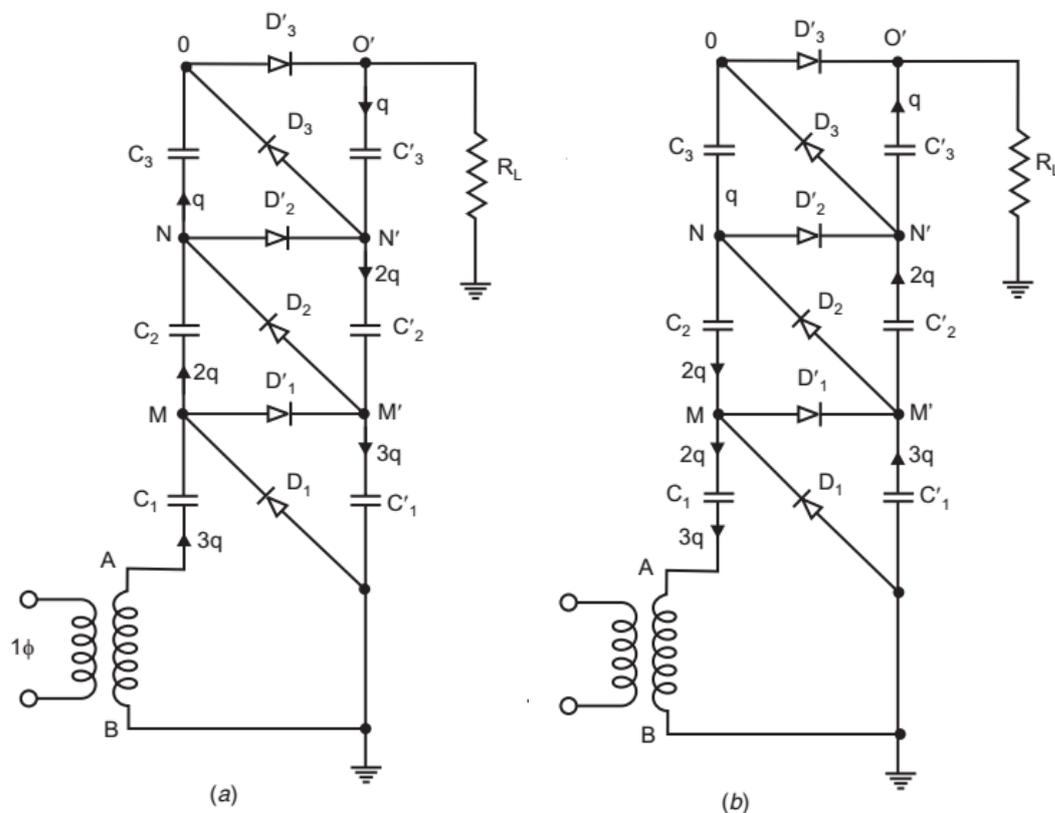


Figura 13 - Transferências de carga entre os capacitores. (a) ciclo de carregamento, (b) ciclo de transferência.

Para um funcionamento estável do retificador, a carga transferida dos capacitores para o equipamento sob ensaio ao longo do ciclo de transferência (Figura 13(b)) deve ser recuperada mediante o ciclo de carregamento (Figura 13(a)). No ciclo de carregamento, os capacitores  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  recebem as respectivas cargas,  $3Q$ ,  $2Q$  e  $Q$ . Porém, nos ciclos de transferência os capacitores  $C'_1$ ,  $C'_2$  e  $C'_3$  são carregados com as respectivas cargas,  $3Q$ ,  $2Q$  e  $Q$ , para que no ciclo de carregamento o capacitor  $C'_1$  forneça uma carga  $2Q$  para o capacitor  $C_2$  e  $Q$  para o equipamento sob ensaio, assim como  $C'_2$  irá transferir uma carga  $Q$  para  $C_3$  e para o equipamento sob ensaio e  $C'_3$  fornece  $Q$  para o equipamento sob ensaio. Então, para um circuito de  $n$  estágios o valor da *amplitude de ripple* pode ser equacionada por

$$\Delta\delta = \frac{I}{2f} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1+i}{C'_{n-i}}. \quad (10)$$

Devido à igualdade dos capacitores, a equação (10) pode ser reescrita considerando que  $C'_1 = C'_2 = C'_3 = C$ , ou seja,

$$\Delta\delta = \frac{I \cdot n(n+1)}{4fC}. \quad (11)$$

O segundo fator a ser avaliado para a instabilidade do sinal de saída é a queda de tensão  $\Delta V$ , que é a diferença entre o valor teórico da tensão de saída  $2nV_{max}$  e a tensão à qual o equipamento sob ensaio está submetido.

A queda de tensão é ocasionada devido aos capacitores não serem carregados com uma tensão plena  $2V_{max}$ , possuindo um decréscimo equivalente a  $\frac{3I}{fC}$  para cada capacitor  $C'n$  no circuito. Assim, em um retificador em  $n$  estágios a queda de tensão é dada por

$$\Delta V = \frac{I}{fC} \left( \frac{2n^2}{3} - \frac{n}{6} \right). \quad (12)$$

Se  $n \geq 4$  o termo linear pode ser desprezado e, portanto, a queda de tensão pode ser aproximada por

$$\Delta V \approx \frac{2I}{3fC} n^3. \quad (13)$$

Logo, a máxima tensão de saída obtida em um retificador em cascata é

$$V_{0 \max} = 2nV_{\max} - \frac{2I}{3fC} n^3. \quad (14)$$

Os retificadores em Cascata do tipo Cockcroft-Walton são usados em laboratórios de ensaio em todo o mundo. Um circuito típico é mostrado na Figura 14, podendo a corrente de saída chegar até 20 mA quando o mesmo está fornecendo em sua saída altas tensões CC entre 1 MV e 2 MV.



Figura 14 - Retificador de tensão nominal de 1MV do tipo Cockcroft – Walton.

### 2.2.2. Sistema de medição de ATCC

O Sistema de Medição (SM) é um conjunto de dispositivos adequados para realizar medições e os sistemas de medição utilizados em alta tensão são denominados SMAT, sendo composto basicamente por um dispositivo de conversão, um sistema de transmissão e instrumentos indicadores e/ou registradores. Quando utilizado um software para estimar os parâmetros das medições, este também faz parte do SM [10, 16]. Um modelo básico pode ser visto na Figura 15.

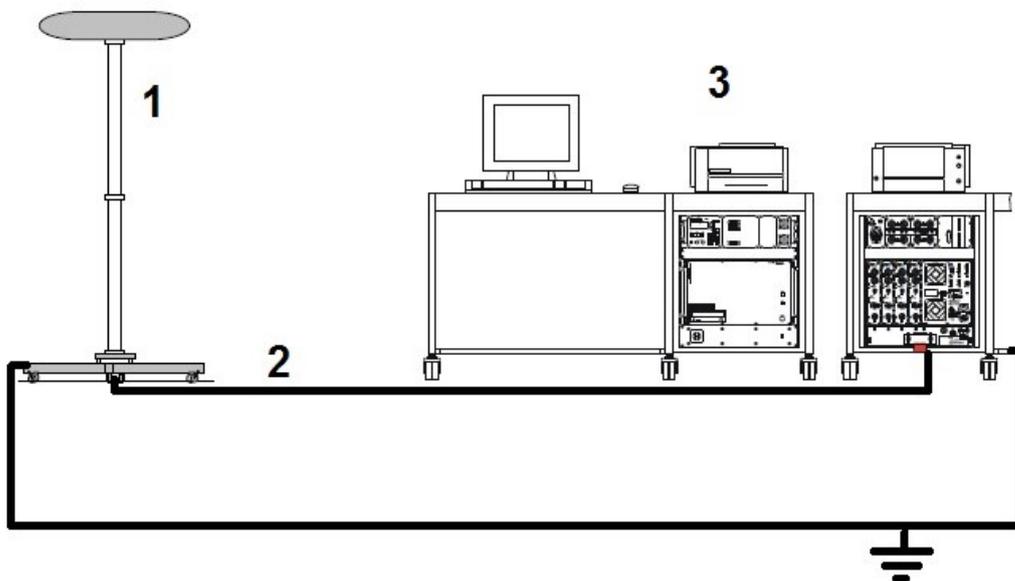


Figura 15 - Sistema de medição genérico. 1- Dispositivo de conversão; 2 – Sistema de transmissão; 3 – Instrumento indicador e/ou registrador.

Os sistemas de medição são classificados conforme o seu nível de incerteza e, ocasionalmente, sua aplicação. Conforme a norma ABNT NBR IEC 60060-2:2016, um SM com uma incerteza de medição menor ou igual a 1% é considerado um Sistema de Medição de Referência (SMR). Os SMRs normalmente são utilizados em laboratórios que realizam calibrações. Entretanto, um SM com nível de incerteza menor ou igual a 3%, conforme a norma é considerado um Sistema de Medição Aprovado (SMA), que normalmente é utilizado em laboratórios de ensaios e são calibrados por meio da comparação com um SMR.

### 2.2.2.1 Dispositivo de conversão

Normalmente não é possível medir diretamente altas tensões, sendo necessário convertê-las para valores de tensão suficientemente baixos para que possam ser medidos por meio de instrumentos de medição convencionais, como multímetros e osciloscópios. As tensões são convertidas mediante o uso de transdutores, sendo o mais utilizado em laboratório o divisor de tensão [16].

O divisor de tensão é um transdutor que possibilita a estimativa da tensão aplicada em seus terminais, por meio da fração da tensão que ele fornece para medição. São construídos por meio de duas impedâncias associadas em série (Figura 16), sendo uma impedância de alta tensão ( $Z_1$ ), que possui maior valor ôhmico e uma impedância de baixa tensão ( $Z_2$ ), com menor valor ôhmico. As impedâncias são basicamente compostas por capacitores e/ou resistores, podendo estar associadas em série e ou paralelo, conforme o tipo e forma de tensão a ser medida [17].

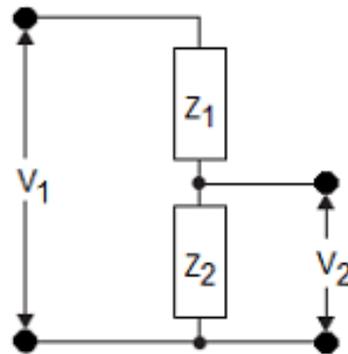


Figura 16 - Circuito básico de um divisor de tensão.

A maior parte da tensão aplicada aos terminais do divisor permanece sob a impedância de alta tensão e uma fração da tensão aplicada está sob a impedância de baixa tensão. Assim, a fração de tensão medida na impedância de baixa tensão deve ser equivalente à forma da tensão aplicada nos terminais do divisor, possuindo uma atenuação igual ao fator de escala do divisor, cuja definição é a relação entre a tensão aplicada  $V_1$  e a fração da tensão medida na impedância de baixa tensão,  $V_2$ , conforme [18]

$$\text{Fator de Escala (FE)} = \frac{V_1}{V_2}. \quad (15)$$

Quanto às questões construtivas de um divisor, segundo [7, 19], divisores de tensão podem ter grandes dimensões, já que a altura do divisor depende principalmente da tensão disruptiva da unidade de alta tensão pois, quanto maior a altura, maior será a tensão nominal de trabalho do divisor. Como regra admite-se que a distância de isolamento entre o ponto sobre potencial de alta tensão e o ponto de aterramento ou equipamentos aterrados deve ser de 2,5 a 3 m/MV para tensões contínuas (ATCC), 2 a 2,5 m/MV para tensões de impulso atmosférico pleno e impulso atmosférico cortado (IAP e IAC), 5 m/MV (r.m.s) para tensões alternadas (ATCA) e de 4 m/MV para tensões de impulso de manobra (IM).

A escolha do divisor a ser utilizado dependerá do sinal de tensão a ser medido, pois cada tipo de divisor será mais recomendado para realizar a medição conforme as características do sinal medido. Os divisores resistivos, capacitivos, mistos e universais (Figura 17) são os mais utilizados atualmente nos laboratórios. Cada tipo tem sua aplicação específica, embora o divisor universal tenha capacidade para medir todas as formas de tensão. Na Tabela 3 pode ser analisado qual tipo de tensão cada divisor tem a capacidade de medir.

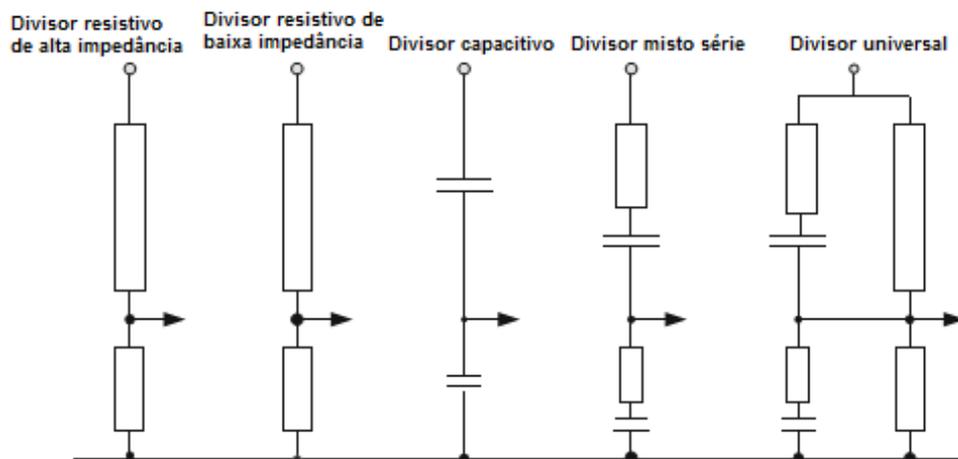


Figura 17 - Tipos construtivos de divisores de tensão.

Tabela 3 - Tipos de divisores e suas aplicações.

<b>Tipo Construtivo</b>	<b>Aplicáveis à medição</b>
<b>Capacitivo</b>	ATCA e IM
<b>Resistivo de alta impedância</b>	ATCC e ATCA*
<b>Resistivo de baixa impedância</b>	IAP, IAC e IP
<b>Misto série</b>	ATCA, IAP, IAC e IM
<b>Universal</b>	ATCC, ATCA, IAP, IAC e IM

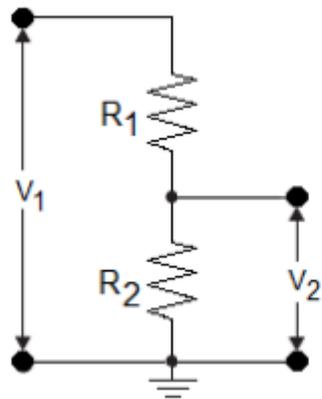
\*Divisor resistivo de alta impedância pode ser aplicado para medição em ATCA para um nível de até 100 kV devido ao efeito das capacitâncias parasitas.

Como visto anteriormente, fontes de ATCC usadas em ensaios possuem uma potência limitada, como os retificadores em cascata tipo Cockcroft-Walton, que podem fornecer entre 20 a 40 kW, com tensões entre 1 e 2 MV. Isso requer do divisor um elevado valor ôhmico, na faixa de grandeza de centenas de  $M\Omega$  em sua unidade de alta tensão e de dezenas de  $M\Omega$  em sua unidade de baixa tensão, pois devido à limitação da corrente, o divisor não sofrerá a influência da elevação de temperatura. Contudo, embora a corrente que circula pelo divisor seja limitada, a mesma não deverá ser maior que 0,5 mA, conforme recomendado pela norma ABNT NBR IEC 60060-2:2016, para minimizar a incerteza de medição devido a correntes de fuga [18, 9].

Logo, o divisor resistivo de alta impedância (Figura 18) é a opção mais adequada para ser usado em um sistema de medição para ATCC, porém é de fundamental importância que o dielétrico externo não seja de valor equivalente à impedância da unidade de alta do divisor pois, sendo de mesma ordem, a corrente da unidade de alta do divisor se dividiria entre a unidade de alta tensão e sua superfície, inserindo esta impedância ao circuito, provocando a alteração do FE do divisor. Assim, para garantir a estabilidade do FE é de fundamental importância impedir a existência de qualquer corrente de fuga pela superfície do divisor. O método aplicado ao divisor da Figura 18 foi deixá-lo suspenso e garantir, por meio de buchas, que a corrente percorreria somente a parte interna da unidade de alta tensão, estes detalhes podem ser vistos nas Figuras 19(a) e 19(b).

Basicamente, os divisores resistivos são construídos por associação de resistores em série, porém indutâncias ( $L'$ ) estão presentes no circuito devido ao campo magnético inerente à circulação de corrente pelo resistor, assim como as

capacitâncias parasitas ( $C'_p$  e  $C'_e$ ), existentes devido à interação do divisor com outros elementos do laboratório [15].



(a)



(b)

Figura 18 - Divisor resistivo para ATCC. (a) diagrama esquemático. (b) Imagem de um divisor de 1 MV.



(a)



(b)

Figura 19 - (a) Detalhe da impedância de alta tensão suspensa. (b) Buchas usadas na unidade de alta.

Estas componentes indesejáveis comprometem a resposta do divisor, e desconsiderá-las seria o mesmo que desconsiderar a permeabilidade e permissividade do ar. Ainda que a modelagem matemática do divisor seja

complexa, um divisor resistivo pode ser representado de forma aproximada pelo circuito mostrado na Figura 20 [17].

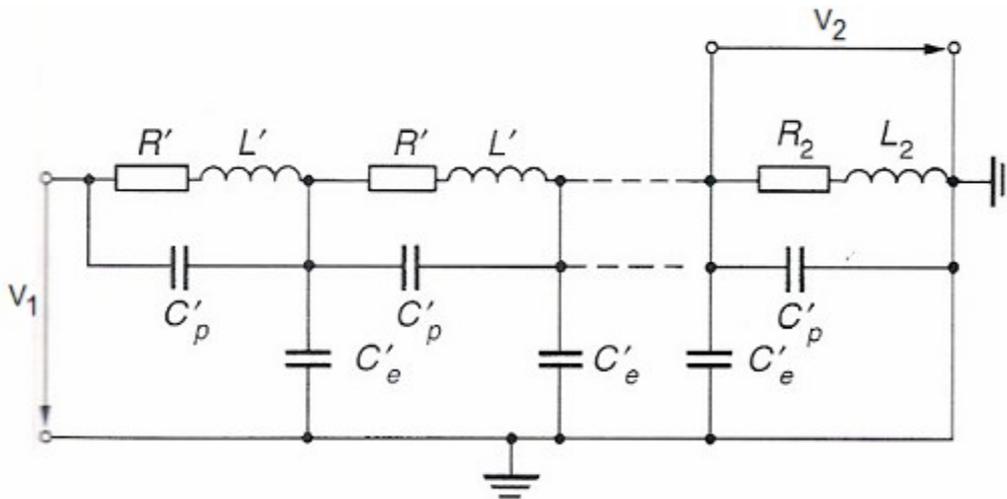


Figura 20 - Circuito elétrico equivalente de um divisor resistivo.

Ao comparar as Figuras 16 com 20, é possível notar que as impedâncias  $Z_1$  e  $Z_2$  foram substituídas por  $n$  elementos constituídos por componentes  $RLC$  associados entre si. Porém, experimentalmente as componentes  $LC$  não afetam de maneira significativa a medição em ensaios com ATCC, podendo ser desprezadas. Deste modo, o fator de escala do divisor pode ser descrito por

$$FE = \frac{V_1}{V_2} = \left( \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \quad (16)$$

Embora o divisor resistivo seja o mais utilizado em sistemas de medição para ensaios em ATCC, sua utilização para a medição do ripple deverá ser cuidadosa pois, caso o divisor seja uma carga elevada para o retificador o ripple será intensificado pelo mesmo. Assim, quando for necessário medir o *ripple* da tensão de ensaio, normalmente é utilizado um divisor capacitivo em paralelo com o divisor resistivo ou, caso as medições sejam feitas por meio de um osciloscópio, é utilizado o acoplamento CA [18].

### 2.2.2.2 Sistema de Transmissão

O sistema de transmissão é um conjunto de dispositivos que transfere o sinal de saída do dispositivo de conversão (divisor de tensão) para o instrumento indicador e/ou registrador.

Em um sistema de medição para ATCC, o sistema de transmissão é composto por cabos de transmissão (Figura 21), podendo ser utilizado um atenuador no final do cabo conforme o instrumento indicador ou registrador utilizado.



Figura 21 - Cabo coaxial componente do Sistema de Transmissão.

Geralmente os atenuadores de tensão são utilizados quando é necessário realizar medições em instrumentos que possuem uma entrada de tensão limitada a valores pequenos, como é o caso do uso de osciloscópios, cujas entradas são limitadas apenas a 80 V. Estes atenuadores são construídos com características de uma resposta dinâmica melhor ou igual à do divisor, de modo a não influenciar as medições.

Quanto ao fator de escala do SM, é notório que, em ambos os casos ilustrados nas Figuras 22 e 23, o sistema de transmissão influenciará diretamente em seu valor.

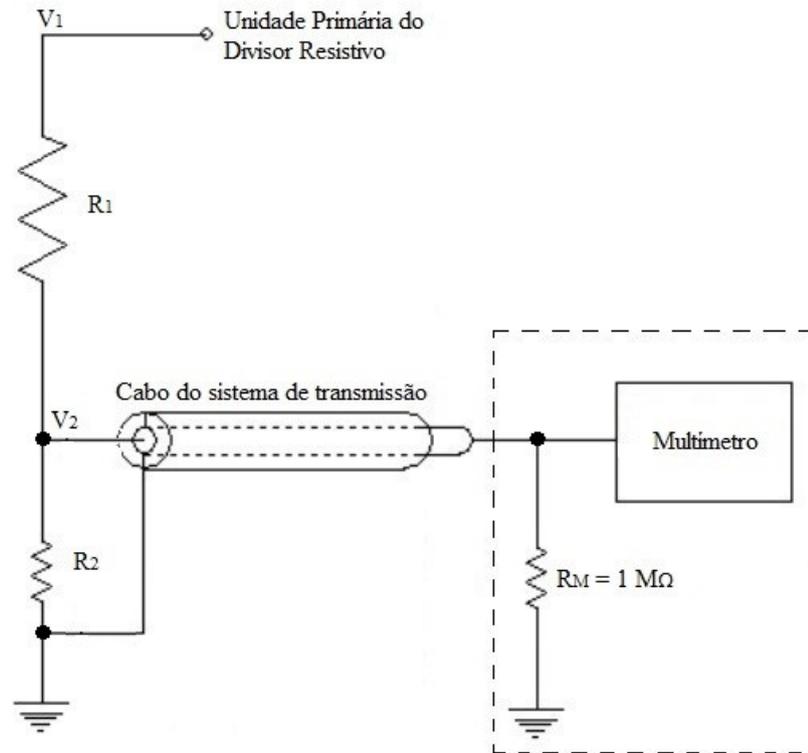


Figura 22 - Sistema de medição sem atenuador.

Com a utilização do cabo de transmissão conectado a um multímetro (Figura 22), o fator de escala será alterado, devido à impedância de entrada  $R_M$  do multímetro, pois esta é da mesma ordem de grandeza da impedância de baixa tensão do divisor, não podendo ser desprezada. As impedâncias estarão em paralelo, então o fator de escala do sistema de medição é descrito por

$$FE = \frac{V_1}{V_2} = \left( \frac{R_1 R_2 + R_1 R_M}{R_1 R_M} + 1 \right) \quad (17)$$

O fator de escala do SM também será modificado quando houver a necessidade do uso do atenuador, pois como pode ser visto na Figura 23, a tensão que o instrumento está indicando será  $V_3$ , ou seja, a tensão sobre a impedância de baixa tensão do atenuador. Assim, a tensão  $V_1$  nesta condição encontra-se atenuada pelo produto dos fatores de escala do divisor e do atenuador. Logo, o fator de escala do SM pode ser descrito pela equação (18).

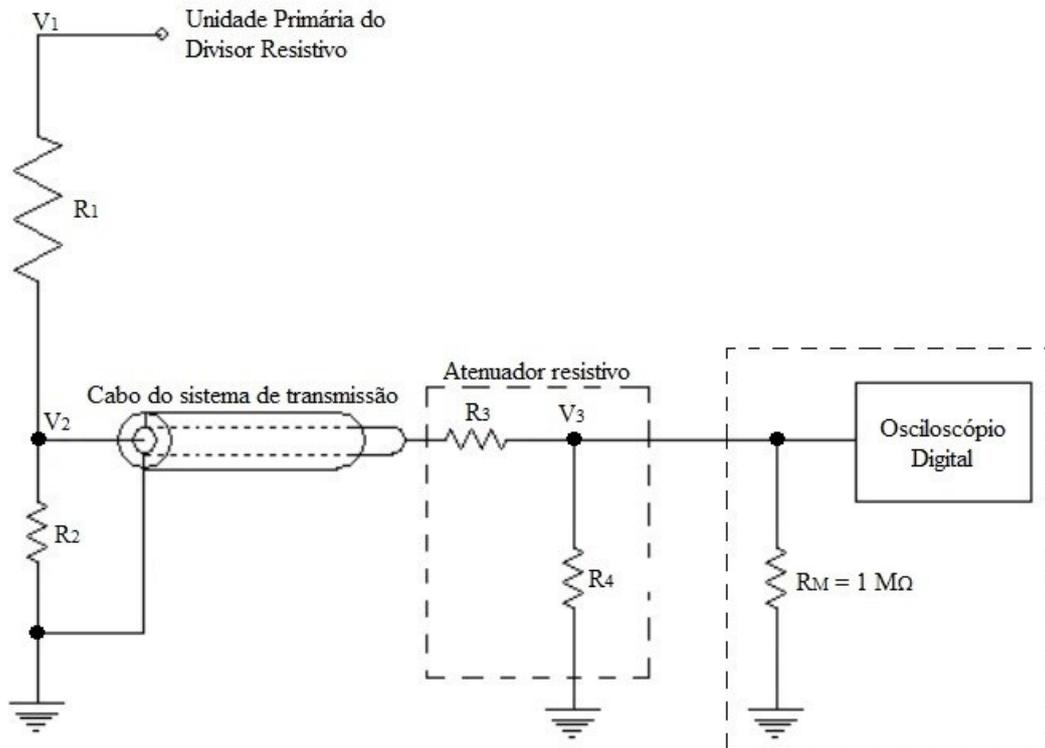


Figura 23 - Sistema de medição com atenuador.

$$FE = \frac{V_1}{V_3} = \left( \frac{R_1 R_3 + R_1 R_4 + R_2 R_3}{R_2 R_4} + 1 \right) \quad (18)$$

### 2.2.2.3. Instrumentos de Medição

Os instrumentos de medição são utilizados para quantificar, registrar e indicar os parâmetros característicos do sinal analisado. Atualmente são utilizados instrumentos de avaliação quantitativa do sinal de tensão, sendo que o multímetro de bancada com no mínimo 6,5 dígitos é o instrumento mais utilizado nos sistemas de medição em ATCC. Este instrumento apenas indica o valor médio da tensão de ensaio, não permitindo ao usuário que seja monitorado simultaneamente com o valor médio, os parâmetros de avaliação qualitativa, como o fator de ripple e a avaliação visual do sinal de tensão. A alternativa mais simples, porém de alto custo, seria a aquisição de voltímetros de crista especiais.

Visando solucionar este problema com um menor custo, esta dissertação propõe a utilização de um sistema dedicado, composto por instrumentos digitalizadores com no mínimo 8 bits de resolução vertical associados ao algoritmo de medição que será desenvolvido nessa dissertação.

#### **2.2.2.4. Qualificação de um sistema de medição**

Um sistema de medição é submetido a ensaios iniciais realizados em sua construção e projeto, seguidos por ensaios de desempenho e verificações de desempenho ao longo de sua vida útil.

Os ensaios e verificações de desempenho são realizados periodicamente, com o intuito de determinar o fator de escala, comprovando que o sistema de medição pode indicar as tensões nos ensaios, considerando as incertezas de medição especificadas pela norma, além de garantir que o sistema seja rastreável a padrões nacionais e/ou internacionais.

O fator de escala atribuído é determinado no mais recente ensaio de desempenho, por calibração. Sua estabilidade deve estar dentro da faixa especificada pela norma ABNT NBR IEC 60060-2:2016 em  $\pm 3\%$  do fator de escala, para que grandes variações não ocorram em longos períodos de tempo, pois o período entre calibrações consecutivas pode variar entre 1 a 5 anos [2].

Sistemas utilizados para medições em ATCC devem ser capazes de medir o valor da tensão de ensaio com uma incerteza menor ou igual a 3% e possuir um comportamento dinâmico que corresponda às alterações das tensões. Logo, a constante de tempo do sistema deverá ser menor que 0,25 s, possibilitando subidas e descidas do nível de tensão com taxas de 1% da tensão de ensaio por segundo. Em sua resposta em frequência, o fator de escala não deverá variar por mais de  $\pm 15\%$  em toda a faixa de frequência avaliada. A faixa de frequência na qual o fator de escala é analisado situa-se entre 0,5 a 7 vezes a frequência fundamental do *ripple*. O sistema de medição deve ser capaz de medir a amplitude de *ripple* com uma incerteza menor que 10%.

### **2.3. Procedimentos de ensaio**

A norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013 definiu três procedimentos de ensaio a serem utilizados para verificar a suportabilidade dielétrica do equipamento ou para determinar o nível de tensão que o equipamento é capaz de suportar sem a ocorrência de descargas disruptivas.

O início do ensaio é considerado válido quando o equipamento ensaiado é submetido à tensão de ensaio especificada. Porém, o sinal de tensão é inicialmente aplicado em um nível mais baixo, para evitar qualquer efeito de sobretensão devido a transitórios de manobra e para permitir a monitoração do sinal e a leitura dos instrumentos. A elevação da tensão é lenta, mas não ao ponto de prolongar desnecessariamente a solitação do objeto sob ensaio a valores próximos da tensão de ensaio. Este requisito do ensaio é satisfeito se a taxa de elevação da tensão for 2% da tensão de ensaio por segundo, quando o sinal de tensão aplicado no objeto estiver ao nível de 75% da tensão de ensaio [1].

A polaridade da tensão ou a sequência em que tensões de cada polaridade são aplicadas, assim como o tempo de duração de um ensaio, são especificadas pelo comitê técnico pertinente.

Os três procedimentos de ensaio são:

- a) **Ensaio de tensão suportável:** A tensão de ensaio especificada será mantida no equipamento por um tempo determinado e, em seguida, reduzida pela descarga da capacitância do arranjo de ensaio. Os requisitos do ensaio são em geral satisfeitos caso não ocorra nenhuma falha no dielétrico do equipamento.
- b) **Ensaio de tensão de descarga disruptiva:** A tensão é aplicada ao equipamento e elevada continuamente, conforme visto anteriormente, porém, a mesma é elevada até a ocorrência de uma descarga disruptiva. O último valor da tensão de ensaio observado anteriormente à descarga deverá ser registrado. Este processo é repetido  $n$  vezes, conforme especificado no procedimento de ensaio, de modo a obter um conjunto de  $n$  medidas de tensão.
- c) **Ensaio de tensão de descarga disruptiva assegurada:** Procedimento idêntico ao item (b). Os requisitos do ensaio são satisfeitos se nenhuma das  $n$  medidas de tensão neste conjunto exceder a tensão de descarga disruptiva assegurada.

### 3 Ensaio com Alta Tensão em Corrente Alternada (ATCA)

Os sistemas elétricos em tensão alternada são os mais utilizados para transmitir a energia dos centros geradores para os centros consumidores, assim como para distribuir dos centros consumidores para cada consumidor individual. Dessa forma, uma grande demanda por ensaios é ocasionada pela constante ampliação do sistema elétrico assim como a sua constante manutenção [8]. Estes ensaios são realizados para analisar o isolamento do equipamento e verificar seu comportamento quando o mesmo está submetido a uma sobretensão provocada por algum distúrbio na rede elétrica.

Geralmente os equipamentos de alta tensão que são ensaiados possuem características capacitivas, com valores típicos de capacitância que variam de 10 pF a 10000 pF [7]. Os defeitos observados em equipamentos com estas características não são causados por curto-circuito, pois as correntes que percorrem o equipamento são pouco elevadas, mas normalmente são provocados por um elevado potencial elétrico a que alguns pontos de isolamento estão submetidos [15].

Segundo [9], os ensaios em ATCA são considerados os mais importantes ensaios de alta tensão, especialmente por englobarem os seguintes ensaios de avaliação do isolamento:

- Capacitância e Tangente de delta;
- Descargas parciais;
- Tensão aplicada e;
- Tensão induzida.

#### 3.1. Requisitos para a tensão de ensaio

Assim como nos ensaios em ATCC, nos ensaios em ATCA os requisitos da tensão de ensaio que devem ser monitorados são descritos na norma ABNT NBR

IEC 60060-1:2013. Conforme esta norma, deve ser analisado os seguintes parâmetros da tensão de ensaio em ATCA:

- Valor de crista ( $V_{\text{crista}}$ ) – Média dos valores de pico positivo e negativo;
- Valor da tensão de ensaio ( $V_T$ ) – Valor de crista dividido por  $\sqrt{2}$ ;
- Valor eficaz ( $V_{\text{rms}}$ ) – Raiz quadrada do valor médio dos quadrados dos valores de tensão durante um ciclo completo;
- Fator de crista – Relação entre o valor de crista e o valor eficaz;
- Frequência ( $f$ ) – Quantidade de ciclos em 1 segundo; e
- THD – Distorção harmônica total.

Para uma melhor visualização e explicação destes requisitos alguns parâmetros da tensão alternada podem ser vistos na Figura 24.

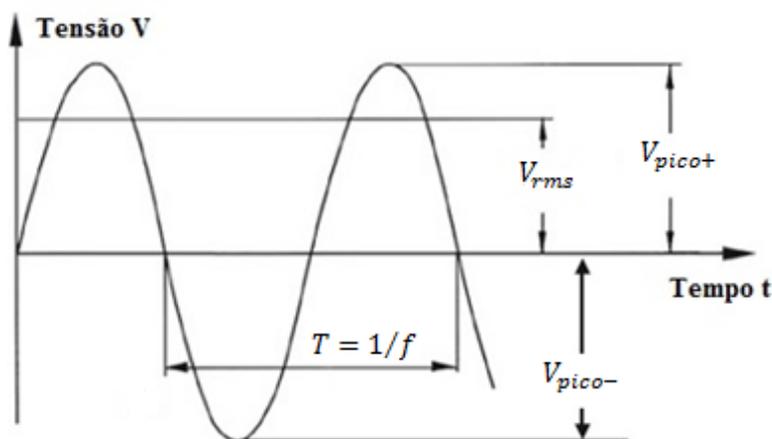


Figura 24 - Parâmetros do sinal de tensão para ensaios em ATCA.

Considerando que a forma de onda da tensão de ensaio é aproximadamente senoidal, o valor de crista pode ser usado para determinar o valor da tensão de ensaio, ou seja,

$$V_T = \frac{V_{\text{crista}}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{\text{pico}+} + |V_{\text{pico}-}|}{2\sqrt{2}} \quad (19)$$

Neste valor o dielétrico do objeto sob ensaio estará sendo submetido a um *stress* maior e também poderá ser comparado com o valor eficaz [9].

Em sinais de tensão em que a diferença entre os valores de pico positivo e negativo  $\Delta V_{pico}$  for menor que 2% (equação (20)), o valor de crista da tensão de ensaio poderá ser considerado como  $V_{pico+}$  ou  $|V_{pico-}|$ , ao invés da média entre amplitudes.

$$\Delta V_{pico} = \left| \frac{V_{pico+} - |V_{pico-}|}{V_{pico+}} \right| < 0.02 \quad (20)$$

Nos ensaios em que o efeito térmico se faz presente é recomendável que seja monitorado o valor eficaz da tensão, segundo a ABNT NBR IEC 60060-1:2013. O valor eficaz, ou rms, é definido como

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V(t)^2 dt}, \quad (21)$$

onde  $T$  é o período da forma de onda da tensão de ensaio  $V(t)$ .

Quanto à frequência, a ABNT NBR IEC 60060-1:2013 estabelece que esteja dentro da faixa de valores entre 45 a 65 Hz, pois assim laboratórios americanos e europeus poderiam seguir a norma, já que não há pesquisas que indicam que variações de frequência possam influenciar os resultados dos ensaios.

Embora seja desejado um sinal de tensão idealmente senoidal para a realização dos ensaios, pequenos desvios da forma de onda da tensão são permitidos, desde que o fator de crista seja  $\sqrt{2} \pm 5\%$ , ou seja,

$$1,344 \leq \left| \frac{V_{crista}}{V_{rms}} \right| \leq 1,485. \quad (22)$$

A avaliação da forma de onda mediante o valor de pico não considera a forma de onda como um todo. Para ensaios de suportabilidade dielétrica esta avaliação é suficiente, porém em ensaios de descargas parciais outros instantes da tensão de ensaio devem ser avaliados para reconhecimento de padrões e, deste modo, a avaliação da forma de onda é realizada mediante a distorção harmônica total, descrita na subseção a seguir.

### 3.1.1. Distorção Harmônica Total (THD)

Este indicador é o mais usado para quantificar os componentes harmônicos na tensão de ensaio. Embora sua definição seja mais complexa, este indicador fornece uma avaliação da forma de onda da tensão de ensaio como um todo, indicando assim se a forma de onda da tensão se aproxima mais ou menos de uma senoide [20].

A THD é a relação entre a raiz quadrada do somatório quadrático das tensões de pico em cada componente harmônico sobre o valor da tensão de pico na frequência fundamental [21], ou seja,

$$THD = \frac{1}{V_{1pico}} \sqrt{\sum_{n=2}^m V_{npico}^2}, \quad (23)$$

onde  $n$  é a ordem da componente harmônica,  $m$  é a maior ordem da componente harmônica que se deseja analisar.

Embora a norma solicite que seja monitorada a THD da tensão de ensaio, a mesma não indica quais sejam os limites aceitáveis para a realização do ensaio sem a influência dos componentes harmônicos. Segundo [9], o comitê técnico 42 da IEC vem discutindo a introdução de um limite aceitável de 5% para as revisões futuras da norma IEC 60060-1, pois ainda não se determinou uma proporcionalidade entre o THD e a relação expressa na equação (22).

Ainda que possa haver infinitos componentes harmônicos, para uma medição significativa e precisa é suficiente analisar apenas os 5 primeiros componentes ímpares.

### 3.1.2. Tolerância para os parâmetros de ensaio em ATCA

Assim como descrito na subseção 2.1.1 para os ensaios em ATCC, na norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013 a tolerância permitida para os parâmetros analisados durante a execução do ensaio em ATCA pode ou não estar associada ao tipo e ao tempo de duração do ensaio. Assim como na norma ABNT NBR IEC 60060-2:2016, são definidos os valores das incertezas de medição destes parâmetros, conforme a Tabela 4 apresenta.

Tabela 4 - Tolerância e incerteza dos parâmetros de ensaio.

Parâmetros da tensão de ensaio	Tempo do Ensaio	Tolerância	Incerteza de medição
Frequência	-	45 – 65 Hz	-
Valor da tensão de ensaio e / ou Valor eficaz	≤ 60 s	± 1%	3%
	> 60 s	± 3%	
Diferença entre cristas	-	2%	-
$V_{\text{crista}}/V_{\text{rms}}$	-	$\sqrt{2} \pm 5\%$	-
TDH	-	-	-

### 3.2. Arranjo de Ensaio

Os sistemas que compõem o arranjo são definidos conforme sua função e, embora estes sistemas possuam subsistemas, os principais são descritos a seguir:

- Sistema de Geração de tensão
- Sistema de Medição de tensão

#### 3.2.1. Sistema de Geração de ATCA

As tensões de ensaios elétricos em ATCA são obtidas geralmente por um transformador de potência elevador, ou por meio de um circuito ressonante série ou paralelo.

Para que a tensão de ensaio seja suficientemente estável, e não sofra influência das variações das correntes de fuga, ou descargas não disruptivas ocorridas no objeto sob ensaio, é estabelecido que seja inserido um resistor em série com o sistema de geração (Figura 25), com valor suficientemente baixo, de modo a não afetar a tensão de ensaio, mas que amortee os transitórios que são produzidos por descargas não disruptivas [1].

Para assegurar que a descarga disruptiva medida não seja afetada por descargas parciais não disruptivas ou pré-descargas no objeto sob ensaio, a capacitância total do objeto e de qualquer capacitor que seja inserido deve estar na faixa de 0,5 nF a 1 nF [1].

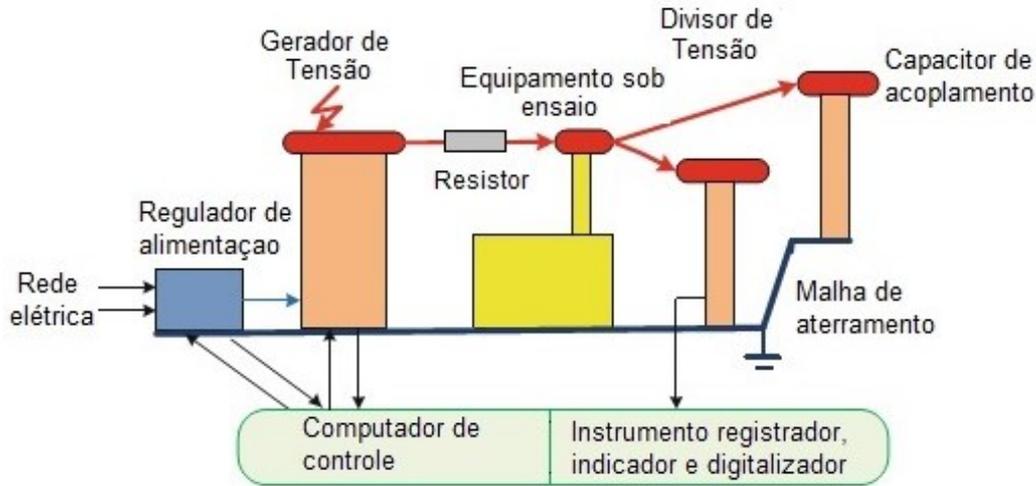


Figura 25 - Arranjo genérico para ensaios em ATCA.

### 3.2.1.1. Transformadores

Os transformadores são circuitos magnéticos destinados a transmitir potência elétrica, sendo sua estrutura (Figura 26) composta basicamente por um núcleo ferromagnético e enrolamentos formados por bobinas feitas com condutores devidamente isolados. Em transformadores monofásicos que possuem dois enrolamentos, estes são denominados como enrolamento primário e secundário, porém existem transformadores com três enrolamentos, sendo o terceiro enrolamento definido como enrolamento terciário.

O princípio de funcionamento de um transformador baseia-se nas leis de Biot-Savat e Faraday, pelas quais a tensão  $V_p$  que alimenta as espiras do enrolamento primário produz um fluxo magnético, que percorre todo o núcleo do transformador e que, ao atravessar as espiras do enrolamento secundário, induz uma tensão  $V_s$  que, em condições de funcionamento a vazio do transformador [22] (Figura 27), pode ser descrita como

$$V_s = e_s = -N_s \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \quad (24)$$

onde  $N_s$  é o número de espiras do enrolamento do secundário e  $\Phi$  é o fluxo magnético que percorre o núcleo.

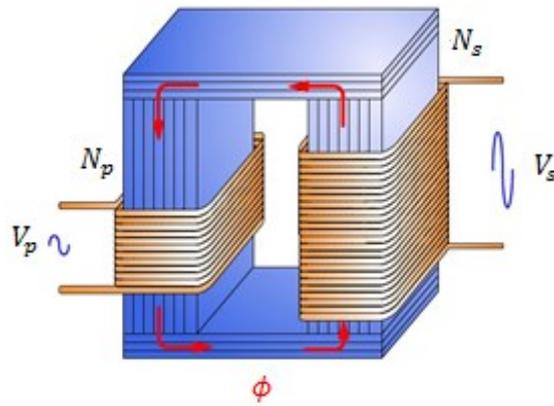


Figura 26 - Estrutura de um transformador monofásico.

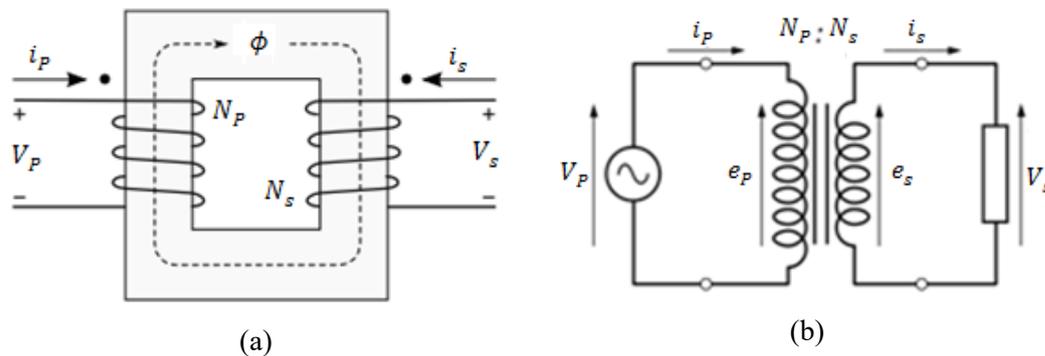


Figura 27 - (a) Transformador em funcionamento a vazio, (b) Circuito elétrico equivalente a um transformador ideal com carga.

Portanto, as alterações na tensão de alimentação do enrolamento primário causam variações no fluxo magnético, refletindo assim na tensão induzida no enrolamento do secundário do transformador. Porém, esta variação de tensão entre os enrolamentos primário e secundário será proporcional ao número de espiras nos enrolamentos. Esta proporcionalidade na variação de tensão entre os enrolamentos é denominada relação de transformação, descrita por

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad (25)$$

onde  $N_p$  é o número de espiras do enrolamento primário.

### 3.2.1.2. Transformador de Ensaio em ATCA

Os transformadores utilizados nos ensaios em ATCA são em grande parte monofásicos, e normalmente construídos para trabalharem com densidades de

fluxo menor no núcleo, para evitar o surgimento de correntes de magnetização elevadas, que aumentariam o número de componentes harmônicas e causariam defeitos à isolação.

Operam na frequência fundamental da rede de alimentação, embora possam ser utilizados em uma frequência mais elevada com tensão nominal, ou em frequências mais baixas com um nível de tensão menor, para que o núcleo não seja saturado [7]. Sua representação pode ser melhor exemplificada pela Figura 28, onde são mostrados alguns detalhes de sua construção e seu diagrama elétrico.

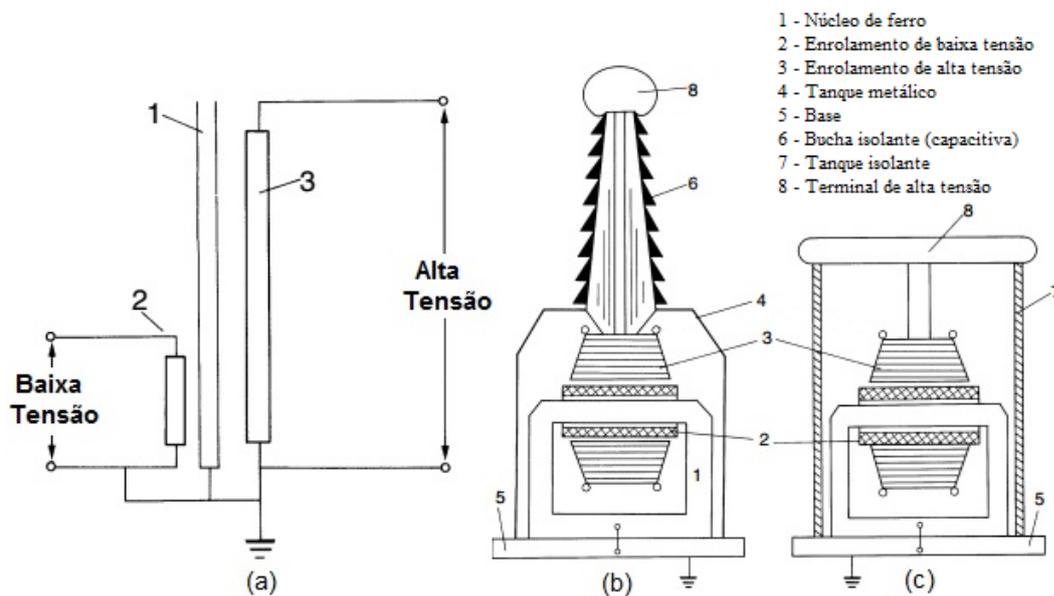


Figura 28 - Transformador de ensaio, (a) Circuito elétrico equivalente, (b) Transformador com tanque aterrado e bucha de alta tensão, (c) Transformador com tanque isolante.

Considerando-se os aspectos construtivos, as principais características que diferenciam o transformador de ensaio do transformador de potência seriam a utilização da bucha isolante e um *design* compacto e estável das bobinas, associado a um elevado nível de isolação, pois a ocorrência de uma descarga disruptiva durante a execução do ensaio provoca um grande *stress* mecânico no enrolamento do transformador, podendo haver deslocamento de bobinas, causando assim um eventual dano ao transformador. Para protegê-lo, a norma [1] solicita que sua impedância de curto circuito seja menor que 20% (0,2 pu) e/ou seja inserido um resistor em série, como dito anteriormente, ou seja, entre o transformador e o equipamento sob ensaio [7, 8, 9].

Entretanto, projetos dielétricos e térmicos são de grande importância para a construção e funcionamento apropriado do transformador, conforme sua solicitação nos ensaios. O sistema térmico deverá se adequar ao isolante (papel-óleo, SF<sub>6</sub>, resina epóxi) utilizado e ao tipo de *design* mecânico do transformador (tipo tanque, tipo cilíndrico). Normalmente em transformadores de ensaio são utilizados canais de arrefecimento ou resfriamento natural por *streaming* de óleo. Na Tabela 5 estão apresentados resumidamente alguns transformadores de ensaios e seus parâmetros relevantes [9].

Tabela 5 - Tipos de transformadores e isolamentos, e alguns parâmetros relevantes.

Tipo de isolamento	Transformador tipo tanque com isolamento óleo e papel	Transformador tipo cilíndrico com isolamento óleo e papel	Transformador com bobinas impregnadas a SF <sub>6</sub>	Transformador com isolamento a resina epóxi
Parâmetros				
Máxima tensão nominal (kV)	1	500	1	100
Máxima corrente nominal (A)	10	<2	<0,5	0,2
Máxima potência de ensaio (kVA)	10	<1	<500	<20
Ciclo máximo de trabalho	Contínuo	10 horas	<1 hora	<2 horas
Impedância de curto-circuito (%)	5-10	10-15	20	20
Taps para alta tensão	Sim	Não	Não	Não
Demanda de altura do laboratório	Baixo	Alto	Indiferente	Indiferente
Demanda da área de conexão de terra	Média	Média	Pequeno	Indiferente
Usado em conexão em paralelo	Sim	Condicionado para	Sim	Indiferente
Usado em cascata	Sim	Sim	Não	Indiferente
Utilização em área externa	Sim	Não	Não	Não

Assim como apresentado na Tabela 5, os transformadores podem ser caracterizados por meio dos principais parâmetros:

- Tensão nominal do primário ( $Vn_p$ ),
- Tensão nominal do secundário ( $Vn_s$ ),

- Corrente nominal ( $I_n$ ),
- Potência nominal ( $S_n$ ),
- Impedância de curto-circuito ( $X\%$ ); e
- Ciclo de trabalho.

Para considerações básicas o circuito elétrico simplificado do arranjo de ensaio é apresentado na Figura 29(a).

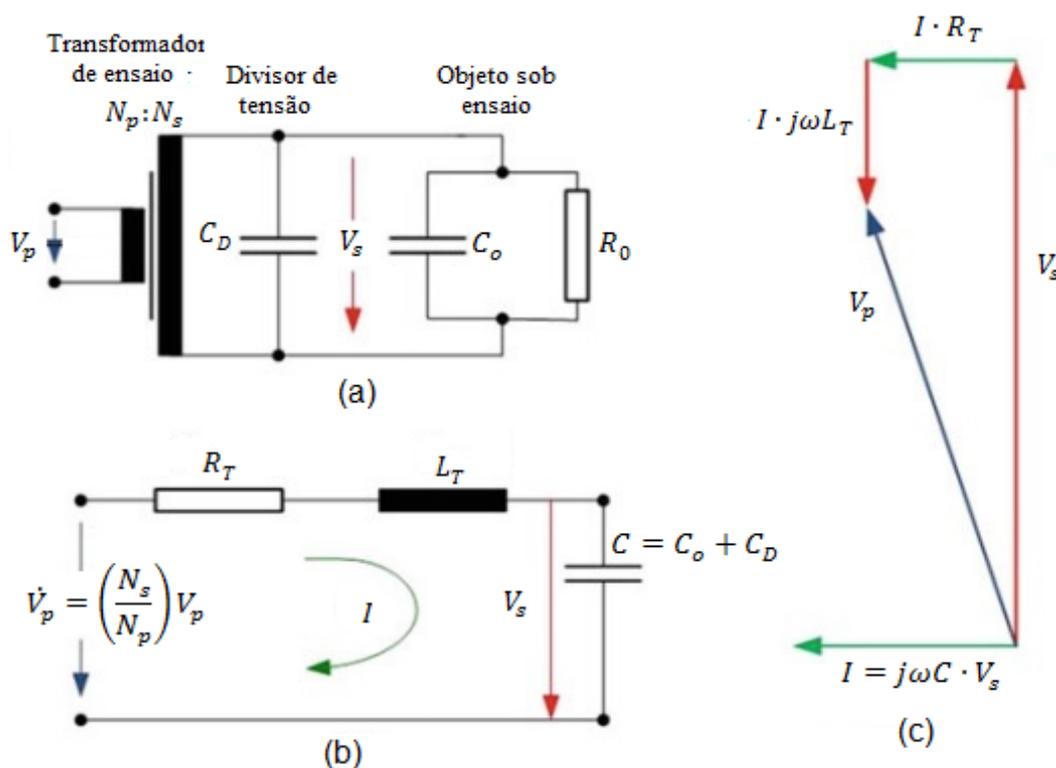


Figura 29 - (a) Circuito elétrico do arranjo de ensaio. (b) Circuito elétrico equivalente referido ao secundário. (c) Diagrama de fasores.

Utilizando a relação de transformação do transformador expressa na equação (25), é possível realizar uma análise do arranjo de ensaio por meio de um circuito RLC série conforme a Figura 29(b), em que  $L_T$  representa a indutância de dispersão do transformador,  $R_T$  as perdas no núcleo e enrolamentos e  $C$  o somatório das capacitâncias do divisor de tensão e do objeto sob ensaio. A tensão aplicada ao objeto sob ensaio  $V_s$ , como mostra o diagrama fasorial da Figura 29(c), pode ser obtida por

$$V_T = V_s = \frac{I}{j\omega C}, \quad (26)$$

sendo  $I$  a corrente de ensaio. A norma [1] descreve que os transformadores devem fornecer uma corrente superior a 100 mA em ensaios em condições a seco, entretanto em ensaios sob chuva o transformador deverá ser capaz de fornecer uma corrente de até 1 A.

A presença da impedância  $R_T + j\omega L_T$  indica que existirá uma queda de tensão e um atraso fasorial conforme

$$\Delta V = V_{R_T} + V_{L_T} = I \cdot R_T + I \cdot j\omega L_T. \quad (27)$$

Porém, como a maioria dos equipamentos ensaiados são capacitivos, o atraso fasorial da tensão de ensaio é compensado e, como as perdas do transformador são pequenas,  $V_s = V_T$ . Logo, pode ser facilmente visto que a tensão  $\dot{V}_p$ , em ensaios com equipamentos capacitivos, será menor que a tensão de ensaio  $V_s$ , entretanto em ensaios com equipamentos indutivos  $\dot{V}_p$  apresentaria um valor maior que  $V_s$ .

Pode-se concluir que a relação entre a tensão de alimentação primária do transformador de ensaio e a tensão de ensaio no secundário do transformador é dependente dos parâmetros do equipamento sob ensaio. Portanto, a tensão primária não pode ser utilizada para a medição da tensão de ensaio [9, 23].

Como dito anteriormente, a impedância de curto circuito é um parâmetro essencial para proteção e dimensionamento de um transformador de ensaio. Embora este parâmetro, segundo a norma [1], seja solicitado em valores menores que 20%, existem transformadores de ensaio com impedâncias de curto circuito entre 5 e 25%. Para o cálculo deste parâmetro é necessário determinar a tensão de curto circuito  $\dot{V}_{kT}$ , ou seja, a tensão de alimentação  $V_p$  necessária para que exista uma corrente nominal  $I_n$  no secundário do transformador, quando o mesmo encontra-se em curto circuito. Assim, considerando o circuito da Figura 29(b) com perdas resistivas nulas ( $R_T = 0$ ), obtém-se a tensão de curto circuito como

$$\dot{V}_{kT} = \omega L_T I_n. \quad (28)$$

Logo, a impedância de curto circuito é definida como a relação entre a tensão de curto circuito e a tensão nominal do secundário  $V_{ns}$  [9], ou seja,

$$X_{\%} = \frac{\dot{V}_{kT}}{V_{ns}} = \omega^2 C L_T \quad (29)$$

Transformadores de ensaio (Figura 30), nestas configurações, são utilizados em ensaios com nível de tensão inferior a 100 kV. Quando solicitadas tensões mais elevadas, são utilizados transformadores em cascata [14, 15].



Figura 30 - Transformador de ensaios.

### 3.2.1.3. Transformador em cascata

Os transformadores em cascata (Figura 31) são utilizados normalmente quando um nível de tensão a partir de 500 kV é solicitado ao ensaio, pois esta configuração garante maior estabilidade na tensão de ensaio [7, 15].



Figura 31 – Transformadores em cascata (duas unidades de 600 kV em série).

As contribuições de W.Petersen e A.-J. Fischer em 1915 foram significativas para o projeto, desenvolvimento e aplicação em ensaios de alta tensão. A Figura 32 mostra o primeiro transformador em cascata desenvolvido [9].

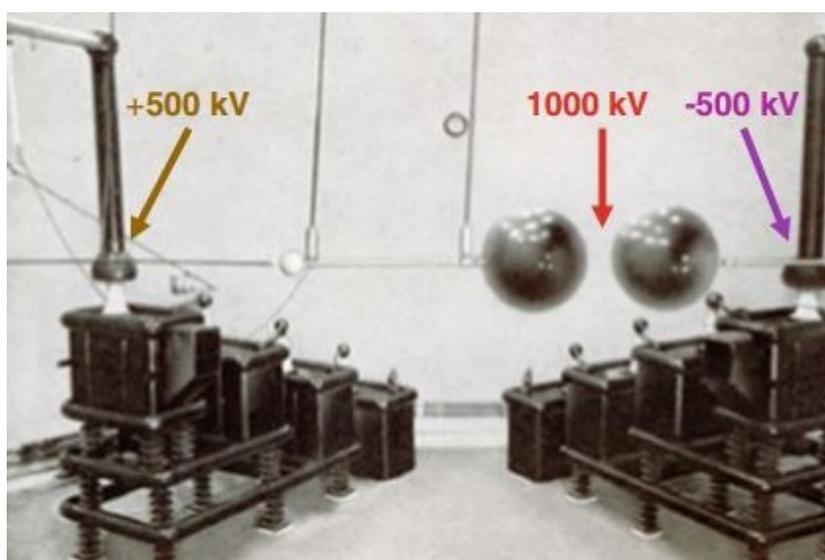


Figura 32 - Primeiro transformador em cascata desenvolvido para ensaios de alta tensão.

Para um funcionamento correto desta configuração de transformador, foi inserido um enrolamento adicional, chamado de enrolamento de excitação, que é responsável pelo fornecimento da tensão do primário do estágio subsequente, sendo este enrolamento formado por duas bobinas de alta tensão ligadas em série, onde cada bobina encontra-se em um núcleo distinto. Logo, o transformador em cascata possui um enrolamento terciário e pode ser melhor visualizado na Figura 33 [8, 12, 15].

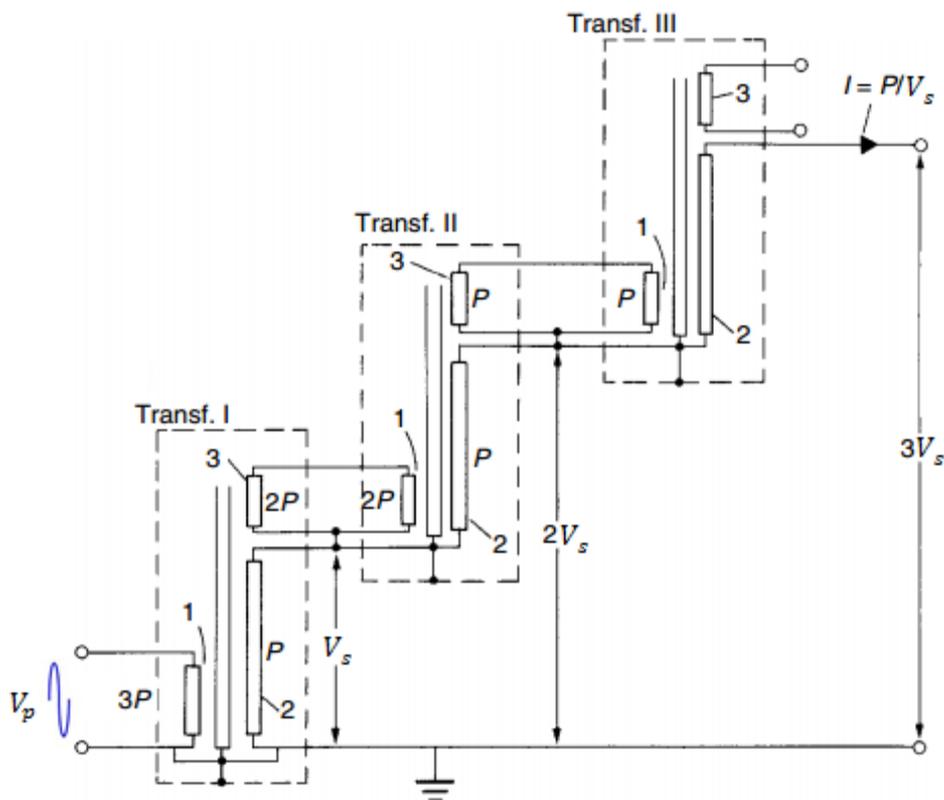


Figura 33 - Diagrama elétrico do transformador em cascata.(1) Enrolamento primário, (2) Enrolamento secundário, (3) Enrolamento terciário e de excitação.

Conforme o diagrama do transformador em cascata pode-se afirmar que o enrolamento de excitação é o enrolamento terciário, sendo que a relação de transformação para o enrolamento primário é unitária.

Outra importante observação obtida no diagrama é o ponto de aterramento de toda a cascata, pois apenas o primeiro estágio encontra-se aterrado, enquanto os demais estão isolados, promovendo assim a elevação total do potencial conforme as contribuições individuais de cada transformador [8].

A grande desvantagem dos transformadores em cascata é a potência  $P$  consumida em toda a cascata, podendo ser muito elevada conforme o número de estágios, pois a potência total do conjunto é o produto da potência fornecida ao arranjo pelo número de estágios [7], podendo sobrecarregar o regulador de tensão e o primeiro transformador da cascata. Porém, para evitar esta sobrecarga no primeiro transformador do circuito em cascata, são inseridos reatores em paralelo com o enrolamento primário para compensar as correntes capacitivas existentes e assim diminuir a potência reativa existente.

Entretanto, o número de estágios não afeta somente a potência consumida, mas a corrente de ensaio será reduzida e a impedância de curto circuito em pu será elevada conforme aumentar o número de estágios, ou seja,

$$X_{\%} = \sum_{i=1}^n [(n - i + 1)^2 X_{pi} + X_{si} + (i - 1)^2 X_{ti}], \quad (30)$$

onde as perdas ativas dos enrolamentos e núcleo foram desprezadas e as reatâncias fornecidas em sistema por unidade (pu) de mesma base. Logo, as componentes da equação são:

- $n$  = Número de estágios do transformador em cascata.
- $X_p$  = Reatância do enrolamento primário.
- $X_s$  = Reatância do enrolamento secundário.
- $X_t$  = Reatância do enrolamento terciário.

Ainda que os transformadores em cascata sejam o método mais utilizado para obter altas tensões em ensaios, existe a possibilidade de formação de um circuito ressonante, dependendo da carga (capacitiva ou indutiva) acoplada, pois caso o transformador esteja com uma carga nominal, deve-se submeter o primeiro estágio a uma tensão nominal. Entretanto, se a tensão de entrada for um pouco maior que a metade do valor nominal, o sinal de saída oscila na frequência de ressonância e há um ganho de amplitude [7].

### 3.2.1.4. Circuitos Ressonantes

Os circuitos ressonantes, série ou paralelo, constituem um método que pode ser usado para “geração” de alta tensão em ensaios, sendo permitido pela norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013 e muito utilizado nos ensaios com equipamentos capacitivos em que as correntes de fuga de isolamento externa são menores em comparação com as correntes capacitivas internas do objeto, como por exemplo em ensaios com cabos de alta tensão. Entretanto, seu uso é inadequado para ensaios de isolamento externa em condições sob chuva ou poluição. Os princípios dos circuitos ressonantes, série ou paralelo, são iguais, porém, como os circuitos paralelos são pouco utilizados, neste trabalho somente será abordado o circuito série [1, 14].

Um arranjo de ensaio que utiliza um circuito ressonante série geralmente é constituído por um transformador de excitação ou alimentação (que inclui perdas resistivas), uma carga capacitiva (equipamento sob ensaio) e um indutor de compensação, podendo ser modelado eletricamente conforme o circuito da Figura 34.

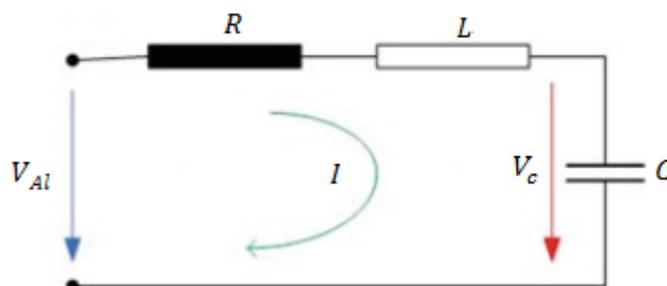


Figura 34 - Circuito simplificado e equivalente ao arranjo de ensaio com circuito ressonante série em ATCA.

Para que o circuito de ensaio entre em ressonância é necessário que o mesmo tenha diagramas de fasores iguais ao da Figura 35.

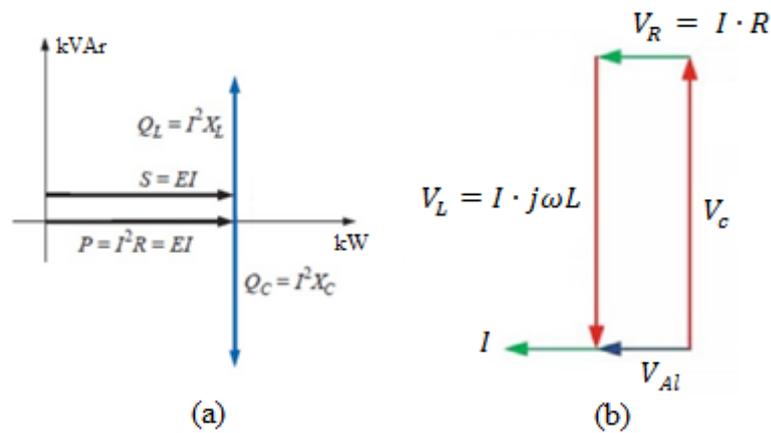


Figura 35 - (a) Diagrama de potências. (b) Diagrama de fasores.

A resposta em frequência das reatâncias é caracterizada pela frequência natural de oscilação  $f_o$ , valor específico de frequência no qual as potências reativas do circuito se anulam (Figura 35(a)), devido à igualdade entre as tensões na carga capacitiva e no indutor de compensação (Figura 35(b)). Por se tratar de um circuito série, o valor da corrente é igual em todo o circuito. Logo, para que as tensões nos componentes reativos sejam iguais, é necessário que a impedância equivalente do circuito,

$$Z = R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right), \quad (31)$$

ou seja, tenha reatâncias capacitivas e indutivas iguais, conforme a Figura 36 e a equação (32).

$$X_L = X_C \rightarrow \omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (32)$$

logo, a frequência natural de oscilação é dada por

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (33)$$

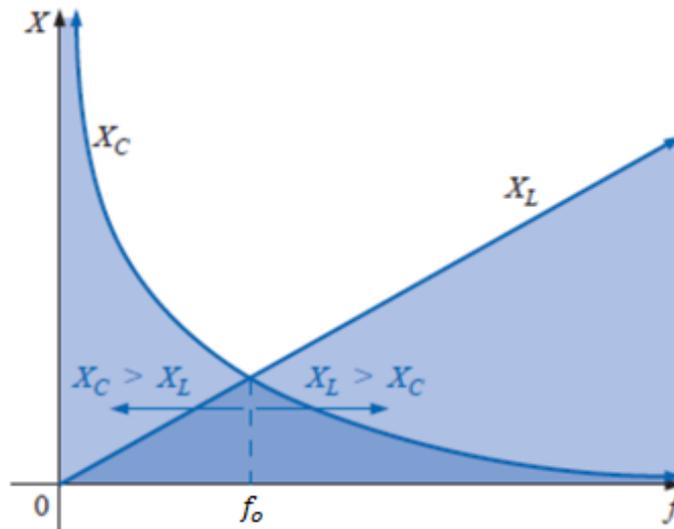


Figura 36 - Resposta em frequência das reatâncias de um circuito ressonante série.

Porém, há duas possibilidades para que a equação (32) seja obedecida e o circuito entre em ressonância. Considerando que capacitância é um parâmetro fixo no circuito, pode-se ajustar a indutância do reator até que a frequência natural  $f_0$  torne-se idêntica à frequência de alimentação  $f_f$ , ou pode-se alimentar o circuito por um conversor de frequência com a frequência natural determinada *a priori* conforme a equação (33) [9, 14].

Conforme a sua resposta em frequência, é possível analisar que o circuito em ressonância “gera” uma tensão de ensaio  $V_o$  com amplitude intensificada segundo o ganho atribuído ao fator de qualidade  $Q$ , que é definido como a relação entre a potência capacitiva (kVA) do objeto sob ensaio e as perdas resistivas, ou seja, a potência ativa (kW) fornecida pelo transformador de excitação [14], de forma que

$$Q = \frac{P_c}{P_r} = \frac{V_c I}{V_r I} = \frac{\omega_0 C}{R I} = \sqrt{\frac{L}{CR^2}}. \quad (34)$$

Logo, a tensão de ensaio  $V_o$  é igual a

$$V_o = V_{Al} Q. \quad (35)$$

Assim, as principais vantagens para a utilização dos circuitos série ressonantes são:

- A potência ativa em kW fornecida pelo circuito de alimentação é dado pela relação  $kVA/Q$ , onde  $kVA$  é o valor da potência reativa do equipamento sob ensaio e  $Q$  é o fator de qualidade variável do reator, geralmente superior a 40. Por isso, a potência ativa fornecida é muito pequena;
- O circuito série ressonante suprime as interferências harmônicas. Assim, a tensão de ensaio aproxima-se de uma senoide perfeita, o que é desejável para uma medição mais precisa nos ensaios de descargas parciais e tangente de delta;
- No caso de uma descarga disruptiva ou avaria do equipamento sob ensaio, durante a realização do ensaio, o circuito sairá da condição de ressonância e a tensão de ensaio perderá o ganho atribuído ao fator de qualidade. Assim, a corrente de curto-circuito é limitada pela reatância. Esta característica mostrou-se ser de grande importância para os ensaios, pois evita a destruição dos isolamentos mais frágeis do equipamento ensaiado;
- e
- O peso dos circuitos ressonantes em série normalmente chega de 3 a 6 kg/kVA, enquanto nos transformadores em série está em torno de 10 a 20 kg/kVA.

### **3.2.2. Sistema de Medição de ATCA**

Assim como descrito na subseção 2.2.2, o sistema de medição (SM) é um conjunto de dispositivos adequados para realizar medições em alta tensão, sendo composto por um dispositivo de conversão, um sistema de transmissão e instrumentos indicadores e/ou registradores. Quando utilizado um software para estimar os parâmetros das medições, este também faz parte do SM [10, 16]. Um modelo básico pode ser visto na Figura 15.

Os SM devem atender aos níveis de incerteza especificados na norma ABNT NBR IEC 60060-2:2016, conforme descrito nos itens a seguir.

### 3.2.2.1. Dispositivo de conversão

Para medição de ATCA usualmente são utilizados os seguintes dispositivos de conversão:

- Transformador de potencial indutivo;
- Transformador de potencial capacitivo; ou
- Divisores de tensão.

Os transformadores de potencial (capacitivo e indutivo), embora apresentem um comportamento dinâmico adequado, são utilizados para medição de ATCA em campo, como em subestações, e normalmente não compõem o sistema de medição para ensaios em laboratórios com ATCA. Logo, o dispositivo de conversão mais utilizado em ensaios de ATCA são os divisores de tensão resistivos de alta impedância e os divisores puramente capacitivos [10].

Os divisores resistivos de alta impedância possuem uma aplicabilidade limitada nos ensaios de ATCA. Um divisor resistivo é modelado eletricamente conforme a Figura 20, estando presentes neste circuito componentes capacitivas ( $C'_p$  e  $C'_e$ ), que representam as capacitâncias parasitas existentes. Estas componentes vão alterar o FE conforme o nível de tensão a ser medido, pois quanto maior o valor desta tensão, maior será a impedância do divisor, devido à necessidade de limitar a potência dissipada. Assim, ao elevar o valor ôhmico do divisor a sua altura será aumentada, ocasionando um maior efeito das capacitâncias parasitas no desempenho dinâmico. Segundo [24] os divisores resistivos de alta impedância podem ser utilizados nos ensaios em ATCA com frequência nominal de 60Hz, desde que a tensão eficaz seja menor que 100 kV. Nesta condição o fator de escala do divisor é considerado igual à equação (16) [7, 17].

Considerando que os divisores resistivos de alta impedância são limitados como descrito no parágrafo anterior, os divisores capacitivos (Figura 37) tornam-se mais adequados para medir tensões alternadas [13], pois apresentam um bom comportamento dinâmico e elétrico, aliado à praticidade do uso em todas as faixas de tensão [10].

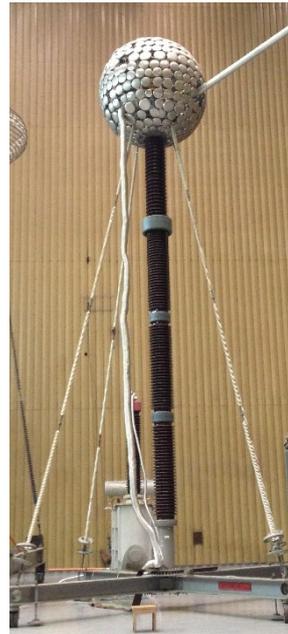
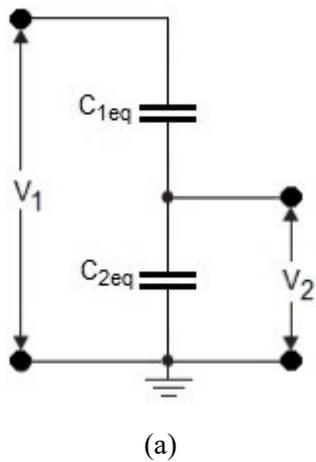


Figura 37 - Divisor de tensão capacitivo. (a) Circuito equivalente, (b) Divisor capacitivo de 1,2 MV.

Os divisores capacitivos possuem suas unidades de alta e baixa tensão constituídas apenas por capacitores, estáveis e com baixas perdas dielétricas, que serão associados em série e/ou paralelo. Contudo, em alguns casos a unidade de alta pode ser constituída apenas por um elemento capacitivo, como uma bucha capacitiva de um equipamento (transformador ou reator) ou um único capacitor de alta tensão, podendo este ser isolado a gás (geralmente SF<sub>6</sub>) ou a óleo isolante. Estas alternativas de unidades de alta tensão dos divisores podem ser vistas na Figura 38 [10].

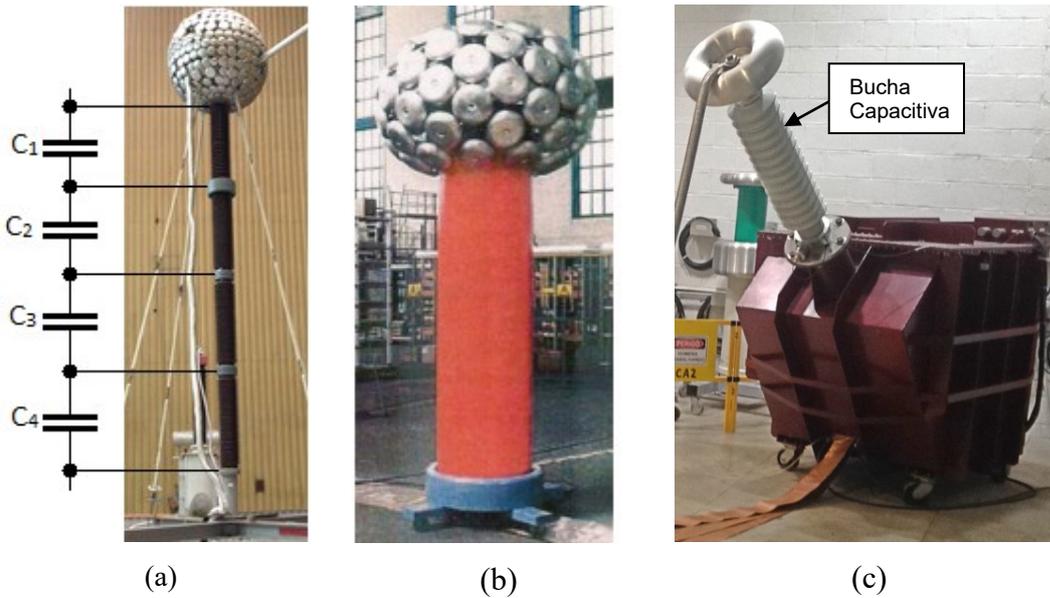


Figura 38 - Modelos de divisores capacitivos. (a) Unidade de alta tensão formada por vários capacitores em série. (b) Unidade de alta tensão formada por apenas um capacitor de alta tensão (c) Unidade de alta tensão formada por uma bucha capacitiva do transformador.

O circuito equivalente para um divisor capacitivo é representado na Figura 39, onde as unidades capacitivas são representadas por  $C'$  e  $R'$  representa as perdas ativas inerentes em cada elemento capacitivo. Assim como no circuito equivalente para um divisor resistivo (Figura 20), as capacitâncias parasitas para terra  $C'_e$  e as capacitâncias parasitas entre elementos capacitivos  $C'_p$  também estão presentes.

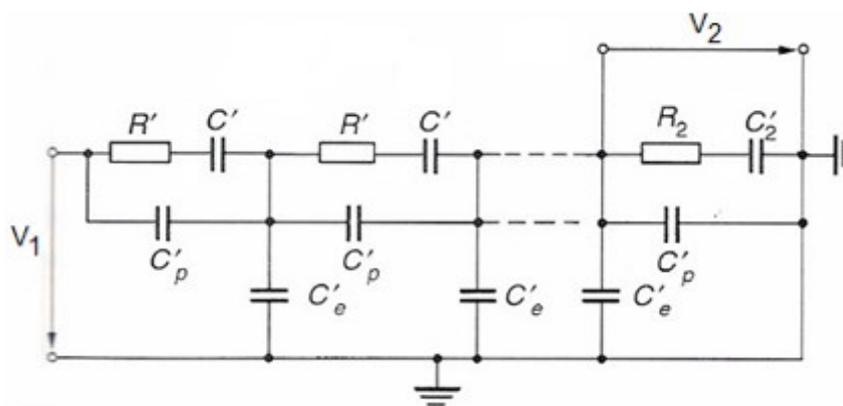


Figura 39 - Circuito equivalente de um divisor capacitivo.

Para o cálculo do fator de escala deve ser considerada a construção do divisor, conforme a associação dos capacitores de alta e de baixa. O fator de escala pode ser escrito como

$$Fe = \frac{V_1}{V_2} = \frac{C_{1eq} + C_{2eq}}{C_{1eq}} = \frac{C_{2eq}}{C_{1eq}} + 1. \quad (36)$$

Quando a impedância de alta tensão é formada por  $n$  capacitores em série, a capacitância total equivalente da associação dos capacitores será dada por

$$\frac{1}{C_{1eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}. \quad (37)$$

A impedância de baixa tensão equivalente geralmente é formada por associações em paralelo dos capacitores e pode ser descrita por

$$C_{2div} = \sum_{i=1}^n C_i. \quad (38)$$

Esta unidade do divisor ainda possui a particularidade de ser influenciada pela capacitância inerente do cabo de transmissão e do instrumento de medição. Estas influências serão melhor explicadas nos tópicos a seguir.

### 3.2.2.2. Sistema de transmissão

Assim como descrito na subseção 2.2.2.2 para ensaios em ATCC, o sistema de transmissão é um conjunto de dispositivos que transfere o sinal de saída do dispositivo de conversão (divisor de tensão) para o instrumento indicador e/ou registrador.

Os sistemas de transmissão utilizados nos ensaios em ATCA são constituídos por cabos de transmissão, podendo ou não ser utilizado um atenuador no final do cabo, conforme os níveis de tensão suportados pelo instrumento de medição.

Apesar da frequência de medição não ser elevada, é recomendável o uso de cabos coaxiais (Figura 40) como cabo de transmissão do sinal, pois estes minimizam os problemas causados por possíveis interferências eletromagnéticas [10].



Figura 40 - Cabo coaxial do sistema de transmissão.

Os cabos coaxiais possuem uma capacitância que poderá ser considerada no cálculo do fator de escala do SM, conforme a ordem de grandeza das outras capacitâncias envolvidas. O valor da capacitância do cabo é função de seu comprimento, conforme [16]

$$C_{cabo} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} m, \quad (39)$$

onde  $a$  e  $b$  são os raios do condutor central e do cabo até a malha de blindagem, respectivamente,  $\epsilon$  é a permissividade elétrica e  $m$  é o comprimento do cabo, sendo que estas variáveis podem ser observadas na Figura 40. Na prática, a relação entre capacitância e comprimento é um dado fornecido pelo fabricante, sendo um valor típico como, por exemplo, de 100 pF/m.

Igualmente aos SMs para ensaios em ATCC, os atenuadores utilizados nos SMs para ensaios em ATCA devem ser construídos com características de uma resposta dinâmica melhor ou igual à do divisor, de modo a não influenciar as medições.

Como citado anteriormente, os cabos de transmissão e os atenuadores influenciarão o valor final do fator de escala do SM. Porém, essa influência será diferenciada, conforme a utilização ou não dos atenuadores, indicados nas Figuras 41 e 42.

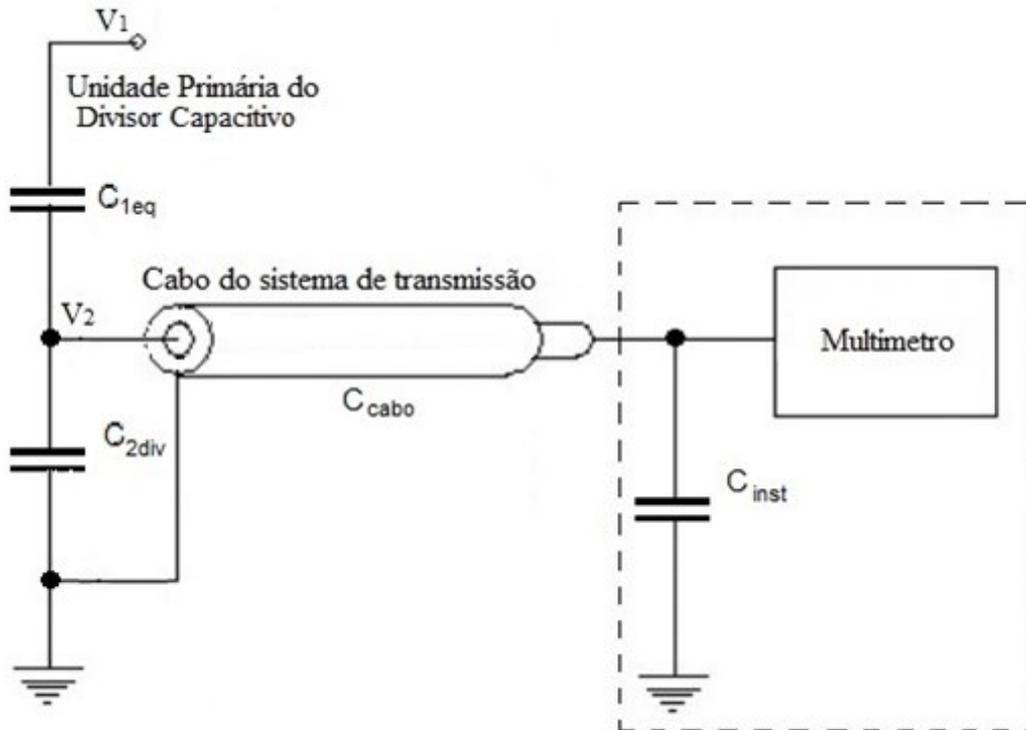


Figura 41 - Sistema de medição para ensaios em ATCA sem atenuador.

O SM apresentado na Figura 41 não utiliza um atenuador. Deste modo apenas as capacitâncias do cabo e do instrumento de medição complementarão a unidade de baixa tensão do divisor. Como indicado na Figura 41, todas estas capacitâncias estão em paralelo, já que um cabo coaxial pode ser modelado eletricamente a partir de infinitos elementos discretos (indutores e capacitores), conectados como mostra a Figura 42.

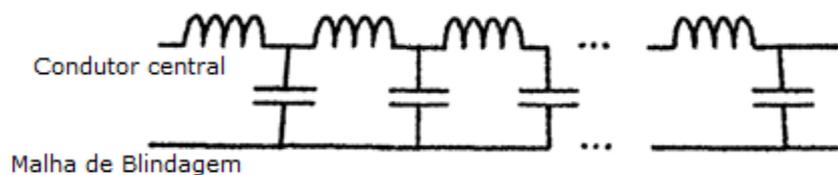


Figura 42 - Modelo elétrico de um cabo coaxial.

Embora o circuito tenha indutores, os mesmos não influenciam no cálculo do fator de escala. Logo, a capacitância equivalente da unidade de baixa pode ser escrita como

$$C_{2eq} = C_{2div} + C_{cabo} + C_{inst}. \quad (40)$$

Assim, o fator de escala do SM da Figura 41 pode ser escrito como

$$Fe = \frac{V_1}{V_2} = \frac{C_{1eq} + C_{2eq}}{C_{1eq}} = \frac{C_{2eq}}{C_{1eq}} + 1 = \frac{C_{2div} + C_{cabo} + C_{inst}}{C_{1eq}} + 1. \quad (41)$$

Com o uso do atenuador (Figura 43), o fator de escala do SM sofrerá uma alteração, pois será o produto dos fatores de escala do divisor e atenuador, conforme indicado na equação (42). Porém, neste caso a impedância do instrumento de medição estará em paralelo com a unidade de baixa tensão do atenuador e não com a unidade de baixa tensão do divisor.

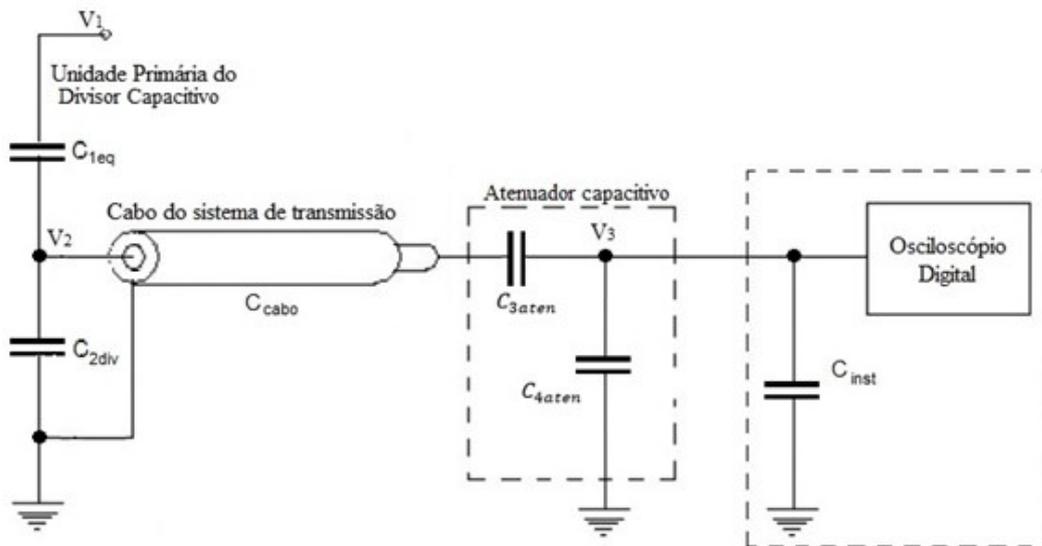


Figura 43 - Sistema de medição para ensaios em ATCA com atenuador.

$$FE = \frac{V_1}{V_3} = \left( \frac{C_{2div} + C_{cabo}}{C_{1eq}} + 1 \right) \left( \frac{C_{4aten} + C_{inst}}{C_{3aten}} + 1 \right) \quad (42)$$

### 3.2.2.3. Instrumentos de medição

Assim como descrito na subseção 2.2.2.3 para ensaios em ATCC são os instrumentos utilizados atualmente nos ensaios em ATCA são os multímetros de bancada com no mínimo 6,5 dígitos, os quais realizam apenas a indicação do valor RMS, ou seja, apenas a avaliação quantitativa do sinal da tensão de ensaio. Logo,

atualmente a avaliação qualitativa da tensão de ensaio é totalmente desprezada, embora esta seja essencial para uma execução do ensaio. A alternativa mais simples, entretanto de alto custo, é a utilização de voltímetros de crista especiais, capazes de medir todos os parâmetros solicitados pela norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013.

Porém, para solucionar este problema com um menor custo, esta dissertação propõe a utilização de um sistema dedicado, composto por instrumentos digitalizadores com no mínimo 8 bits de resolução vertical associados ao algoritmo de medição que será desenvolvido nessa dissertação.

#### **3.2.2.4 Qualificação do sistema de medição**

Para a avaliação correta de um SM, devem-se considerar os dados dos ensaios de tipo e rotina fornecidos pelo fabricante, assim como os ensaios de desempenho e verificações de desempenho.

Os ensaios e verificações de desempenho são realizados periodicamente nas calibrações e, entre elas, respectivamente, com o intuito de determinar o fator de escala atual do SM, comprovando que o mesmo é capaz de medir os parâmetros indicados na norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013, considerando as incertezas de medição (Tabela 4), dentro dos níveis indicados na ABNT NBR IEC 60060-2:2016, sempre com uma probabilidade de abrangência de 95%.

A estabilidade do fator de escala deverá estar dentro da faixa especificada pela norma ABNT NBR IEC 60060-2:2016 em  $\pm 3\%$  do fator de escala, para que grandes variações não ocorram em longos períodos de tempo, pois o período entre calibrações consecutivas pode variar entre 1 a 5 anos [2].

Sistemas de medição utilizados em ensaios ATCA devem ser capazes de medir a tensão de ensaio e o valor eficaz com uma incerteza não superior a 3% e também possuir desempenho dinâmico para corresponder às variações do sinal de tensão, permitindo uma estimativa precisa dos parâmetros.

A avaliação do comportamento dinâmico do SM é realizada mediante a estimativa da resposta amplitude/frequência  $G(f)$ , que é obtida submetendo o sistema a uma tensão senoidal  $V_E$  de entrada, com frequência variável e amplitude

conhecida, normalmente em baixa tensão ( $\cong 100$  V), e medindo sua tensão de saída  $V_S$ , ou seja,

$$G(f) = \frac{V_E}{V_S}. \quad (43)$$

Esta medição deverá ser realizada para a faixa de frequências entre 1 a 7 vezes a frequência fundamental  $f_{nom}$  da tensão de ensaio.

Segundo [2], existem duas condições em que o sistema de medição de ATCA pode se adequar, estando estas condições relacionadas à frequência do sinal senoidal que se deseja medir. Caso o SM seja destinado à operação em uma única frequência fundamental  $f_{nom}$ , a resposta amplitude/frequência deverá estar dentro da área marcada de até  $\pm 15\%$  em  $7f_{nom}$ , conforme a Figura 44.

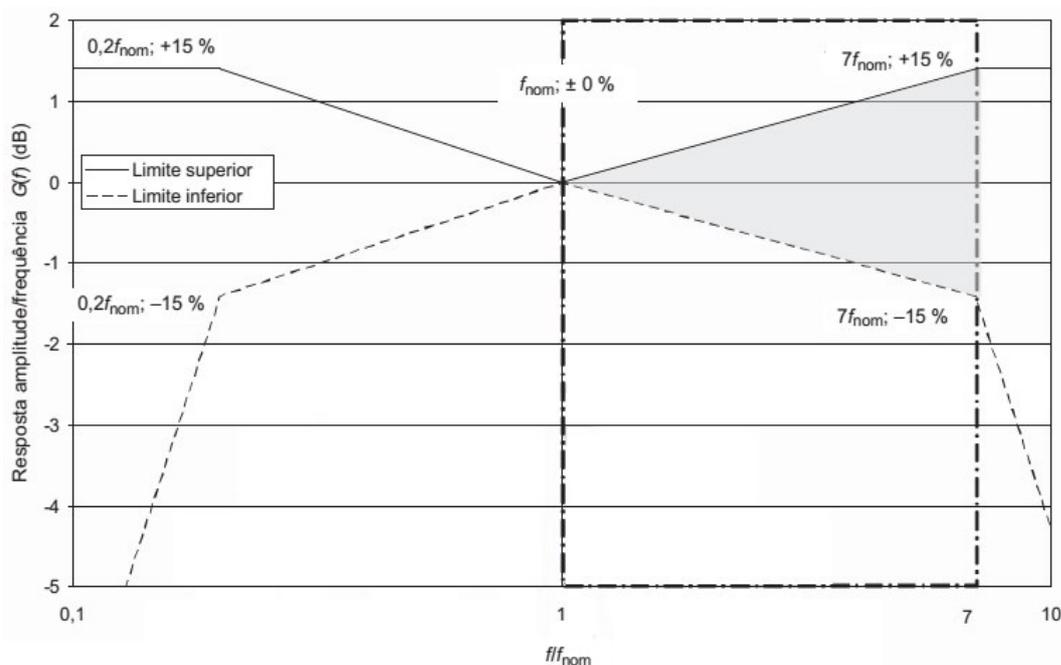


Figura 44 - Limites para respostas normalizadas de amplitude/frequência aceitáveis para sistemas de medição destinados à frequência fundamental única.

Para que um SM seja adequado para atuar em uma faixa de frequências fundamentais como, por exemplo, de 45 a 65 Hz, conforme a norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013, a resposta amplitude/frequência deverá ser constante com uma variação máxima de  $\pm 1\%$  a partir da frequência fundamental  $f_{nom1}$  até a maior

frequência fundamental  $f_{nom2}$ , e novamente a resposta amplitude/frequência dentro da faixa  $f_{nom1}$  a  $7f_{nom2}$  deve estar dentro da área marcada na Figura 45.

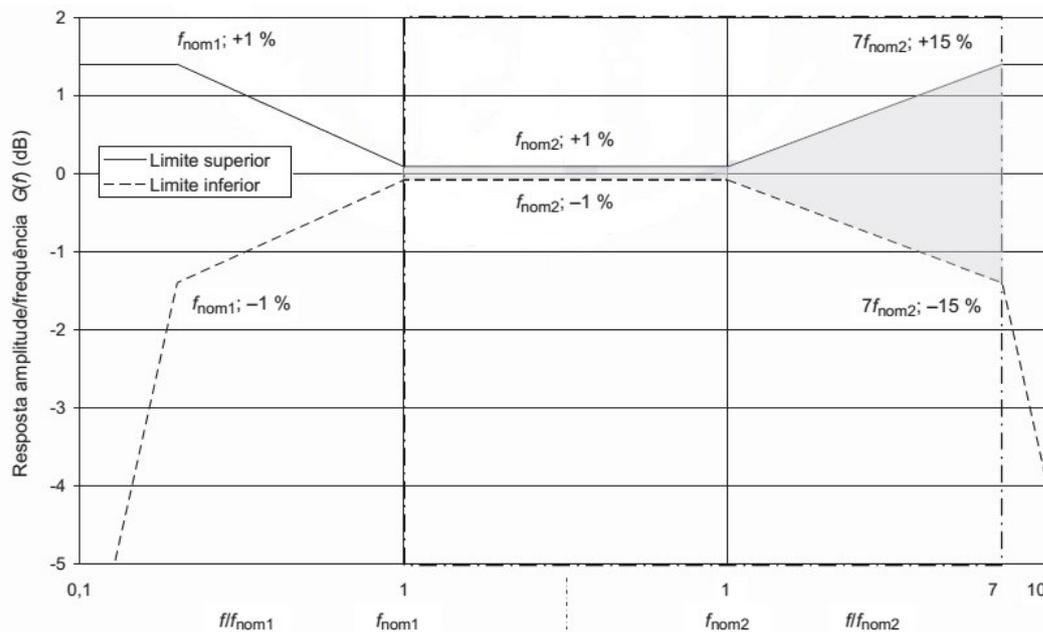


Figura 45 - Limite para respostas normalizadas de amplitude/frequência aceitáveis para sistemas de medição destinados a uma faixa de frequências fundamentais.

SMs que cumpram estes requisitos relacionados ao comportamento dinâmico são ditos adequados e com resposta em frequência suficiente para medir o parâmetro THD de uma tensão de ensaio.

Embora a avaliação do comportamento dinâmico seja essencial para a qualificação, ela pode ser dispensada quando o sistema de medição é utilizado com sistemas de geração que possuem a relação  $V_{crista}/V_{rms}$  igual a  $\sqrt{2} \pm 1\%$  em todas as condições de operação esperadas.

### 3.3. Procedimentos de ensaio

Assim como nos ensaios em ATCC, a norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013 definiu igualmente para os ensaios em ATCA três procedimentos de ensaio, idênticos aos descritos na seção 2.3. Estes procedimentos são utilizados para verificar a suportabilidade dielétrica do equipamento ou para determinar o nível de tensão que o equipamento é capaz de suportar sem a ocorrência de descargas disruptivas.

As únicas ressalvas em relação ao item 2.3 seriam a polaridade da tensão de ensaio, devido a sua inexistência em tensões alternadas e a frequência da tensão de ensaio, que deve ser mantida dentro da faixa de valores aceitáveis descrita na Tabela 4, durante toda a duração do ensaio.

## 4 Algoritmo de Medição

Neste capítulo será apresentado os requisitos normatizados de validação, e o desenvolvimento, dos algoritmos utilizados para estimar os parâmetros dos ensaios em ATCA e ATCC, assim como as ferramentas e metodologias usadas no processamento e pré-processamento, sendo também apresentada a plataforma de programação LabView, na qual o software foi desenvolvido.

### 4.1. Requisitos de Processamento de Sinais

Indústrias e laboratórios que realizam ensaios elétricos em alta tensão necessitam de ferramentas normalizadas com o intuito de garantir a qualidade metrológica dos resultados, a exatidão das medidas e a reprodutibilidade de ensaios realizados em diferentes laboratórios.

Portanto, os dados dos ensaios em ATCA e ATCC, que anteriormente eram medidos por instrumentos analógicos, atualmente são processados em formato digital mediante algoritmos associados a registradores digitais de dados. Visando à atual condição destes ensaios, a IEC (International Electrotechnical Commission) está desenvolvendo a norma IEC 61083-4, que tem previsão de publicação em 2017 [3] e atualmente está em fase final de publicação.

Esta norma terá o objetivo principal de garantir a exatidão nas medições dos parâmetros de ensaio em ATCC e ATCA, de forma similar à norma IEC 61083-2:2010 [40], dedicada à avaliação dos parâmetros de impulsos de tensão, estabelecendo requisitos de software e meios de validação do mesmo.

#### 4.1.1. IEC 61083-4

A norma IEC 61083-4 (“*Instruments and Software Used for Measurements in High-Voltage and High-Current Tests – Part 4: Requirements for Software for Tests With Alternating and Direct Voltages and Currents*”) [3], quando emitida

em sua versão final, será aplicada na avaliação de software de processamento e registro, com a finalidade de verificar que suas rotinas são capazes de comprovar a adequação do sistema de medição utilizado nos ensaios em ATCC e ATCA.

Este documento normativo não descreve as rotinas do software, porém cita os requisitos, parâmetros de ensaio que as rotinas devem medir, além de definir os meios de verificar e/ou validar o cumprimento destes requisitos nas rotinas em questão. A Tabela 6 apresenta os parâmetros de ensaio que devem ser estimados, conforme definido na norma [1].

Tabela 6 - Parâmetros de ensaio estimados nas rotinas do software.

Itens da norma ABNT NBR IEC 60060-1				
Forma de onda	Parâmetros			
	Tensão de ensaio	Valor RMS	Ripple	THD
Tensão Contínua	5.1.1	-	5.1.3	-
Tensão Alternada	6.1.1, 6.1.2	6.1.3	-	-

A validação do software é feita mediante o processamento de formas de onda padronizadas incluídas na norma [3], que são utilizadas como entrada, comparando-se o resultado deste processamento, ou seja, os dados de saída, aos valores de referência, devendo estar dentro do intervalo de aceitação proposto para cada parâmetro. O esquemático de validação pode ser observado na Figura 46.

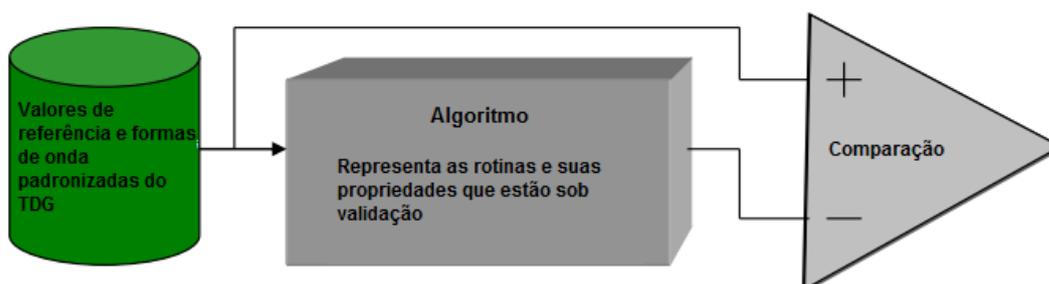


Figura 46 - Esquema simplificado do princípio de validação de software usando o TDG.

Os dados digitais das formas de onda padronizadas são fornecidos por um software proprietário intitulado TDG 61083-4 (*Test Data Generator*), descrito na próxima seção.

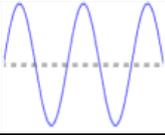
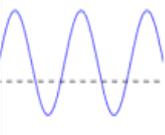
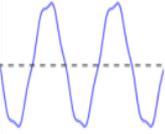
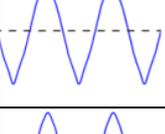
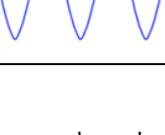
#### 4.1.2. Gerador de Dados de Teste – TDG

O TDG 61083-4 é um software integrante da norma [3], gerando arquivos de dados digitais de referência, ou seja, formas de onda sintetizadas e gravadas com o propósito de testar *software* utilizado para determinar os parâmetros de ensaio em ATCC e ATCA. Assim, estas formas de onda de referência devem ser processadas pelo algoritmo em teste, e os seus parâmetros de saída comparados com os valores de referência, que estarão totalmente definidos na versão final da norma, atualmente em elaboração.

Estes dados digitais tentam reproduzir as características dos digitalizadores tipicamente empregados em ensaios de alta tensão, utilizando um intervalo de amostragem de 20  $\mu$ s. Entretanto, os ruídos internos dos digitalizadores não são considerados no TDG 61083-4, sendo necessária a adição do ruído, conforme será abordado na seção 5.1.1.

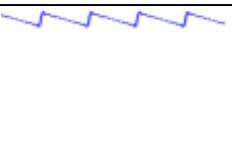
As Tabelas 7 e 8 apresentam as formas de onda padronizadas e seus valores de referência preliminares, a serem utilizados na validação dos algoritmos de medição para ensaios em ATCA e ATCC, respectivamente, conforme a norma [1].

Tabela 7 - Formas de onda de referência e seus parâmetros para tensão em corrente alternada.

Nome	Forma de onda	Descrição	Valores de Referência				
			$U_p/\sqrt{2}$ (kV)	$U_{r.m.s}$ (A.C) (kV)	$U_{r.m.s}$ (kV)	THD (%)	Freq. (Hz)
ACV-A1		Tensão senoidal perfeita	1	1	ASD	ASD	50
ACV-A2		Tensão senoidal com elevado componente contínuo (offset = 500 V)	1	1	ASD	ASD	60
ACV-A3		Tensão senoidal com distorção no 4ª harmônico	1,007	1,001	ASD	ASD	50
ACV-A4		Tensão senoidal com dois picos (distorção em harmônico ímpar)	0,959	1,005	ASD	ASD	60
ACV-A5		Tensão em onda triangular	1,130	1,003	ASD	ASD	50
ACV-A6		Tensão em onda triangular	1,050	1,000	ASD	ASD	60

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1512857/CA

Tabela 8 - Formas de onda de referência e seus parâmetros para tensão em corrente contínua.

Descrição no TDG	Forma de onda	Descrição	Valores de Referência		
			$U_{d.c}$ (kV)	$U_{ripple}$ (kV)	Frequência (Hz)
DCV-A1		Tensão contínua ideal	1	0	Não aplicável
DCV-A2		Tensão contínua com 3% de fator de ripple	1	3	100

**Nota:** A ausência de alguns parâmetros de referência, indicada pela sigla ASD (a ser definido) é devida ao fato da norma ainda estar em elaboração pela IEC.

O erro e as contribuições da incerteza nos parâmetros são determinados por procedimentos de calibração, para os quais são necessários os limites de aceitação dos valores padrões indicados nas Tabelas 7 e 8, fornecidos pelo TDG. Assim, os erros e as contribuições de incerteza são quantificados por meio das comparações conforme a Figura 46. Portanto, o TDG é um software de suma importância para a proposta desta dissertação [3].

#### 4.1.3. Valores de referência

Os valores de referência das formas de onda padronizadas descritas na seção anterior estão sendo definidos por meio dos testes de *round-robin*, ou seja, ensaios interlaboratoriais experimentais que estão sendo realizados em vários laboratórios de ensaios e calibração, cada um utilizando seu SM e respectivo software próprio. Os valores indicados por cada laboratório serão tratados estatisticamente e os valores médios desta comparação serão considerados como os valores de referência a serem incluídos na versão final da norma [3].

#### 4.2. Estruturação do algoritmo de medição

O algoritmo de medição é dividido nas seguintes rotinas: Entrada de dados, Pré-processamento, Processamento de dados e Estimativa dos parâmetros. A Figura 47 mostra seu fluxograma.

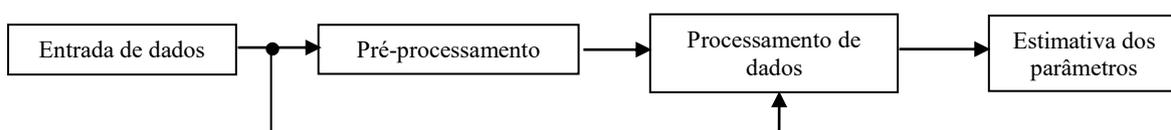


Figura 47- Fluxograma geral do algoritmo de medição.

Para aquisição e controle do registrador de dados (osciloscópio Tektronix TDS da família 7000), ou seja, na entrada de dados foi utilizada uma sub-rotina de

controle, desenvolvida como parte integrante do sistema IMPREAL 2.0, software dedicado à aquisição e análise de impulsos de tensão [25]. Porém, como o foco desta dissertação é monitorar os sinais continuamente durante todo o ensaio, foi necessário modificar algumas características do controle, principalmente em relação ao *trigger*, para que a aquisição fosse contínua.

Além da entrada de dados e do processamento de dados, foi desenvolvido um módulo de pré-processamento do sinal de entrada, garantindo uma estimativa mais precisa e exata, tendo como objetivo caracterizar o sinal de entrada e reduzir o nível de ruído.

Já na rotina de estimativa dos parâmetros, são indicados os resultados advindos do processamento dos dados de entrada, ou seja, o valor da estimativa dos parâmetros.

#### **4.2.1. Plataforma do algoritmo – Labview**

O LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é uma plataforma de desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados e controle de instrumentos, desenvolvida pela National Instruments, sendo seu principal diferencial a linguagem de programação. A linguagem de programação G é uma linguagem gráfica que utiliza ícones, em vez de linhas de texto. Em contraste com as programações em texto, em que instruções determinam a execução do programa, na linguagem gráfica, a programação é baseada em fluxo de dados, que define a execução.

No LabVIEW, ilustrado na Figura 48, constrói-se uma interface de usuário, utilizando os conjuntos de ferramentas e objetos. A interface de usuário é conhecida como Painel Frontal. Então, adiciona-se o código utilizando representações gráficas de funções para controlar e endereçar os objetos do painel frontal. O código fonte está localizado no Diagrama em Blocos. Assim, em certos aspectos, o diagrama em blocos assemelha-se a um fluxograma [26].

Os programas em LabVIEW são chamados de instrumentos virtuais (VIs – *Virtual Instruments*) e suas rotinas são denominadas subVis. Uma VI é constituída por três componentes principais:

- Painel Frontal: Interface com o usuário.

- Diagrama em Blocos: Local de construção do código que controla os objetos do painel frontal.
- Painel de ícones e conectores: Ponto de conexão de entrada e ou saída de dados que foram processados pela VI.

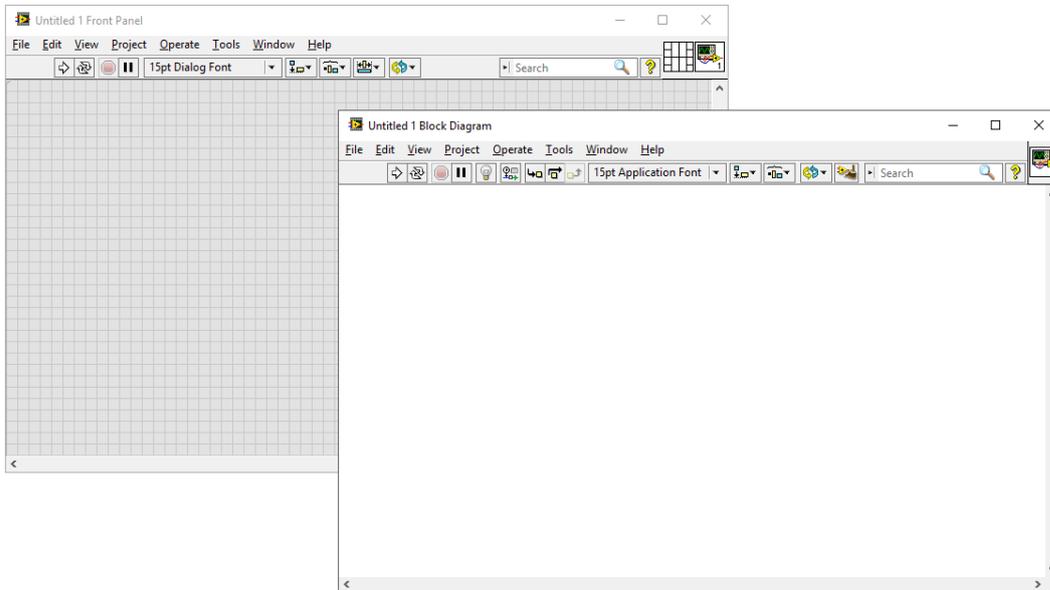


Figura 48 - Painel frontal e Diagrama em Blocos.

Quanto a sua comunicação, o LabVIEW é compatível com diversos protocolos de comunicação e interfaces, como GPIB, RS-232 e USB, além de possuir recursos internos para a conexão à Internet.

Logo, com o LabVIEW é possível criar aplicativos de testes, medições, aquisições de dados, controle de instrumentos e processos, registro de dados, análise de medidas e geração de relatórios. Podem-se criar executáveis e bibliotecas compartilhadas, já que o LabVIEW é um compilador real de 32 bits [27].

### 4.3. Desenvolvimento do algoritmo

O desenvolvimento do algoritmo de medição foi baseado em ensaios experimentais pois, a maioria dos parâmetros descritos na norma [1] possui fórmulas e definições bem consolidadas, possibilitando que várias metodologias fossem criadas e implementadas computacionalmente.

Logo, a estratégia de desenvolvimento do algoritmo foi selecionar as SubVIs disponíveis na biblioteca do LabVIEW e desenvolver outras SubVIs, segundo algumas ferramentas numéricas e as considerações descritas em [28], capazes de processar os dados de entrada e estimar os parâmetros, e então comparar os resultados obtidos por ensaios experimentais. Assim, os métodos que obtivessem os menores erros seriam escolhidos para compor o algoritmo de medição.

Porém, inicialmente procurou-se otimizar o processamento dos dados por meio de uma rotina de pré-processamento, de modo que os dados de entrada fossem tratados antes de serem processados, possibilitando estimativas mais precisas e exatas dos parâmetros relevantes.

#### **4.3.1. Pré-processamento**

Para que fossem otimizadas as subVIs selecionadas para o processamento dos dados de entrada, foi necessário utilizar rotinas de pré-processamento, incluindo filtros para minimizar a influência de ruídos na estimativa dos valores extremos, como o *ripple*, valor de crista e tensão de ensaio. Foram analisadas 3 opções de filtro: Sem filtro (SF), Filtro de Médias (FM) e Filtro Savitzky-Golay (SG).

Além da utilização dos filtros, durante o pré-processamento os dados de entrada são caracterizados, verificando-se o intervalo de amostragem e a quantidade de amostras do sinal de entrada, sendo esta informação de fundamental importância para o cálculo do valor RMS nos métodos que utilizam a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Outra proposta implementada na rotina de pré-processamento é a opção da remoção do nível CC do sinal de entrada, para analisar qual a influência deste parâmetro na estimativa do valor RMS.

##### **4.3.1.1. Filtro de médias**

Os filtros de média móvel são utilizados para a suavização de ruídos, que dependem basicamente do processo de cálculo da média. Seu algoritmo é composto basicamente por 3 etapas:

1. Divide-se o sinal no domínio do tempo  $x[n]$  que se deseja estudar em intervalos sequenciais, que são conhecidos como janelas, com mesma largura, de modo que cubram todo o sinal analisado e tenham o mesmo número de amostras em cada janela.
2. Para cada janela, é calculada a média dos pontos conforme a equação (44) e então armazena-se este valor correspondente a esta janela.

$$y[n] = \frac{1}{M+1} \sum_{k=0}^M x[n-k] \quad (44)$$

onde  $M$  é o número de amostras que possui uma janela, determinando o grau do filtro.

3. Desloca-se a janela para o próximo ponto e repetem-se os procedimentos anteriores.

A principal vantagem deste filtro é sua fácil implementação computacional e seu rápido processamento, embora sua utilização em sinais com picos acentuados não apresente um bom desempenho [29, 30].

Para análise deste filtro, foi adicionado ao sinal original um ruído de distribuição gaussiana com valor RMS igual a 2% do valor RMS do sinal original. A Figura 49 mostra o desempenho do filtro conforme o seu grau.

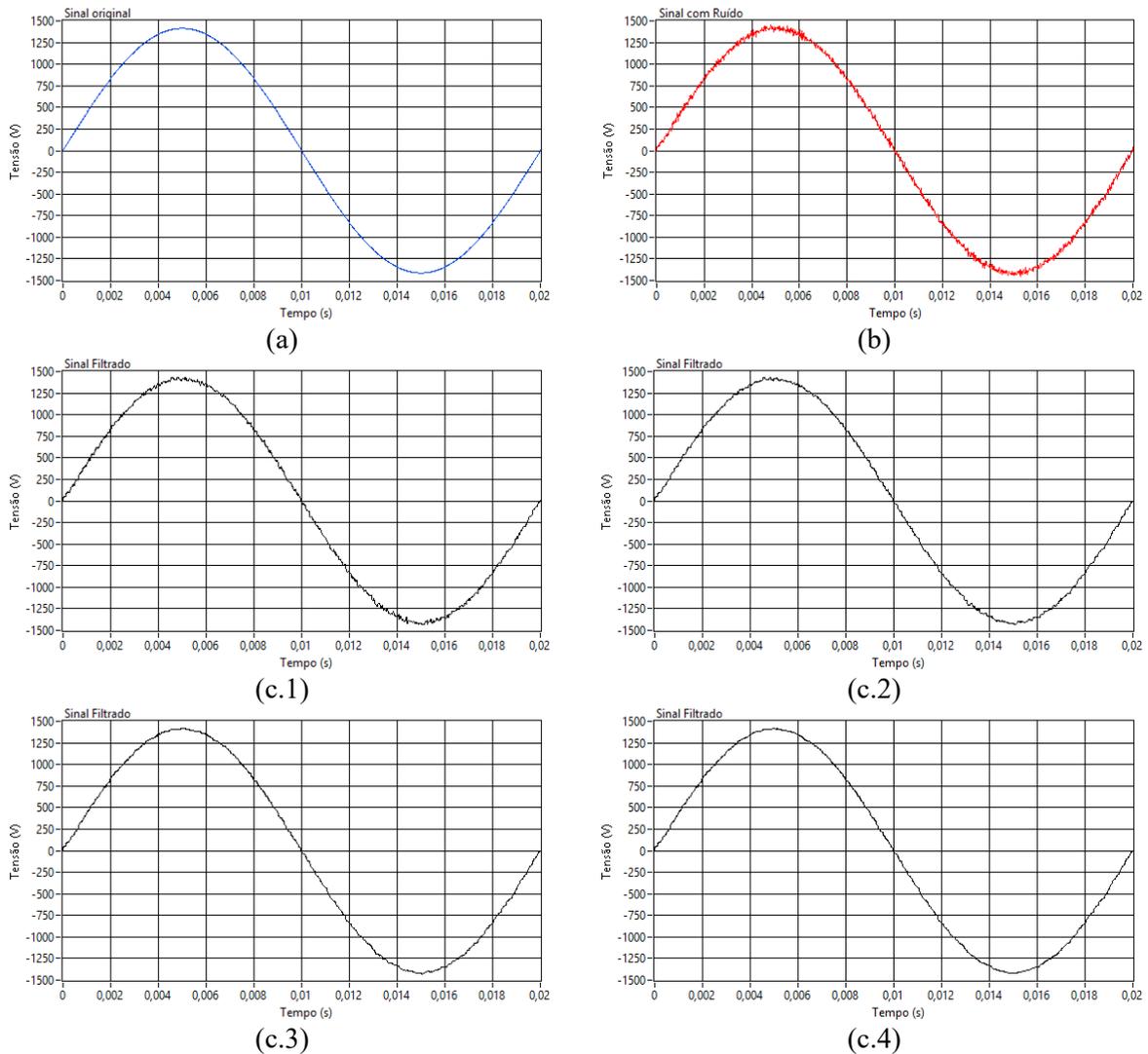


Figura 49 - Análise do desempenho do filtro de média móvel. (a) Sinal original (ACV-A1); (b) Sinal adicionado a ruído de 2%; (c.1) Sinal filtrado ( $M=1$ ); (c.2) Sinal Filtrado ( $M=2$ ); (c.3) Sinal filtrado ( $M=5$ ); (c.4) Sinal filtrado ( $M=10$ ).

Para uma análise quantitativa do desempenho do filtro de médias móvel, foi calculado o erro médio RMSE entre cada um dos sinais filtrados e o sinal original, e também entre o sinal ruidoso e o sinal original, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Erros médios (RMSE) do filtro de média móvel.

Dados comparados		Grau do Filtro de médias	Erro médio (RMSE)
Sinal Original	Sinal filtrado	1	8,83
Sinal Original	Sinal filtrado	2	8,19
Sinal Original	Sinal filtrado	5	11,11
Sinal Original	Sinal filtrado	10	13,57
Sinal Original	Sinal com ruído em 2%	Sem filtro	19,90

Verificou-se que um filtro com  $M=2$  é suficiente para as aplicações nos ensaios em ATCC e ATCA, pois a maioria dos ensaios somente é realizada caso apresentem níveis de ruído abaixo de 2%.

#### **4.3.1.2. Filtro Savitzky-Golay (SG)**

O filtro Savitzky-Golay [31] é uma ferramenta muito utilizada na suavização de sinais analíticos, minimizando a presença do ruído, porém esta suavização também interfere no sinal a ser medido, podendo suavizar pequenas variações sofridas no sinal.

Este filtro também é de fácil implementação computacional. Seu algoritmo de funcionamento é semelhante ao filtro de média móvel, porém, no algoritmo o cálculo do novo ponto é feito a partir de um ajuste polinomial obtido pelo método dos mínimos quadrados, o que possibilita sua aplicação em sinais com picos mais acentuados. Seu algoritmo é composto por 7 etapas:

1. Define-se a origem do sinal;
2. Define-se a largura da janela;
3. Define-se o ponto central da janela;
4. Remove-se o ponto central do conjunto de pontos da janela;
5. Ajusta-se, através do método de mínimos quadrados, um polinômio de grau variável aos pontos restantes;
6. Utiliza-se o polinômio para estimar o valor do ponto removido; e
7. Desloca-se a janela para o ponto seguinte do sinal original e repete-se o processo anterior.

O filtro de Savitzky-Golay é menos sensível à largura do intervalo pois o novo ponto, isto é, o ponto do sinal já suavizado, é obtido por meio do ajuste dos pontos do intervalo por um polinômio e não pela simples média dos pontos vizinhos [32].

Logo, para a configuração do filtro no LabVIEW é necessário determinar o número de dados ( $N_j$ ) que irão conter as janelas e o grau do polinômio ( $Gr$ ) ajustado para suavização. A Figura 50 mostra a resposta do filtro SG conforme algumas configurações.

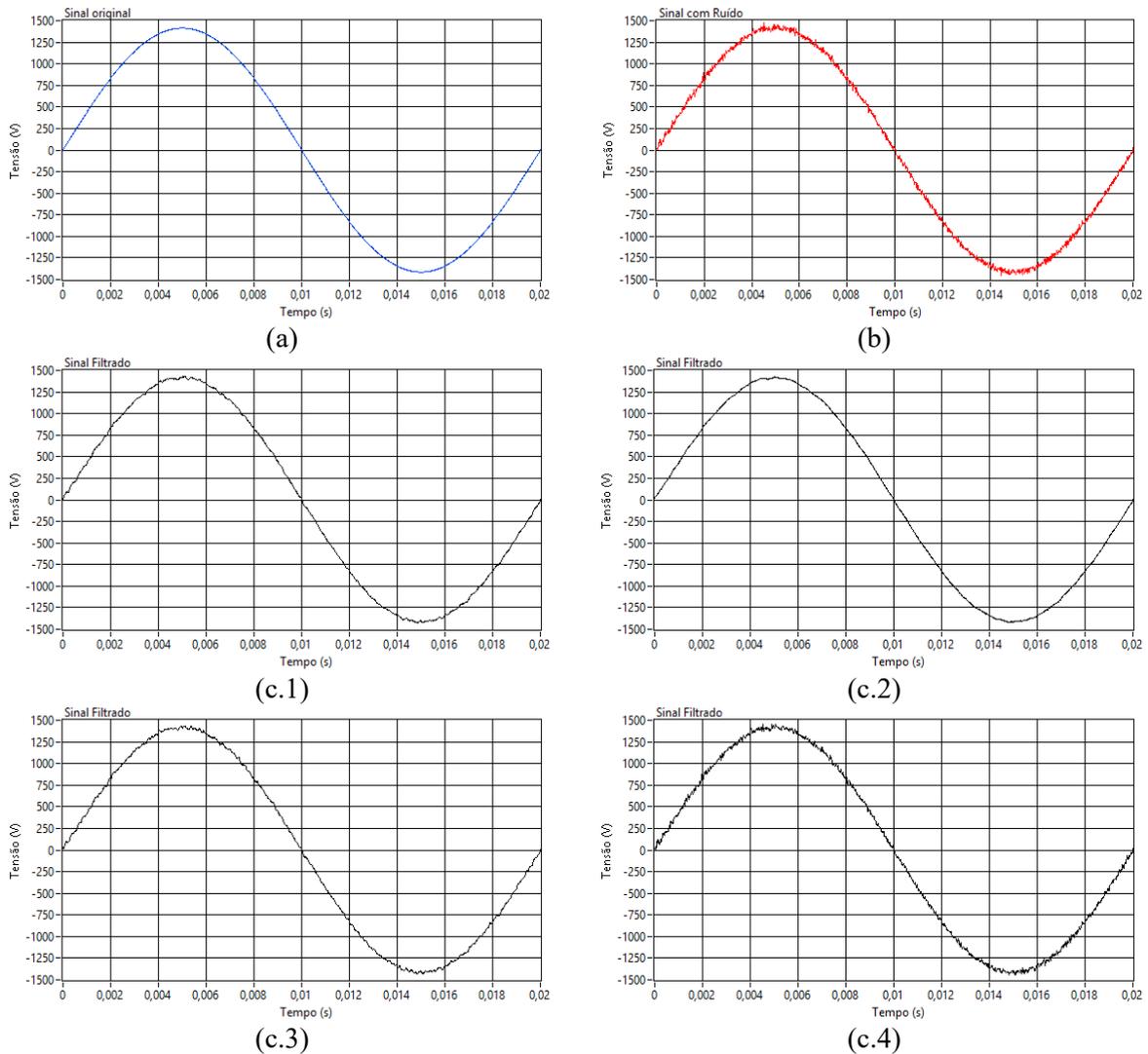


Figura 50 - Análise do desempenho do filtro SG. (a) Sinal original (ACV-A1); (b) Sinal mais ruído de 2%; (c.1) Sinal filtrado ( $N_j = 6$  e  $Gr = 1$ ); (c.2) Sinal Filtrado ( $N_j = 6$  e  $Gr = 2$ ); (c.3) Sinal filtrado ( $N_j = 6$  e  $Gr = 5$ ); Sinal filtrado ( $N_j = 6$  e  $Gr = 6$ ).

Assim como no filtro de médias, foi realizada a mesma metodologia de análise quantitativa para o filtro SG, mediante o cálculo do erro médio (RMSE). Estes dados podem ser vistos na Tabela 10.

Tabela 10 - Erros médios (RMSE) do filtro Savitzky-Golay.

Dados comparados		Grau do polinômio do Filtro Savitzky-Golay ( $Gr$ )	Erro médio (RMSE)
Sinal Original	Sinal filtrado	1	8,51
Sinal Original	Sinal filtrado	2	5,76
Sinal Original	Sinal filtrado	5	10,67
Sinal Original	Sinal filtrado	6	12,59
Sinal Original	Sinal com ruído em 2%	Sem filtro	19,90

Conforme a Tabela 10, verificou-se que filtro Savitzky-Golay com a configuração  $N_f = 6$  e  $Gr = 2$  e o mais adequado para ser usado nos experimentos práticos pois, apresentou o menor RMSE.

#### 4.3.1.3. Remoção do *Offset*

A norma [3] descreve no item 3.9 que o valor RMS seja referente apenas à componente alternada (CA) da tensão de ensaio. Segundo [33], o valor RMS verdadeiro, ou seja, o valor *True* RMS de um sinal de tensão é definido como

$$V_{True\_rms} = \sqrt{V_m^2 + V_{rms(CA)}^2}, \quad (45)$$

onde

- $V_m$  = Tensão média.
- $V_{rms(CA)}$  = Tensão RMS da componente CA.

Então, verificou-se que em alguns métodos selecionados haveria a necessidade de anular a componente contínua do sinal de entrada de tensão, já que estes métodos estimam o valor *True* RMS e não apenas o valor RMS da componente alternada.

#### 4.3.2. Processamento de dados

Ao se analisarem os parâmetros dos ensaios em ATCC e ATCA abordados nas seções 2.1 e 3.1, respectivamente, verificou-se que todos estes parâmetros dependiam exclusivamente das mesmas variáveis descritas a seguir:

- Valor RMS da componente CA do sinal de tensão;
- *Offset*, ou valor médio do sinal de tensão; e
- Valores extremos, valor máximo e valor mínimo da tensão de ensaio.

A Figura 51 mostra um sinal de tensão genérico, no qual é possível visualizar as duas últimas variáveis indicadas acima.

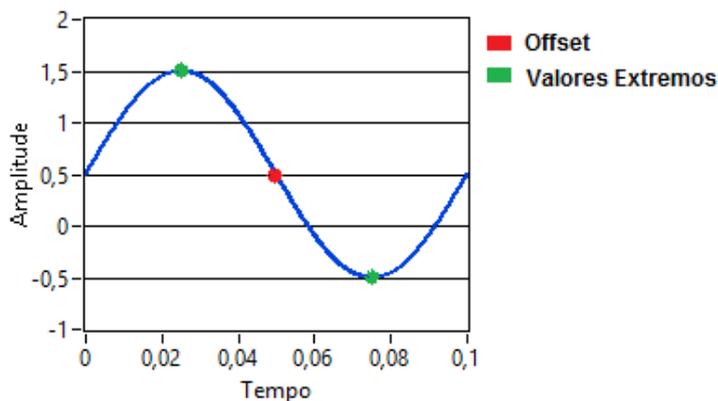


Figura 51 - Sinal genérico de tensão.

Tendo em vista as variáveis necessárias para o cálculo dos parâmetros dos ensaios, selecionaram-se 16 subVIs, com o objetivo de avaliar quais apresentavam o melhor desempenho, para assim compor o algoritmo de medição. Dentre as subVIs selecionadas, 5 foram desenvolvidas pelo autor desta dissertação: “Cálculo”, “Medi. FFT”, “Coeficientes de Fourier”, “AC & DC Estimator modif” e “Série de Fourier”. As demais podem ser encontradas na biblioteca de funções do painel de controle do LabVIEW.

Tabela 11 - VIs selecionadas para desenvolvimento do algoritmo e parâmetros estimados por cada VI.

VIs	Parâmetros							
	Tensão de ensaio	Tensão RMS	Tensão média	THD	Vmax e Vmin	Fator de Ripple	Amp ripple	Frequência
Amplitude And L.		X	X					
Statistics		X	X					
Cycle Average And RMS		X	X					
Basic Average DC-RMS		X	X					
RMS		X	X					
AC & DC Estimator		X	X					
AC & DC Estimator modif.		X	X					
Cálculo		X	X					
Average DC-RMS		X	X					
Harmonic Dist. Anal.		X	X	X		1X		X
Medi. FFT		X	X	X		1X		X
Coeficientes de Fourier		X	X	X		1X		X
Amplitude and Levels	X				X	X	X	
Wavef. Peak Detection	X				X	X	X	
Peak Detector	X				X	X	X	
Série de Fourier	X				X	X	X	

Na Tabela 11, 1X indica a medição do ripple não normalizado, a partir do valor RMS da componente alternada da tensão contínua de ensaio.

As VIs apresentadas na Tabela 11 foram divididas em 3 grupos, conforme os parâmetros que fossem capazes de estimar:

- Grupo 1, VIs utilizados para estimar o valor RMS
  - Amplitude And L.
  - Statistics
  - Cycle Average And RMS
  - Basic Average DC-RMS
  - RMS
  - AC & DC Estimator
  - AC & DC Estimator modif.
  - Cálculo
  - Average DC-RMS
  - Harmonic Dist. Anal.
  - Medi. FFT
  - Coeficientes de Fourier
  
- Grupo 2, VIs utilizadas para estimar o *offset*
  - Basic Average DC-RMS
  - Average DC-RMS
  - AC & DC Estimator
  - AC & DC Estimator modif.
  - Harmonic Dist. Anal.
  - Medi. FFT
  - Coeficientes de Fourier
  
- Grupo 3, VIs utilizadas para estimar os valores extremos
  - Amplitude and Levels
  - Wavef. Peak Detection
  - Peak Detector
  - Série de Fourier

As VIs desenvolvidas tiveram como base os conceitos de séries de Fourier e transformada rápida de Fourier (FFT) pois, segundo [28], são estes os métodos mais eficazes. O método numérico de Newton-Raphson [35], em conjunto com o teorema dos valores extremos de uma função [36], também foi utilizado para determinar os valores extremos, conforme descrito em [34].

A seguir, descrevem-se as subVIs utilizadas para estimar as variáveis correspondentes.

- **“Amplitude And L.”, “Statistics”, “RMS” e “Calculo”**

Estas VIs estimam o valor RMS e o valor médio. Porém, todas possuem a mesma metodologia, pois para determinar estes valores utilizam diretamente as seguintes equações:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n X_i^2} \text{ e} \quad (46)$$

$$V_m = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n X_i \text{ ,} \quad (47)$$

onde  $X_i$  são os dados da tensão de ensaio.

Porém, somente após os ensaios experimentais foi confirmado que a metodologia utilizada em cada VI é igual.

- **“Cycle Average And RMS”**

O VI “Cycle Average and RMS VI” (Figura 52), por meio das equações (46) e (47), calcula o valor RMS e o valor médio, respectivamente, em cada ciclo da forma de onda primeiramente, sendo este VI obrigatoriamente usado para sinais periódicos. Após estimar estes valores por ciclo, é calculada a média destes valores, e assim são estimados o valor RMS e o valor médio de toda a forma de onda.

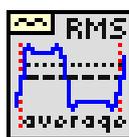


Figura 52 - VI “Cycle Average and RMS”.

- **“Basic Average DC-RMS”**

O VI “Basic Average DC-RMS” (Figura 53) estima o valor RMS e o valor médio, porém é aplicado um janelamento de Hanning [37] nos dados de entrada, que se encontram no domínio do tempo. Assim, após o janelamento a VI realiza o cálculo do valor RMS e do valor médio conforme as equações (46) e (47), respectivamente.



Figura 53 - VI “Basic Average DC-RMS”.

- **“Average DC-RMS”**

O VI “Average DC-RMS” (Figura 54) apresenta uma metodologia de processamento para estimativa do valor RMS e do valor médio semelhante ao VI “Basic Average DC-RMS”, entretanto, os dados de entrada são duplicados e separados, sendo então aplicado a cada conjunto de dados um janelamento distinto. No conjunto de dados em que será efetuado o cálculo do valor RMS é aplicado um janelamento de Hanning e no conjunto de dados onde será efetuado o cálculo do valor médio é aplicado um janelamento de *Low side lobe* [37]. Após o janelamento, o cálculo dos parâmetros é realizado conforme as equações (46) e (47).



Figura 54 - VI “Average DC-RMS”.

- **“AC & DC Estimator”**

O VI “AC & DC Estimator” (Figura 55) também estima o valor RMS e o valor médio. O valor médio é obtido após ser aplicado um janelamento de Hanning [37] nos dados de entrada, e na sequência os dados resultantes são submetidos à equação (48), obtendo-se o valor médio.



Figura 55 - VI "AC & DC Estimator".

$$V_m = \frac{1}{0,5 \times n} \sum_{i=0}^n G_i, \quad (48)$$

onde  $G_i$  são os dados da tensão de ensaio após serem submetidos ao janelamento de Hanning.

Entretanto, este VI possui uma particularidade quanto ao valor RMS, pois para seu cálculo, o valor médio, ou seja, a componente CC, é subtraído de todo o sinal de entrada. Assim, sem a componente CC, é aplicado o janelamento de Hanning ao sinal resultante, sendo então o valor RMS obtido ao se processarem os dados pela equação (49). O valor 0,375 encontrado na equação é resultante do produto do ganho (cg) pela constante da largura de banda (enbw) do janelamento de Hanning, como mostrado no diagrama em blocos da Figura 56.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{0,375} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(X_i - \mu)^2}{n}} \quad (49)$$

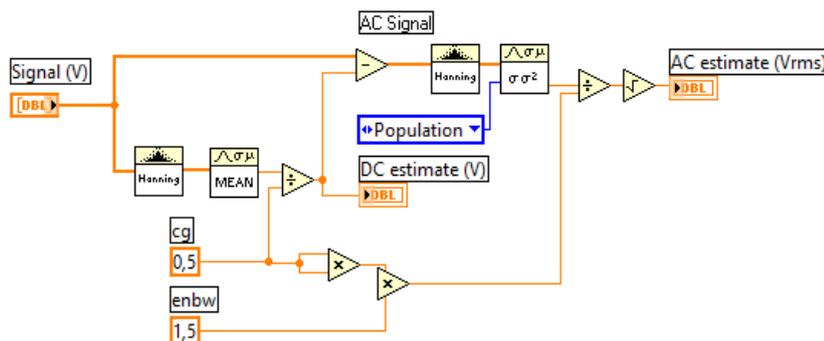


Figura 56 - Diagrama de blocos do VI "AC & DC Estimator".

- **"Harmonic Distortion Analyzer"**

O VI "Harmonic Distortion Analyzer" (Figura 57) realiza uma análise harmônica completa. Ele estima a frequência fundamental, assim como é capaz de

decompor o sinal de entrada no domínio da frequência e assim estimar a amplitude correspondente das componentes harmônicas da frequência fundamental, possibilitando assim o cálculo da THD, do valor RMS e também do valor médio.



Figura 57 - VI “Harmonic Distortion Analyzer”.

Para obter o valor médio, é selecionado o valor da componente de frequência nula, conforme a equação (50). O valor RMS é resultante da raiz quadrada do somatório quadrático do quociente das componentes harmônicas por  $\sqrt{2}$ , segundo a equação (51).

$$V_m = \text{Comp.harmo}_0 \quad (50)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^{20} \frac{\text{Comp.harmo}_i^2}{\sqrt{2}}} \quad (51)$$

Conforme a equação 5.8, o valor RMS foi estimado utilizando até a 20ª componente harmônica da frequência fundamental.

- **“AC & DC Estimator modificado”**

O VI “AC & DC Estimator modificado” (Figuras 58 e 59) foi desenvolvido pelo autor desta dissertação, sendo semelhante ao VI “AC & DC Estimator”, entretanto, ao invés de utilizar a equação 4.4 para obter o valor médio do sinal, é utilizado o método anterior, do VI “Harmonic Distortion Analyzer”, para obter o valor médio.



Figura 58 - VI “AC & DC Estimator modificado”.

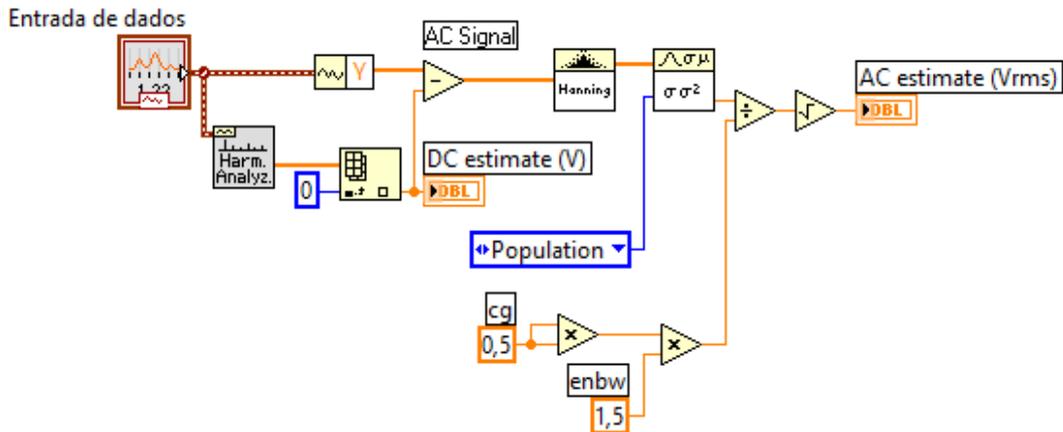


Figura 59 - Diagrama de blocos do VI “AC & DC Estimator modificado”.

- “Medi. FFT”

O VI “Medi. FFT” (Figuras 60 e 61) foi desenvolvido pelo autor desta dissertação e possui a capacidade de estimar o valor RMS, o valor médio e as componentes de tensão no domínio da frequência. Seu desenvolvimento foi baseado em [34], utilizando a transformada rápida de Fourier (FFT) como ferramenta principal.



Figura 60 - VI “Medi. FFT”.

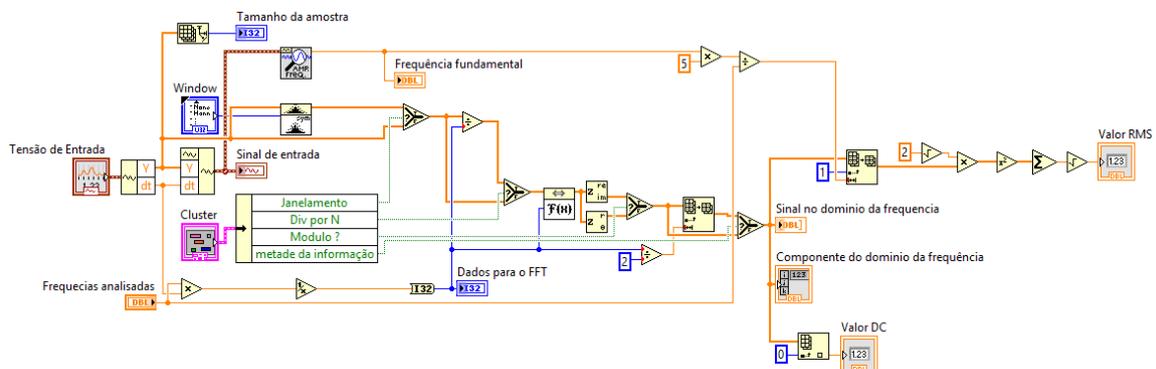


Figura 61 - Diagrama de blocos do VI “Medi. FFT”.

Uma FFT é um algoritmo que realiza os cálculos dos coeficientes da Transformada Discreta de Fourier (DFT) com uma menor exigência computacional, sendo este algoritmo aplicável apenas a sinais discretos no domínio do tempo  $x[n]$ , havendo um total de  $N$  amostras disponíveis. Um sinal discreto, quando submetido a uma FFT, é decomposto em uma soma ponderada de exponenciais complexas dada por

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\omega_0 kn}, \quad k = 0 \dots N-1. \quad (52)$$

Os valores encontrados nas exponenciais complexas correspondem ao sinal  $x[n]$  decomposto no domínio da frequência gerando o sinal  $X[k]$ , que também teria  $N$  amostras, mas devido às propriedades de simetria da DFT, precisa ser calculado somente até

$$k = \left(\frac{N}{2}\right) + 1. \quad (53)$$

Logo, o número de amostras do sinal de entrada  $x[n]$  é de fundamental importância, pois além de definir quantas amostras terá o sinal no domínio da frequência, esta variável, juntamente com o intervalo de amostragem  $\Delta t$ , determina em quais valores de frequência  $\Delta f$  estarão as exponenciais complexas, conforme a equação

$$\Delta f = 1/(\Delta t \times N). \quad (54)$$

Para o cálculo do valor RMS e do valor médio, determinou-se que o sinal de entrada fosse decomposto considerando  $\Delta f = 10$  Hz. Depois de obtido o sinal no domínio da frequência, utilizaram-se somente os 31 primeiros números complexos, permitindo estimar os parâmetros propostos considerando os valores no domínio da frequência até 300 Hz, correspondendo a uma análise até a 5ª componente harmônica da frequência fundamental. Assim, depois de obtida a magnitude (Mag) dos 31 primeiros números complexos, o valor RMS e o valor médio foram estimados por meio de

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{k=1}^{30} \left( \frac{Mag[k] \cdot \sqrt{2}}{N} \right)^2} \quad e \quad (55)$$

$$V_m = \frac{Mag[0]}{N} \quad (56)$$

- “Coeficientes de Fourier”

Assim como o VI “Medi FFT”, o VI “Coeficientes de Fourier” (Figuras 62 e 63) foi desenvolvido pelo autor. Neste método supõe-se que o sinal de entrada a ser analisado seja periódico, o que permite ao sinal ser representado por séries de senoides e cossenoides com frequências múltiplas da frequência fundamental, ou seja, por meio de uma série de Fourier (ao invés de uma Transformada), ou seja,

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{N-1} [a_k \cdot \cos(\varpi_0 kt) + jb_k \cdot \sin(\varpi_0 kt)] \quad (57)$$

onde os coeficientes  $a_k$  e  $b_k$  representam as amplitudes dos senoides e cossenoides e são calculados segundo as equações

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad e \quad (58)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega_0 t) dt. \quad (59)$$

Como os dados de entrada são dados discretos, os coeficientes são obtidos por integração numérica, mas estes coeficientes também podem ser obtidos por meio de uma DFT (5.9), pois a relação entre as exponenciais complexas fornecidas pela FFT e os coeficientes de Fourier é

$$a_k = \frac{2}{N} \operatorname{Re}\{X[k]\} \quad e \quad (60)$$

$$b_k = -\frac{2}{N} \operatorname{Im}\{X[k]\}, \quad (61)$$

segundo [34]. Para obter estes coeficientes, o sinal de entrada é decomposto por uma FFT considerando  $\Delta f$  igual à frequência fundamental.

Os sinais de tensão nos ensaios em ATCC e ATCA, embora sofram distorções, podem ser consideradas funções ímpares, o que permite desconsiderar os coeficientes  $a_k$ . Logo, para o cálculo do valor RMS foram utilizados apenas os 10 primeiros valores dos coeficientes  $b_k$ , enquanto que, para o cálculo do valor médio, foi utilizado apenas o primeiro valor do coeficiente  $a_k$ . Neste método, assim como no VI “Cycle Average and RMS”, os parâmetros são estimados em cada ciclo da tensão e então a média destes valores corresponde ao valor estimado de todo o sinal, conforme

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{k=1}^{10} (b_k \times \sqrt{2})^2} \quad (62)$$

$$V_m = \frac{a_0}{2}. \quad (63)$$

AC & DC  
COEF.  
FOURIER  
CICLO

Figura 62 - VI “Coeficientes de Fourier”.

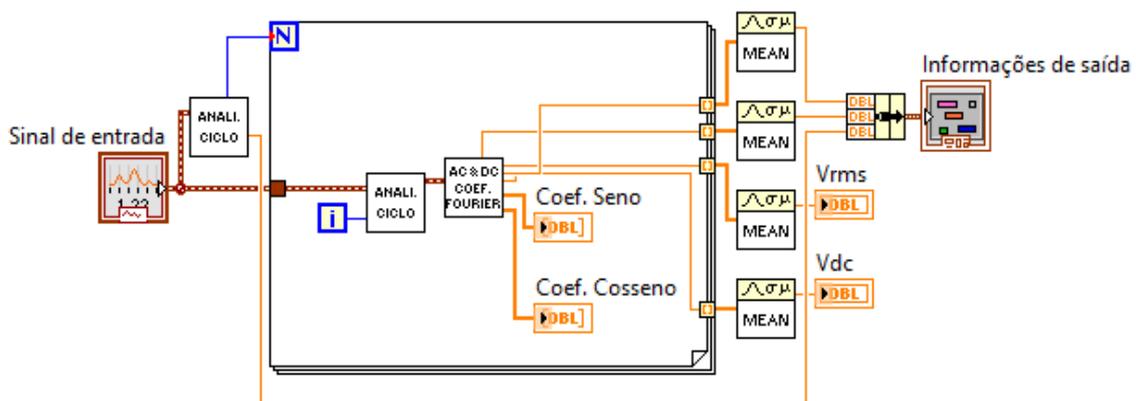


Figura 63 - Diagrama de blocos do VI “Coeficientes de Fourier”.

- “Série de Fourier”

Este VI (Figuras 64 e 65) foi desenvolvido pelo autor desta dissertação com o objetivo de estimar os valores extremos do sinal de tensão, utilizando o teorema

dos valores extremos de uma função [36] juntamente com o algoritmo de Newton-Raphson [35] para determinar a raiz da derivada da função que descreve o sinal medido, estimando assim os valores extremos. Porém, para o uso deste método no LabVIEW, foi necessário inicialmente determinar a equação que rege o sinal medido. Para tal, utilizou-se a equação da série de Fourier (57) considerando até o 10º harmônico, sendo os coeficientes  $a_k$  e  $b_k$  obtidos por meio do VI “Coeficientes de Fourier”.

Assim, após determinada a equação, o algoritmo de Newton-Raphson encontra a raiz da derivada da série de Fourier com uma exatidão de  $1 \times 10^{-8}$ , aplicando assim o teorema dos valores extremos. Dentre os pontos encontrados são analisados quais correspondem os valores de pico positivo e negativo, permitindo assim o cálculo do valor da tensão de ensaio.

Devido ao fato de utilizar uma serie de Fourier considerando somente até o 10º harmônico, o sinal é analisado apenas em baixas frequências, não sendo influenciado por ruídos de alta frequência.



Figura 64 - VI “Série de Fourier”.

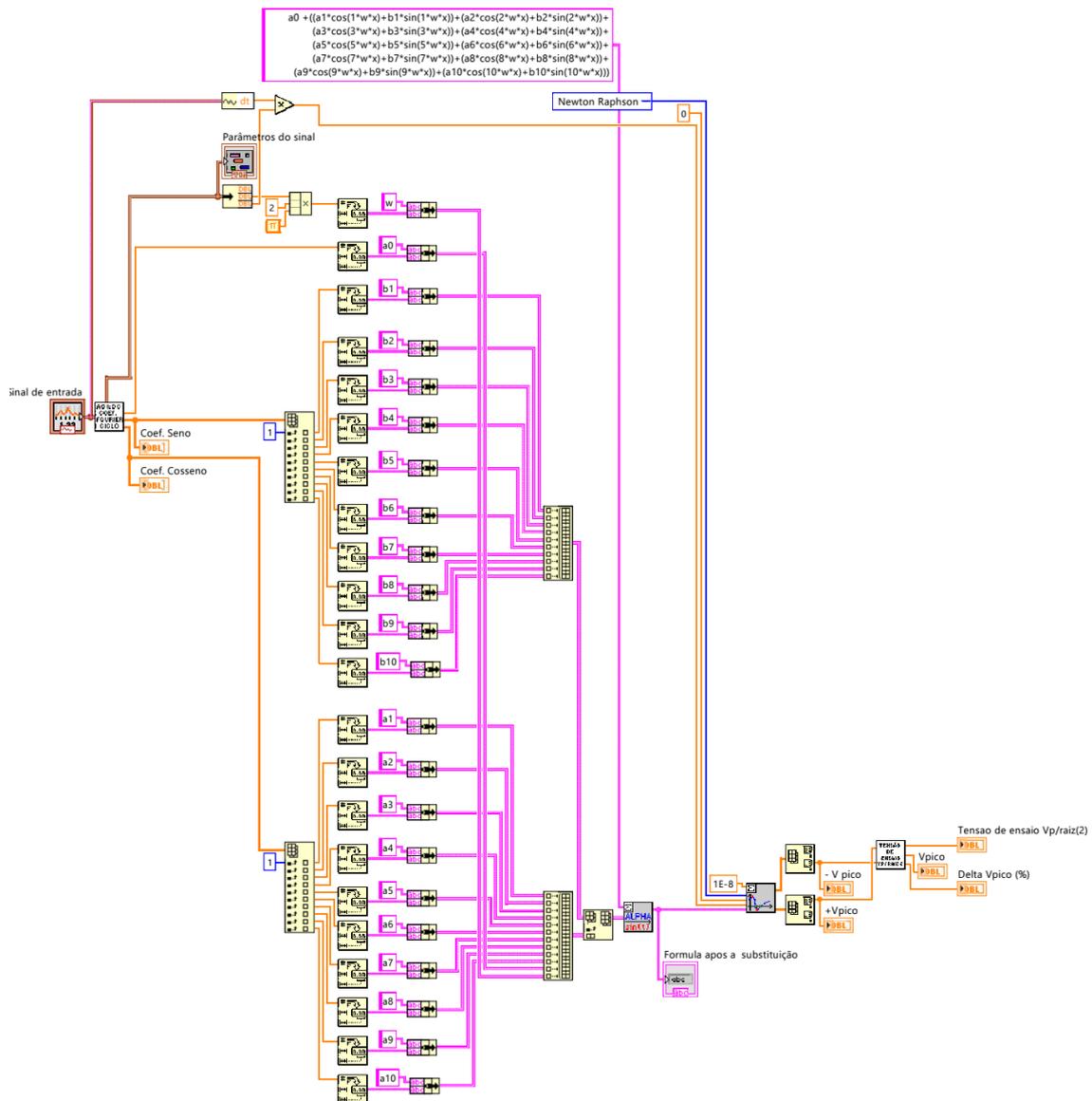


Figura 65 - Diagrama de blocos do VI “Série de Fourier”.

### • “Amplitude and Levels”

O VI “Amplitude and Levels” (Figura 66) possui a capacidade de indicar o maior e o menor valor do sinal de tensão adquirido. Porém, os ruídos têm grande influência na estimativa dos valores de pico, pois este método procura sempre os valores extremos dentro do vetor de dados, não distinguindo o que é o sinal da tensão de ensaio do ruído presente no mesmo.

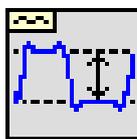


Figura 66 - VI “Amplitude and Levels”.

- **“Waveform Peak Detection”**

Este VI “Waveform Peak Detection” (Figura 67) é usado para estimar os valores extremos de um sinal. Ele utiliza um algoritmo que ajusta um polinômio quadrático a uma sequência do conjunto de dados e, por meio do teorema do valor máximo, determina as derivadas nulas e, assim, os valores extremos do sinal.

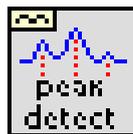


Figura 67 - VI “Waveform Peak Detection”.

Em sua configuração, foi utilizado um conjunto de dados com 3 pontos (default) e como ponto de limiar foi utilizado o valor médio do sinal.

- **“Peak Detector”**

O VI “Peak Detector” (Figura 68) possui o mesmo algoritmo que o VI “Waveform Peak Detection”, porém suas configurações foram distintas, pois utilizou-se um conjunto de dados com 6 pontos ao invés do valor *default* de 3 pontos.

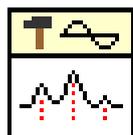


Figura 68 - VI “Peak Detector”.

### 4.3.3. Experimentos para escolha das Vis

Como dito anteriormente, o algoritmo foi desenvolvido de forma comparativa e experimental, pois foram selecionados alguns métodos capazes de estimar os parâmetros necessários, e então todos estes métodos foram submetidos a experimentos práticos para determinar quais possuíam as melhores condições de estabilidade e o menor erro. Foram realizados os seguintes experimentos: ensaio

com TDG, ensaio em baixa tensão e ensaio em alta tensão (ilustrados na Figura 69).

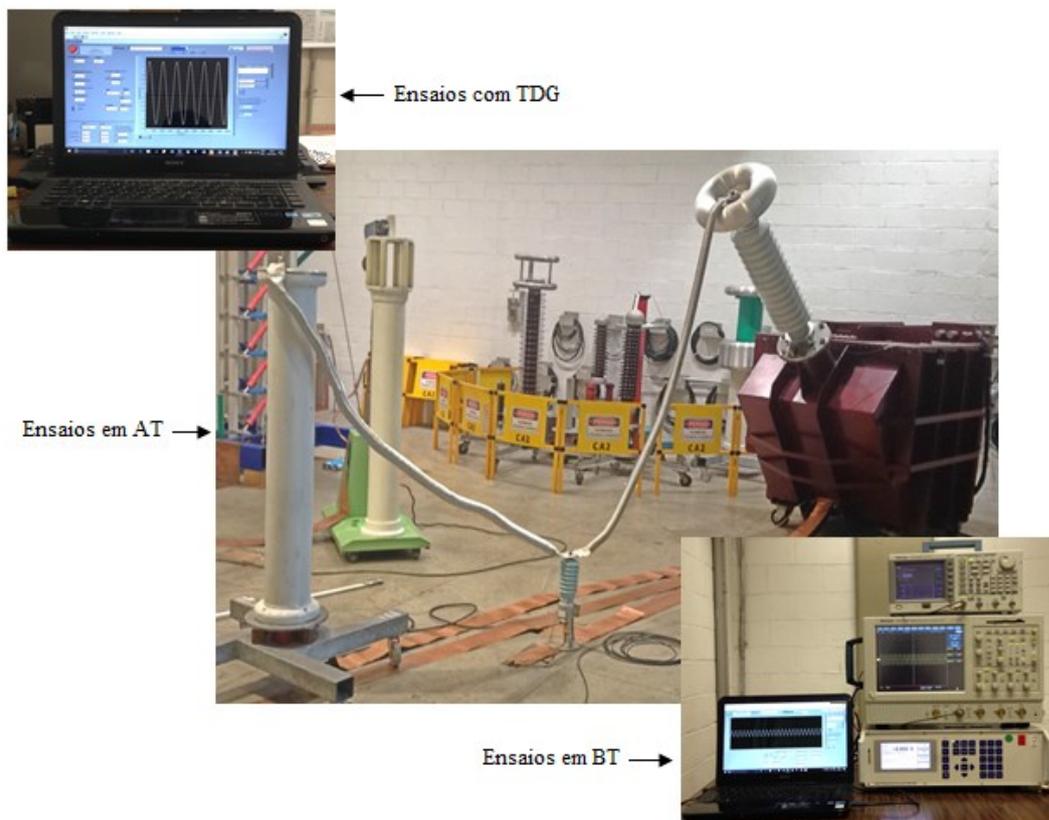


Figura 69 - Experimentos do desenvolvimento do algoritmo.

Nos ensaios com TDG, todos os métodos foram testados e, assim, os subVIs que apresentaram os menores erros nos ensaios com TDG foram separados e testados nos ensaios de baixa tensão.

Ao analisar o comportamento dos subVIs nos ensaios de baixa tensão, considerando sua estabilidade e o erro de medição em todas as situações avaliadas, foi selecionado o subVI que obteve uma estabilidade e um erro de medição coerente com os resultados apresentados anteriormente nos ensaios com TDG. Estes subVIs então foram escolhidos para compor a rotina de processamento do algoritmo de medição, juntamente com os elementos de pré-processamento que apresentaram o melhor comportamento.

Assim, após os experimentos em baixa tensão, foi realizado o ensaio em alta tensão com o algoritmo de medição finalizado e anexado a um sistema de medição, com o intuito de analisar sua robustez.

Logo, os ensaios experimentais de alta e baixa tensão foram de fundamental importância para o desenvolvimento do todo o algoritmo e também para a sua validação, pois permitiram verificar as influências da aquisição e digitalização por meio do osciloscópio, além de avaliar o valor da taxa de amostragem e a resolução vertical mais adequada para que se tenha uma estimativa mais precisa e exata dos parâmetros relevantes. Todos os ensaios foram realizados em tensão contínua e alternada e estão detalhados no próximo capítulo.

## 5 Ensaaios experimentais

Neste capítulo serão descritos os procedimentos dos ensaios e análises realizadas, assim como a metodologia e os conceitos abordados para a inclusão de ruído nos sinais de referência da norma [3].

A finalidade destes experimentos foi avaliar os VIs que processam os dados digitais e estimam os parâmetros, para que, então, possam ser selecionados os que apresentam os menores erros. Assim, os VIs que apresentarem os melhores resultados nos experimentos propostos serão selecionados para compor o algoritmo de medição.

Os experimentos foram divididos em 3 etapas, sendo que cada experimento teve uma finalidade própria, para a seleção dos VIs adequados e configuração de outros fatores do algoritmo, tais como pré-processamento, aquisição de dados e controle do registrador digital (osciloscópio), a saber:

- Primeira etapa: Experimento com TDG, onde foi comparado os valores de referência da norma [3] com os parâmetros estimados pelos VIs, como resultado do processamento dos dados digitais do TDG. Este experimento tem o objetivo de analisar e selecionar os VIs que apresentam os menores erros.
- Segunda etapa: Experimento em baixa tensão (BT), com auxílio do gerador de função *Tektronix* AFG 3022B, utilizado como fonte, e um voltímetro de crista *Haefely* DMI551 como instrumento de medição de referência. Este experimento teve como objetivo analisar os VIs que apresentaram os menores erros no experimento com o TDG, e verificar quais têm o melhor comportamento ao processar dados digitalizados, para que de fato possam compor o algoritmo de medição.
- Terceira etapa: Experimento em alta tensão (AT), cujo objetivo é avaliar o comportamento do algoritmo como um todo, nas condições reais de uso no laboratório de alta tensão. Foi realizado o ensaio de

determinação do fator de escala em alta tensão com o SM, composto por um divisor resistivo de alta impedância (Figura 102) e pelo algoritmo desenvolvido neste trabalho.

Assim, ao final dos experimentos o algoritmo desenvolvido estará validado conforme a norma [3] e terá como avaliação da sua robustez os experimentos em baixa e alta tensão.

### 5.1. Ensaio com TDG

Nestes ensaios foram processados os dados das formas de onda padronizadas fornecidas pelo TDG [3], indicados nas Tabelas 7 e 8. Porém, como a finalidade deste gerador de dados é simular a digitalização de dados, foi necessário adicionar ruídos com característica gaussiana para representar/simular os ruídos intrínsecos nos registradores de dados, devido a interferência eletromagnética existente e ao processo de digitalização do sinal.

Entretanto, pelo fato da norma [3] se tratar de um rascunho, a mesma ainda não possui todos os valores de referência de suas formas de onda, como o fator de crista e a amplitude de *ripple*, além de não apresentar os valores dos limites de aceitação dos parâmetros de referência. Portanto, as comparações nestes ensaios foram realizadas conforme os valores de referência indicados em uma publicação prévia da IEC, e os demais parâmetros foram avaliados no experimento de baixa tensão.

Assim, com o auxílio das formas de onda padronizadas do TDG, foram realizadas duas avaliações:

- Avaliação dos parâmetros de ensaio ATCA:
  - Valor RMS
  - Valor da tensão de ensaio
- Avaliação dos parâmetros de ensaio ATCC:
  - Valor Médio
  - Fator de *Ripple*

Todas estas avaliações foram realizadas variando a porcentagem de ruído somado às formas de onda do TDG, entre 0 a 10 %, conforme descrito na seção a seguir, com o objetivo de avaliar a estabilidade dos Vis.

### 5.1.1. Ruído Adicionado

O ruído adicionado às formas de onda padronizadas tem como finalidade simular os ruídos internos do registrador de dados (ruído branco) inerentes à aquisição e digitalização do sinal, entre outros fatores.

Este ruído, por se tratar de um sinal aleatório, foi modelado como uma distribuição gaussiana  $N(0,1)$ , ou seja, uma distribuição com média zero e com variância e desvio padrão iguais a 1. Sua função densidade de probabilidade é escrita conforme a equação (64). A Figura 70 mostra a curva de distribuição.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]} \quad (64)$$

onde:

- $\mu$  = Média
- $\sigma$  = Desvio padrão

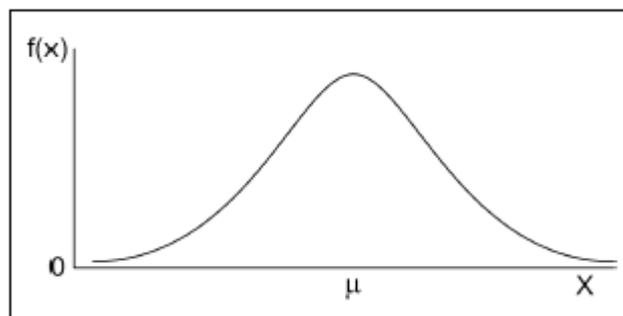


Figura 70 - Função densidade de probabilidade de uma distribuição normal.

Para realizar os experimentos foi necessário variar a porcentagem do ruído adicionado às formas de onda padronizadas. Segundo a norma [38], a porcentagem do ruído adicionado deverá ser igual à porcentagem do valor RMS do ruído gerado em relação ao valor RMS do sinal original. Ou seja, para um sinal

com 1 kV de valor RMS com 1% de ruído, seria necessário gerar um ruído com valor RMS igual a 10 V. O valor RMS de uma distribuição gaussiana é dado por

$$\text{Valor rms} = \sqrt{\mu^2 + \sigma^2} \quad (65)$$

Logo, como mostra a equação (65), o valor RMS do ruído gerado será igual ao desvio padrão do mesmo, já que a média foi considerada nula. Então, para produzir um ruído com desvio padrão  $n$ , foi gerada uma gaussiana padrão  $N(0,1)$ , com desvio padrão unitário, e multiplicados os dados gerados por  $n$ .

Portanto, criou-se o VI “Ruído Branco”, mostrado na Figura 71, com o objetivo de gerar ruídos com mesma quantidade de dados que o sinal original e na porcentagem adequada, conforme solicitado.

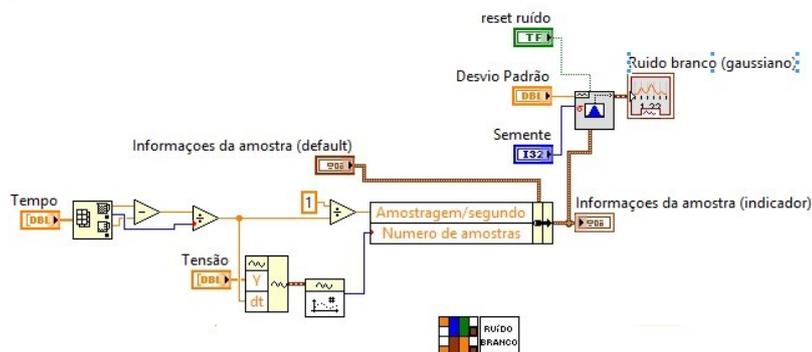
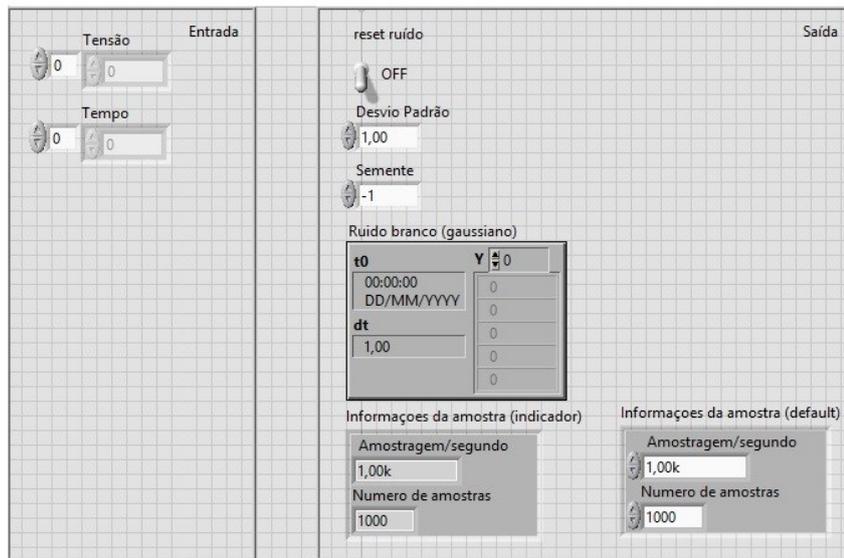


Figura 71 - Vi Ruído Branco.

### 5.1.2. Avaliação dos parâmetros de ensaio em ATCA

Nos ensaios para avaliação dos parâmetros em ATCA foram utilizadas as formas de onda do TDG conforme descrito na Tabela 7. A estes dados foram adicionados os ruídos conforme descrito na seção anterior. Contudo, para considerar a aleatoriedade do ruído gerado, foram gerados 5 conjuntos de dados em cada situação, exceto na condição a 0% de ruído, o que ao final da avaliação representou 51 amostras para cada forma de onda e, portanto, 306 amostras em toda a análise para cada situação testada.

A fim de determinar quais VIs e quais configurações de pré-processamento utilizados obtêm-se o menor erro, os ensaios foram realizados nas seguintes condições:

- VIs do grupo 1: Com Offset e sem Offset
- VIs do grupo 3: Sem Filtro, com filtro de médias e com filtro Savitzky-Golay

Ao todo foram testadas 5 condições diferentes, com potencial de serem implementados vários algoritmos de medição.

#### 5.1.2.1. Algoritmo implementado

A Figura 72 apresenta o algoritmo usado nos ensaios com as formas de onda do TDG. Todos os métodos (VIs) estimaram os parâmetros simultaneamente, possibilitando que estes dados fossem utilizados na comparação com os valores de referência descritos na norma [3].

Os fatores condicionais durante a etapa de pré-processamento possibilitaram a análise e a aquisição dos dados nas 5 condições previstas na seção 5.1.2.

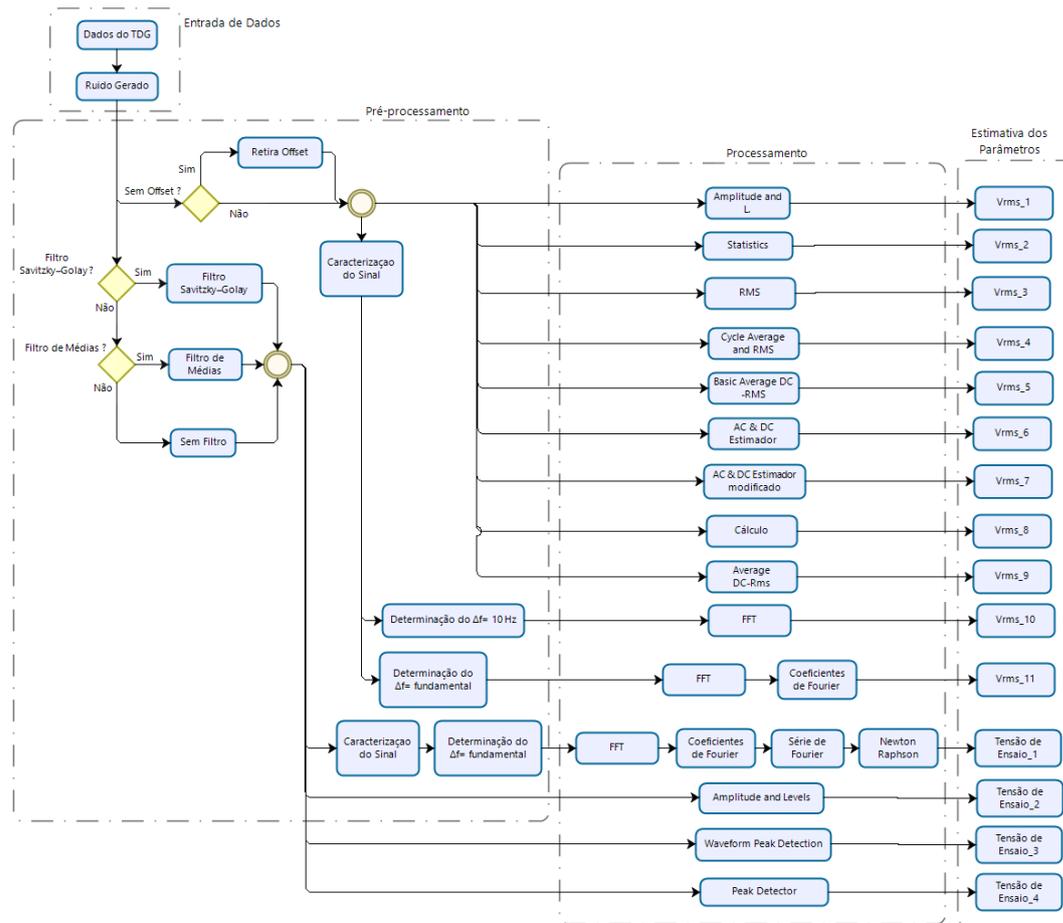


Figura 72 - Algoritmo usado nos ensaios em CA com TDG.

### 5.1.2.2. Análise e Resultados

Os resultados apresentados nas condições previstas foram analisados para determinar quais VIs são mais apropriadas para compor o algoritmo de medição.

A análise foi realizada por comparação entre os resultados estimados e os valores de referência, mediante o cálculo do erro percentual. Entretanto, para obter estes valores foram realizados alguns passos:

- I. Calcular a média dos resultados amostrados nas 5 aplicações, em cada nível de ruído;
- II. Determinar o erro percentual em cada nível de ruído a partir da média calculada anteriormente;
- III. Repetir este processo para todas as formas de onda padronizadas, descritas na Tabela 7; e

IV. Calcular a média dos erros percentuais considerando todas as formas de onda, obtendo assim uma análise geral.

As tabelas e figuras do apêndice A apresentam as análises dos VIs que estimam os parâmetros valor RMS e tensão de ensaio em todas as condições previstas na seção 5.1.2, onde as células marcadas indicam os menores erros.

Após todas as análises realizadas com os dados dos ensaios com TDG, foi possível determinar quais VIs e quais condições de pré-processamento seriam selecionadas para a realização dos ensaios em BT, sendo o critério de escolha dos VIs o menor valor de erro percentual até o nível de 2% de ruído, já que esta é uma condição normalizada para execução dos ensaios em AT. A Tabela 12 e a Figura 73 apresentam os VIs selecionados para os ensaios em baixa tensão, sendo 3 VIs que estimam o valor RMS e 3 que estimam o Valor da tensão de ensaio.

Tabela 12 - Análise de erros percentuais dos VIs selecionados para os ensaios em baixa tensão CA.

		Nível de Ruído (%)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Erro percentual dos VIs	AC & DC Estimator modif.	0,058	0,060	0,063	0,074	0,10	0,13	0,17	0,24	0,31	0,38	0,46
	Medi. FFT	0,058	0,061	0,061	0,073	0,091	0,12	0,17	0,24	0,31	0,39	0,50
	Harmonic Dist. Anal.	0,058	0,061	0,053	0,063	0,056	0,071	0,076	0,079	0,071	0,087	0,13
	Série de Fourier – SF	0,70	0,71	0,71	0,70	0,41	0,62	0,50	0,53	0,41	0,66	0,65
	Série de Fourier – FM	0,70	0,70	0,67	0,72	0,27	0,75	0,14	0,82	0,20	0,34	0,69
	Série de Fourier -SG	0,70	0,70	0,71	0,73	0,75	0,11	0,082	0,45	0,38	0,54	0,60

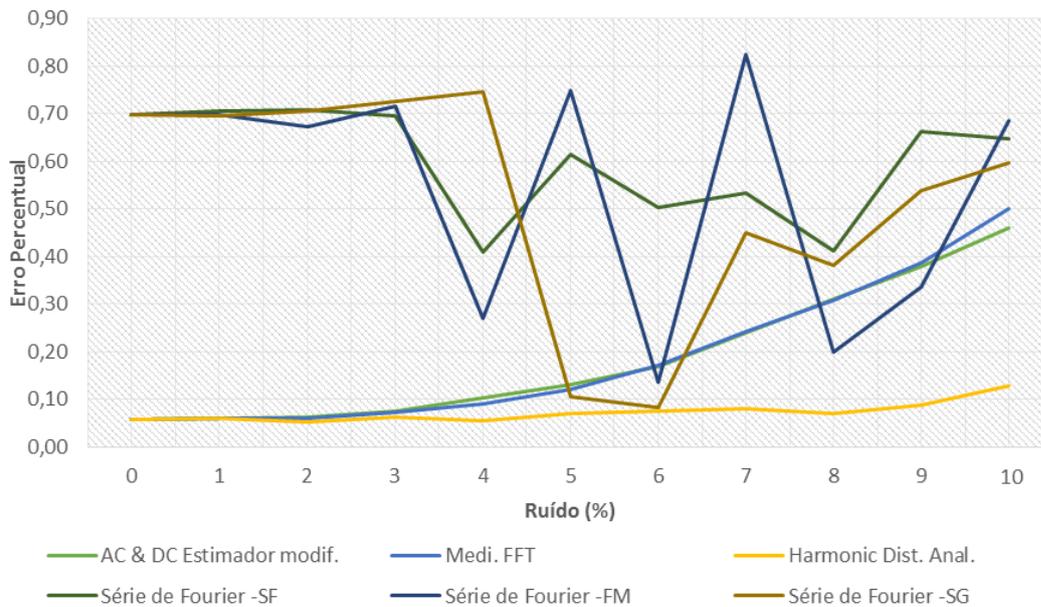


Figura 73 - Gráfico de erros percentuais dos Vis selecionados para os ensaios em baixa tensão.

### 5.1.3. Avaliação dos parâmetros de ensaio em ATCC

Os ensaios realizados para avaliação dos parâmetros de ensaio em ATCC utilizaram as formas de onda do TDG, conforme descrito na Tabela 8. Similarmente aos ensaios para avaliação dos parâmetros de ensaios em ATCA, foram adicionados aos dados do TDG os ruídos e, para considerar sua aleatoriedade, foram amostrados 5 conjuntos de dados em cada situação, exceto na condição a 0% de ruído, o que ao final da avaliação representou 51 amostras para cada forma de onda e, portanto, 102 amostras em toda a análise para cada situação testada.

Para determinar quais VIs e quais configurações de pré-processamento obtêm-se o menor erro de medição, os ensaios foram realizados nas seguintes condições:

- VIs do grupo 2: Sem Filtro, com filtro de médias e com filtro Savitzky-Golay; e
- VIs do grupo 3: Sem Filtro, com filtro de médias e com filtro Savitzky-Golay.

Ao todo foram 3 condições diferentes para serem implementadas no algoritmo de medição.

### 5.1.3.1. Algoritmo Implementado

A Figura 74 apresenta o algoritmo usado nos ensaios com as formas de onda do TDG para avaliação dos parâmetros de ensaios em ATCC, onde todos os métodos (VIs) estimaram os parâmetros simultaneamente, possibilitando que estes dados fossem utilizados na comparação com os valores de referência descritos na norma [3].

Os condicionais durante a etapa de pré-processamento possibilitaram a análise e a aquisição dos dados nas 3 condições previstas na seção 5.1.3.

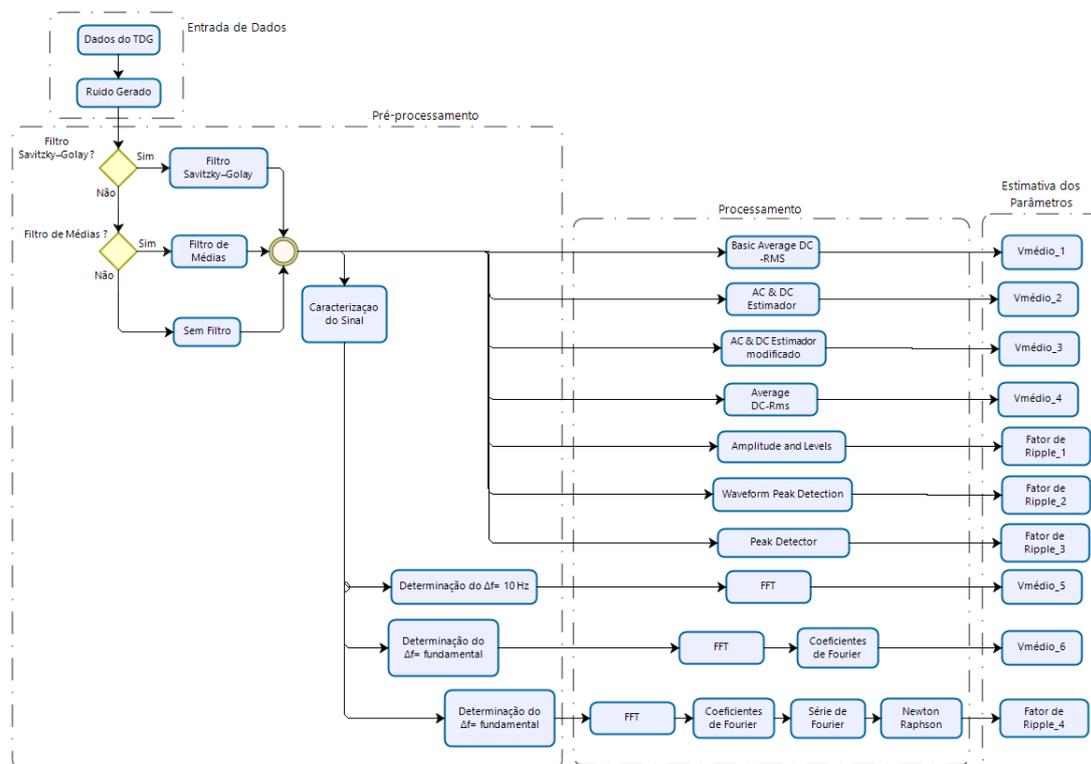


Figura 74 - Algoritmo usado nos ensaios em CC com TDG.

### 5.1.3.2. Análise e resultados

A análise dos resultados apresentados por cada VI foi realizada por meio do erro percentual. Entretanto, para a análise do parâmetro fator de *ripple*, somente foram considerados os dados obtidos a partir do processamento da forma de onda DCV-A2, já que a forma de onda DCV-A1 é um sinal contínuo perfeito e os valores da amplitude de *ripple* estimados seriam correspondentes ao ruído

adicionado. Assim, a análise foi realizada mediante a comparação dos parâmetros estimados pelos VIs com os valores de referência indicados na Tabela 8, correspondentes à norma [3], por meio do cálculo do erro percentual.

Para obter o erro percentual das Vis que estimam o valor médio foram realizados os seguintes passos:

- I. Calcular a média dos resultados amostrados nas 5 aplicações em cada nível de ruído;
- II. Determinar o erro percentual em cada nível de ruído a partir da média calculada anteriormente;
- III. Repetir este processo nos resultados apresentados de cada método e em todas as formas de onda padronizadas da Tabela 8; e
- IV. Calcular a média dos erros percentuais considerando todas as formas de onda, para obter uma análise geral.

Para obter o erro dos VIs que estimam o fator de *ripple* foram realizados os seguintes passos:

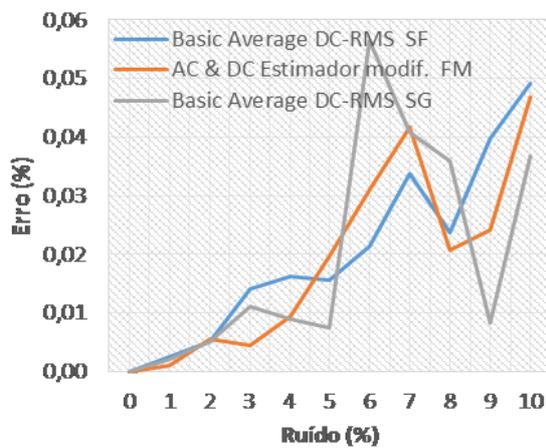
- I. Calcular a média dos resultados amostrados nas 5 aplicações em cada nível de ruído para a forma de onda DCV-A2; e
- II. Determinar o erro percentual em cada nível de ruído a partir da média calculada anteriormente.

As tabelas e figuras do apêndice A apresentam as análises dos VIs que estimam os parâmetros do valor médio e o fator de *ripple* em todas as condições previstas na seção 5.1.3.

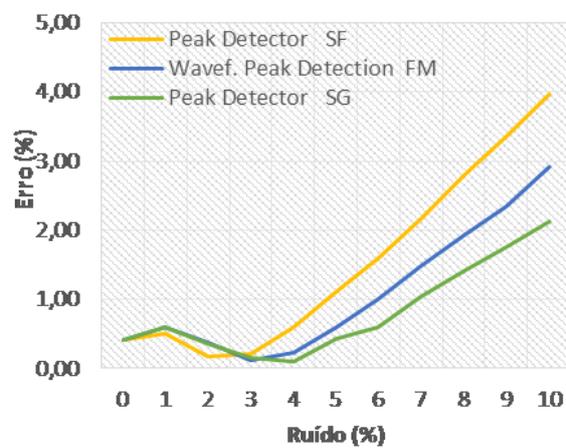
Após todas as análises foi possível determinar quais VIs e condições de pré-processamento obtiveram os menores erros de medição. A Tabela 13 e a Figura 75 apresentam os VIs selecionados para os ensaios em baixa tensão.

Tabela 13 - Análise de erros das Vis selecionadas para os ensaios em baixa tensão CC.

		Nível de Ruído (%)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Erro percentual dos VIs	Basic Average DC-RMS - SF	0,00	0,0026	0,0052	0,014	0,016	0,016	0,022	0,034	0,024	0,040	0,049
	AC & DC Estimator modif. - FM	0,00	0,0010	0,0056	0,0045	0,010	0,020	0,031	0,042	0,021	0,024	0,047
	Basic Average DC-RMS - SG	0,00	0,0022	0,0051	0,011	0,0090	0,0074	0,057	0,041	0,036	0,0084	0,037
	Peak Detector - SF	0,42	0,51	0,17	0,20	0,59	1,11	1,59	2,17	2,78	3,36	3,97
	Wavef. Peak Detection - FM	0,42	0,60	0,37	0,11	0,23	0,60	1,00	1,48	1,92	2,36	2,92
	Peak Detector - SG	0,42	0,59	0,36	0,16	0,11	0,44	0,60	1,04	1,40	1,76	2,13



(a)



(b)

Figura 75 - Gráfico de erros percentuais das VIs selecionadas para os ensaios em baixa tensão (a) VIs para estimativa do valor RMS. (b) VIs para estimativa do valor da tensão de ensaio.

## 5.2. Ensaio em Baixa Tensão (BT)

Os ensaios em baixa tensão têm como finalidade avaliar os VIs que apresentaram os menores erros nos experimentos com TDG descritos na seção 5.1, quando processam dados de entrada que foram submetidos a todo o processo de amostragem e digitalização, para que se possa determinar quais são os métodos mais adequados para compor o algoritmo de medição.

Além de avaliar os VIs de processamento e pré-processamento, os ensaios em BT também permitiram analisar qual a melhor configuração adotada pelo digitalizador, sendo este um osciloscópio com resolução vertical de 8 bits e frequência de amostragem máxima de 4 GHz.

Os ensaios foram realizados com tensões CA e CC, variando-se os parâmetros pertinentes em cada tipo de tensão, sendo que, em cada variação do sinal de tensão, foram obtidas 3 amostras que correspondem às configurações distintas adotadas no osciloscópio.

A fim de se obter o controle dos dados analógicos de entrada, propiciando a variação dos parâmetros do sinal de tensão, um gerador de função *Tektronix AFG 3022B* (Figura 76(a)) foi utilizado, enquanto todo o processo de amostragem e digitalização foi realizado por um osciloscópio *Tektronix TDS 5104B* (Figura 76(b)), com o voltímetro de crista *Haefely DMI551* utilizado como instrumento de referência.

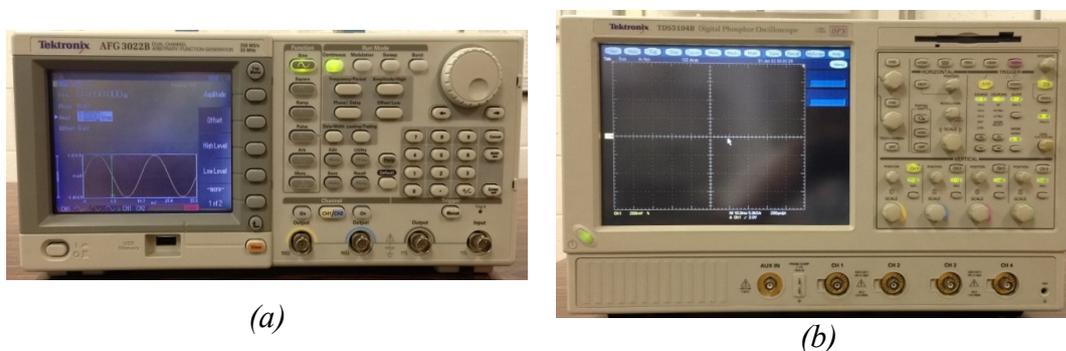


Figura 76 - Instrumentos utilizados no ensaio em baixa tensão. (a) Gerador de função *Tektronix AFG 3022B*. (b) Osciloscópio *Tektronix TDS 5104B*

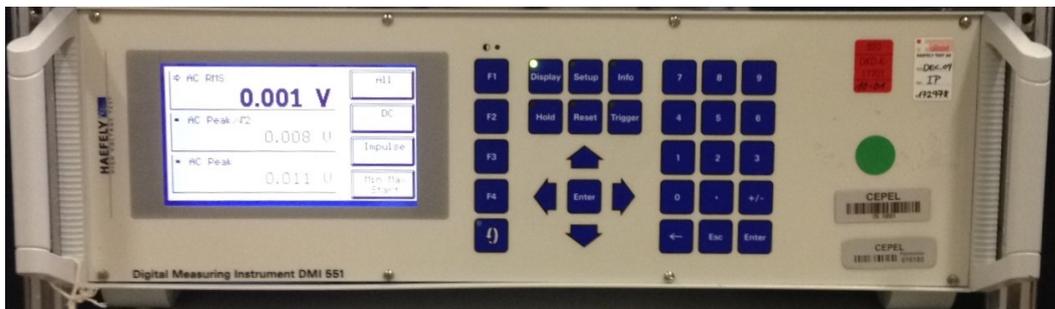


Figura 77 - Voltímetro de Crista *Haefely DMI 551*, usado como instrumento de referência.

As Figuras 78 e 79 mostram o circuito do arranjo utilizado para os ensaios em baixa tensão, respectivamente. Deve-se notar que as impedâncias de entrada de cada instrumento são iguais.

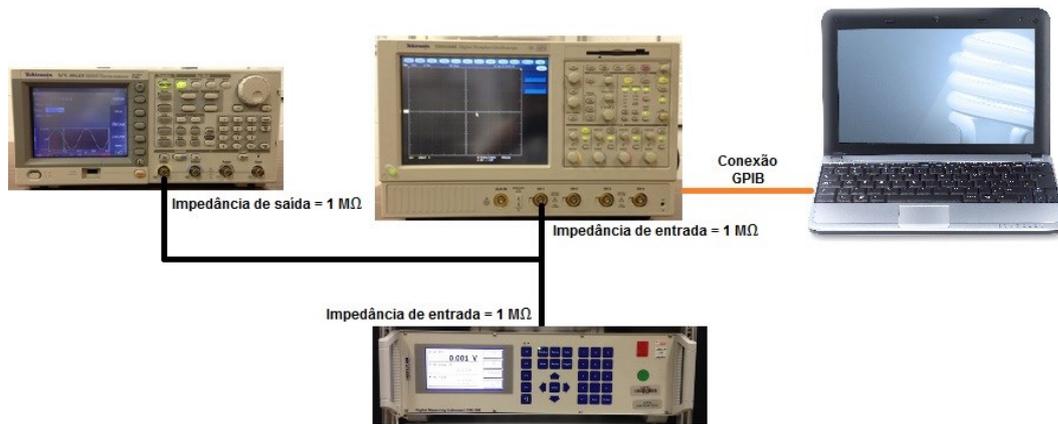


Figura 78 - Circuito dos ensaios em baixa tensão.

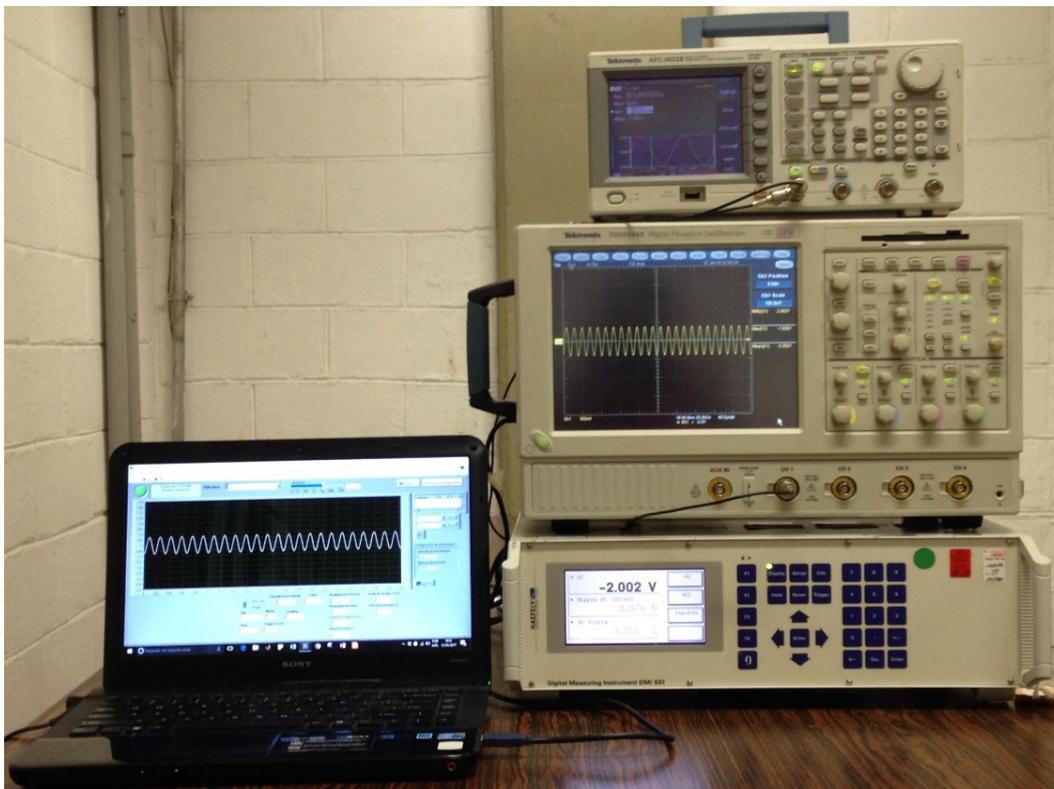


Figura 79 - Arranjo dos ensaios em BT.

### 5.2.1. Ensaio BT em CA

Os ensaios com tensão CA foram realizados variando os níveis de *offset* e frequência em 3 níveis distintos, enquanto os demais parâmetros foram mantidos constantes durante todos os ensaios. Os níveis assumidos pelo *offset* corresponderam ao valor de 0%, 1% e 2% da tensão de pico, enquanto os valores de frequência foram definidos como 45, 50 e 65 Hz. Estes valores foram

selecionados, pois são alguns dos limites aceitáveis para a execução de um ensaio normalizado em alta tensão [1]. Entretanto, os parâmetros Valor RMS e forma de onda se mantiveram constantes, sendo estes 2 V e uma onda senoidal, respectivamente.

Os parâmetros que foram avaliados durante os ensaios correspondem aos parâmetros que o voltímetro de crista DMI 551 é capaz de medir, já que o mesmo é considerado como o instrumento de referência no ensaio em questão. Logo, os parâmetros avaliados foram:

- Valor da tensão de ensaio;
- Valor RMS; e
- Valor de Crista.

Como descrito anteriormente, foram selecionadas 3 configurações distintas no osciloscópio, onde a taxa de amostragem e a base de tempo foram selecionadas de forma a atender à equação 5.11, conforme descrito no VI “Medi FFT”, e de modo a permitir uma análise visual do sinal de tensão. Entretanto, estas configurações têm o objetivo de avaliar o comportamento de todos os métodos (VIs). As configurações selecionadas foram:

1. Primeira Configuração
  - Taxa de amostragem: 25 kHz
  - Base de tempo: 10 ms/divisão
2. Segunda Configuração
  - Taxa de amostragem: 12,5 kHz
  - Base de tempo: 20 ms/divisão
3. Terceira Configuração
  - Taxa de amostragem: 25 kHz
  - Base de tempo: 40 ms/divisão

Algumas configurações como o modo de aquisição em “High Resolution” e o acoplamento “DC” se mantiveram fixas durante todo o ensaio, sendo estes os parâmetros recomendados para a utilização do algoritmo. Este modo de aquisição permite elevar o número de bits da resolução vertical para 10 bits, no caso do

osciloscópio TDS 5104B, sendo este processo realizado mediante interpolações, e, portanto, aplicável apenas em sinais periódicos [39].

### 5.2.1.1. Algoritmo implementado

A Figura 80 mostra o algoritmo utilizado na estimativa dos parâmetros nos ensaios em BT para tensão CA, mostrando também os VIs de processamento e pré-processamento que apresentaram os melhores resultados nos ensaios com TDG.

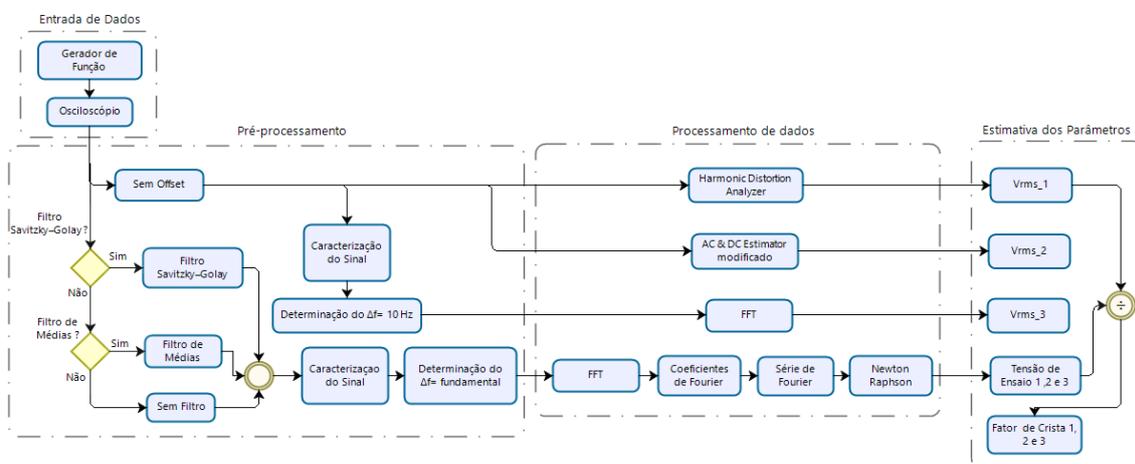


Figura 80 - Algoritmo usado nos ensaios em BT para tensão CA.

### 5.2.1.2. Variando o offset

As Figuras 81, 82 e 83 mostram os resultados obtidos a partir dos ensaios onde se variou o valor do offset, ou seja, o valor da componente contínua do sinal de tensão. Os valores utilizados como offset correspondem a 0%, 1% e 2% do valor de crista da tensão de ensaio, ou seja, 0 V, 24 mV e 38 mV, respectivamente. Os valores apresentados nos gráficos correspondem à média dos erros encontrados nas diferentes configurações do osciloscópio.

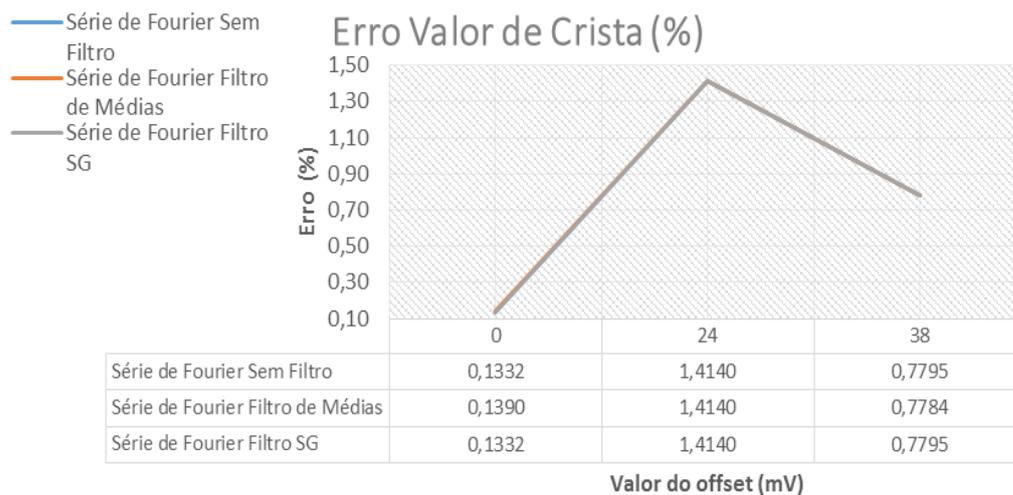


Figura 81 - Gráfico de erros para análise do valor de Crista.

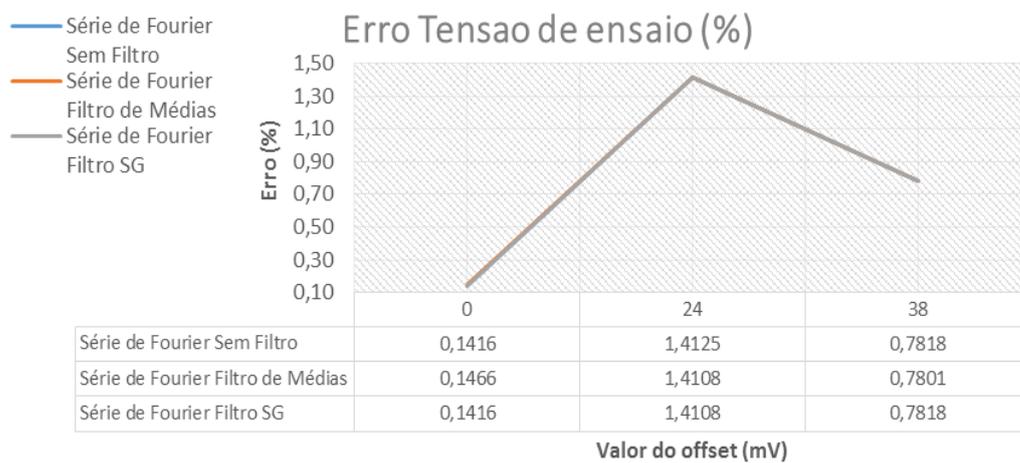


Figura 82 - Gráfico de erros para análise da tensão de ensaio.

**Nota:** Devido a minúscula diferença dos resultados apresentados nos gráficos das Figuras 81 e 82, sua análise visual se torna difícil, deste modo a análise numérica é mais recomendada.

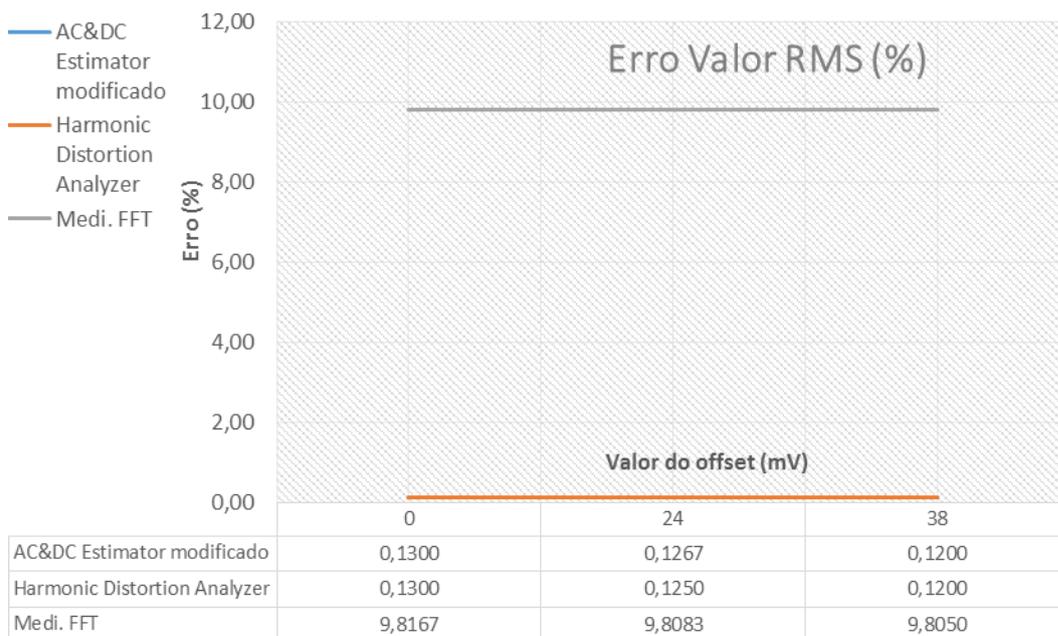


Figura 83 - Gráfico de erros para análise do valor RMS.

### 5.2.1.3. Variando a frequência

As Figuras 84, 85 e 86 mostram os resultados obtidos a partir dos ensaios onde variou-se a frequência do sinal de tensão. Os valores utilizados foram 45, 50 e 65 Hz. Os valores apresentados nos gráficos correspondem à média dos erros encontrados nas diferentes configurações do osciloscópio.

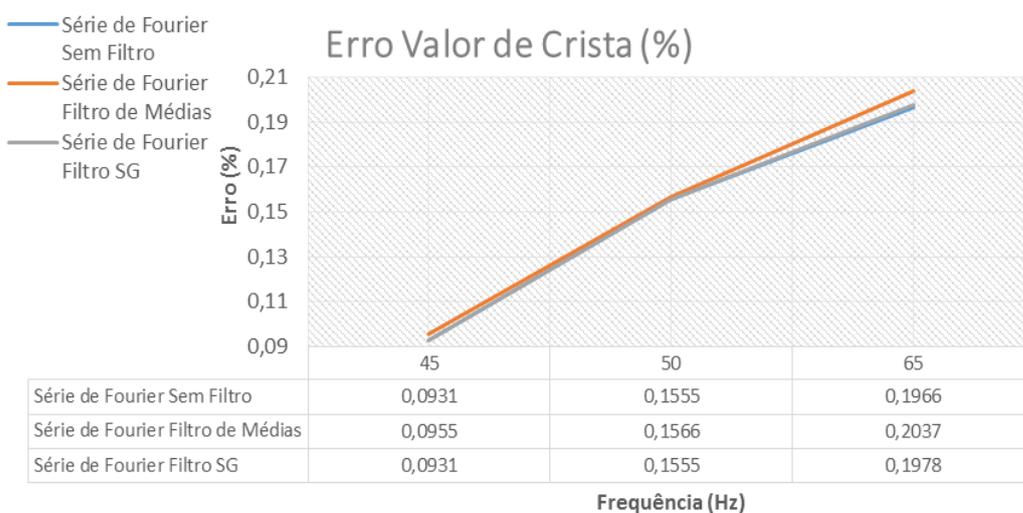


Figura 84 - Gráfico de erros para análise do valor de Crista.

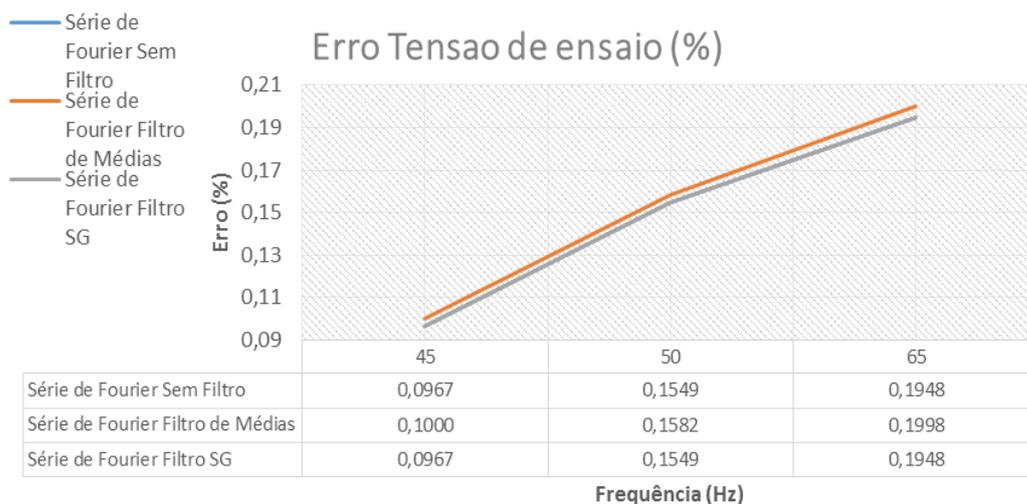


Figura 85 - Gráfico de erros para análise do valor da tensão de ensaio.

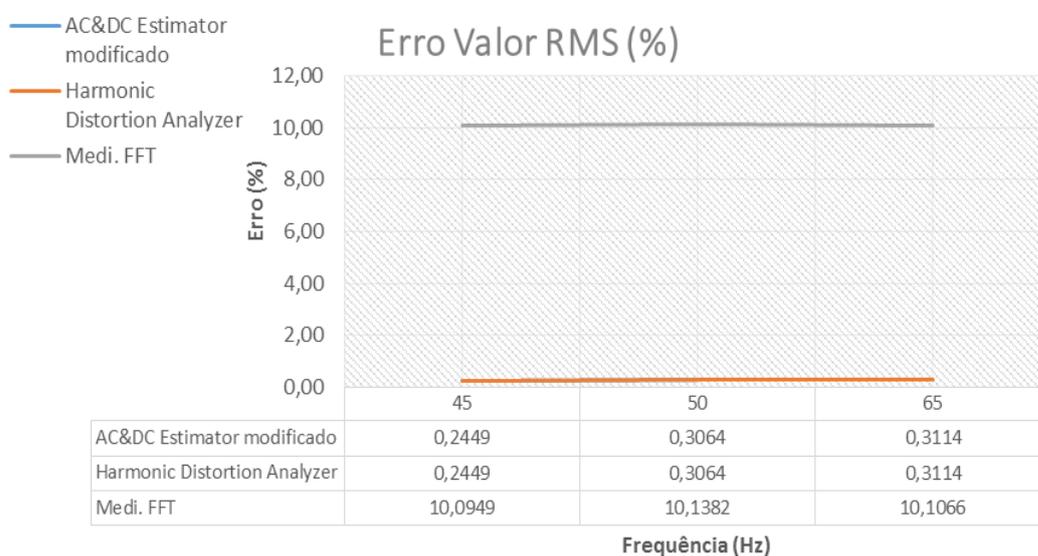


Figura 86 - Gráfico de erros para análise do valor RMS.

### 5.2.2. Ensaio em CC

Assim como os ensaios com tensão CA, os ensaios com tensão CC têm o objetivo de avaliar os VIs selecionados nos ensaios com TDG. As configurações adotadas pelo osciloscópio permaneceram iguais às utilizadas no ensaio com tensão CA. Nos ensaios em CC o módulo do valor médio do sinal de tensão foi mantido constante em 2 V, variando apenas sua polaridade.

Os parâmetros avaliados nos ensaios foram os parâmetros que o voltímetro de crista DMI 551 é capaz de indicar, ou seja:

- Valor médio;

- Amplitude de Ripple; e
- Fator de ripple.

Os ensaios foram realizados variando-se a amplitude do *ripple* em 3 níveis distintos, de modo a obter o fator de ripple nos valores 0%, 1,5% e 3 %, sendo avaliados também nas duas polaridades.

A tensão CC utilizada nos ensaios corresponde a um sinal senoidal com offset igual a 2 V e amplitudes variando entre 10 mV e 60,1 mV.

### 5.2.2.1. Algoritmo implementado

A Figura 87 apresenta o algoritmo utilizado nos ensaios em BT para tensão CC, mostrando também os VIs de processamento e pré-processamento que apresentaram os melhores resultados nos ensaios com TDG.

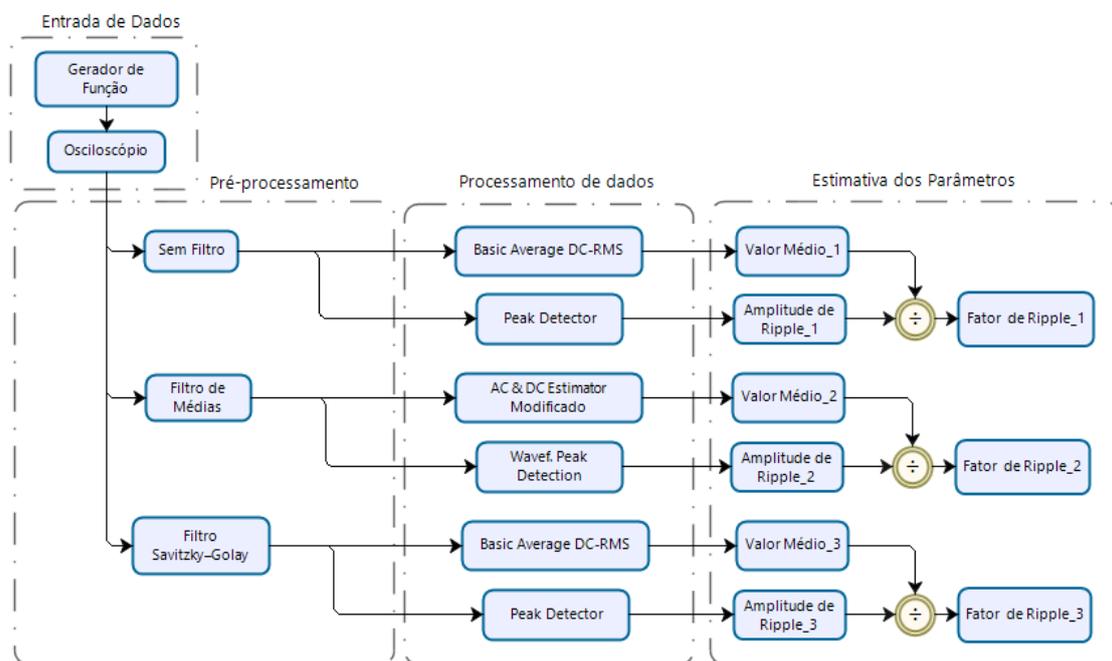


Figura 87 - Algoritmo usado nos ensaios em BT para tensão CC.

### 5.2.2.2. Variando o ripple

As Figuras 88, 89, 90 mostram os resultados obtidos a partir dos ensaios na polaridade negativa, enquanto as Figuras 91, 92 e 93 mostram os resultados

obtidos a partir dos ensaios na polaridade positiva, onde variou-se o valor da amplitude de *ripple* com o intuito de variar o fator de ripple em 0%, 1,5% e 3%, o que corresponde aos valores da amplitude de ripple 0 mV, 30,25 mV e 60,1 mV, respectivamente. Entretanto, o valor mínimo da amplitude de ripple que o gerador de função é capaz de fornecer é 10 mV, assim o menor valor do fator de ripple analisado, devido à limitação do gerador de funções, foi 0,5 %. Estes ensaios foram realizados nas duas polaridades e a variação da configuração do osciloscópio também se fez presente no procedimento de ensaio, pois os valores apresentados nos gráficos correspondem à média dos erros encontrados nas diferentes configurações do osciloscópio.

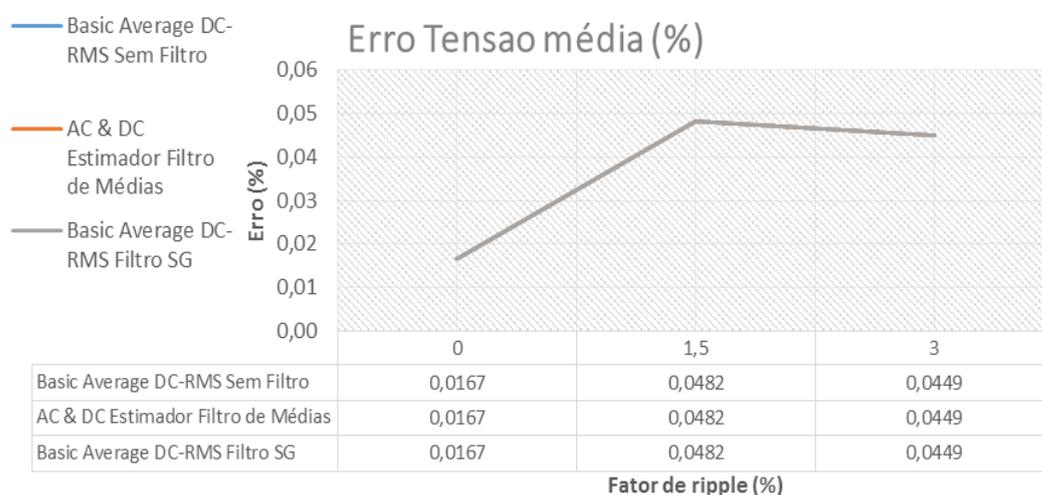


Figura 88 - Gráfico de erros para análise do valor médio na polaridade negativa.

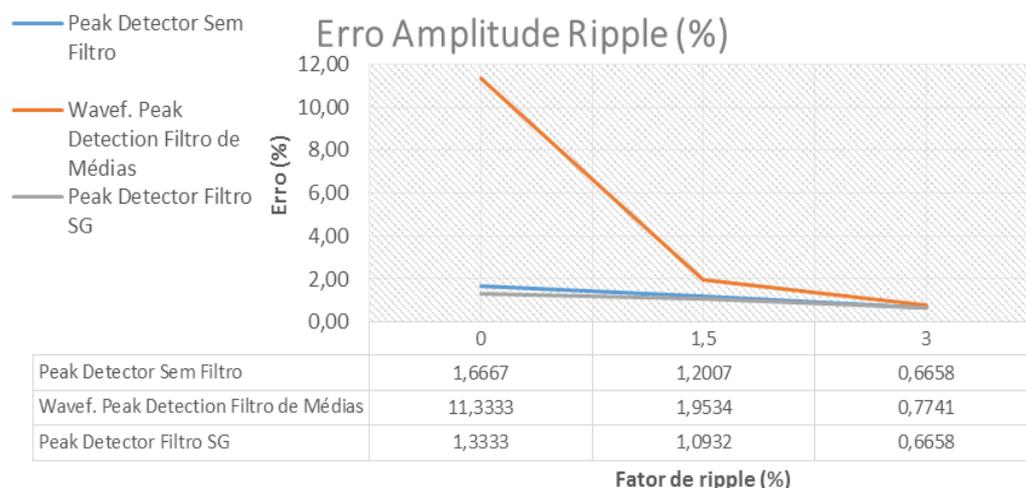


Figura 89 - Gráfico de erros para análise do ripple na polaridade negativa.

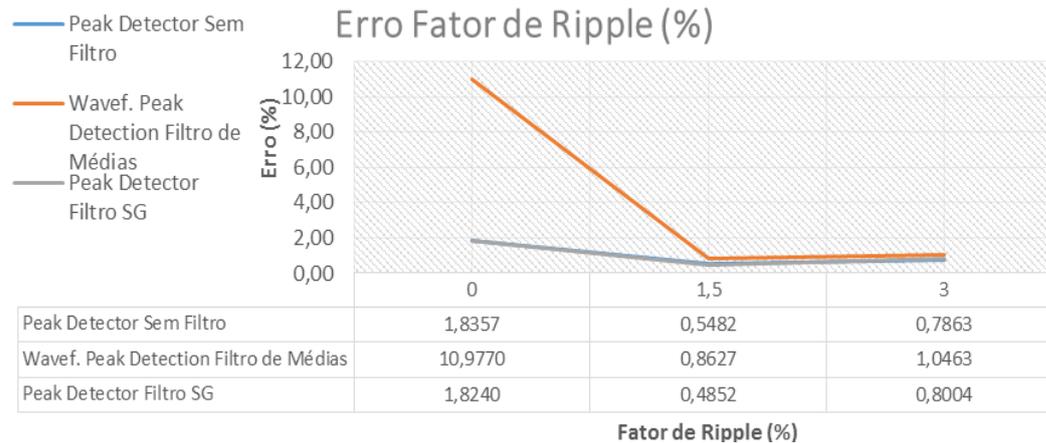


Figura 90 - Gráfico de erros para análise do fator de ripple na polaridade negativa.

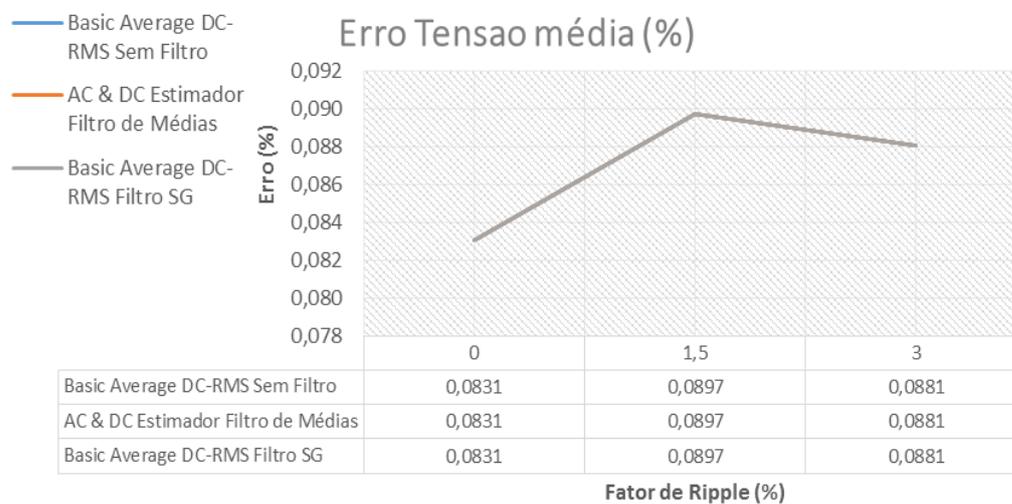


Figura 91 - Gráfico de erros para análise do valor médio na polaridade positiva.

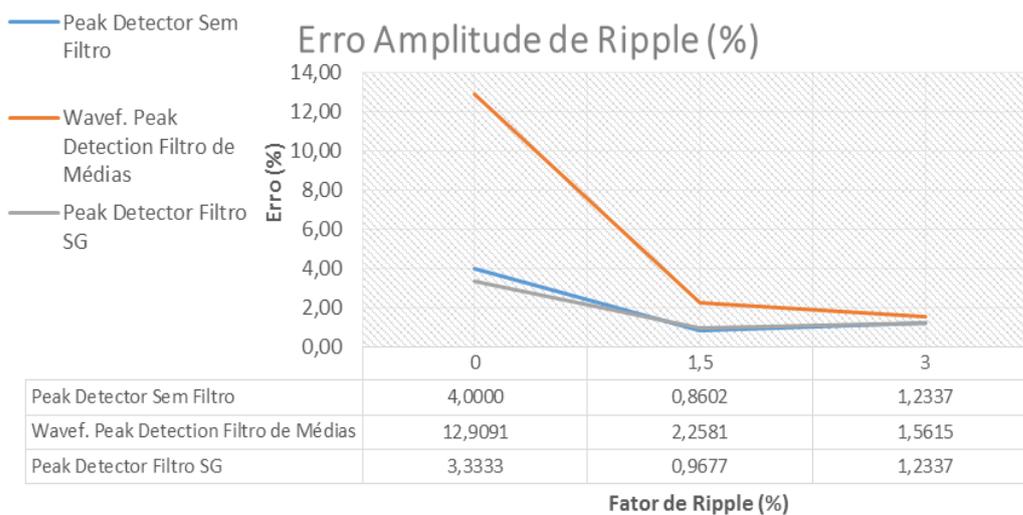


Figura 92 - Gráfico de erros para análise do ripple na polaridade positiva.

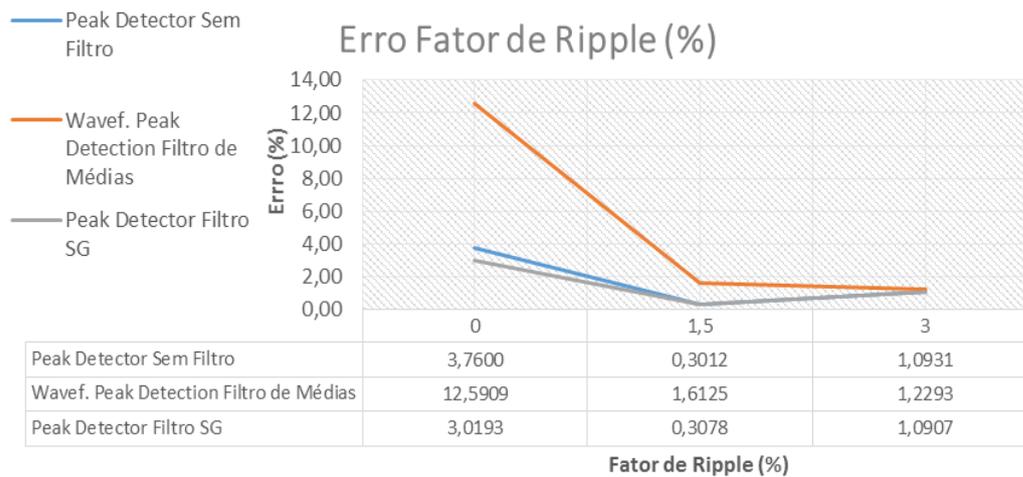


Figura 93 - Gráfico de erros para análise do fator de ripple na polaridade positiva.

### 5.2.3.

#### Análise dos resultados

A análise dos resultados apresentados por cada VI foi realizada por meio do erro percentual, ou seja, os valores apresentados nas seções anteriores correspondem à média dos erros percentuais encontrados em cada situação ensaiada. Estes resultados, juntamente com os resultados dos ensaios com TDG, permitiram determinar quais VIs e quais configurações de pré-processamento foram utilizadas para compor o algoritmo de medição final, sendo elas:

- Harmonic + sem offset: Valor RMS, frequência e THD;
- Serie de Fourier + Filtro SG: Tensão de ensaio, Valor de Crista, valores de pico;
- AC & DC estimator modificado + Filtro de Médias: Tensão Média;
- Peak Detector + Filtro SG: Ripple e Fator de Ripple,  $V_{\max}$  e  $V_{\min}$ ; e
- Medi FFT: Análise no domínio da frequência.

A configuração do osciloscópio possui uma grande influência no processamento dos VIs, principalmente no VI “Medi FFT”, pois, apenas a partir da segunda configuração escolhida nestas análises, é possível obter  $\Delta f = 5$  Hz, possibilitando assim estimar os parâmetros de amplitude corretamente quando o sinal de tensão possui frequências iguais a 45, 55 e 65 Hz, por exemplo. Assim, as opções de configuração do osciloscópio a partir da segunda opção são as mais adequadas para serem utilizadas no algoritmo de medição. Considera-se, ainda,

que a segunda configuração possibilita uma melhor análise visual em relação à terceira opção, embora na terceira configuração seja possível decompor o sinal no domínio da frequência com  $\Delta f = 2,5$  Hz com uma melhor exatidão. Os gráficos que mostram a influência das configurações do osciloscópio nas estimativas dos parâmetros podem ser vistos no anexo B.

### 5.3. HVAT AC-DC

Após analisado quais Vis comporiam os algoritmos de medição, mediante os resultados obtidos dos ensaios com TDG e em baixa tensão, foi desenvolvido o sistema HVAT AC-DC (*High Voltage Analysis Tests*) em linguagem G do Labview, segundo os algoritmos apresentados nas Figuras 94 e 95, sendo estes algoritmos semelhantes aos utilizados nos ensaios com TDG e BT, entretanto estimam todos os parâmetros normalizados, entre outros que não são normalizados, tais como:

- Valores extremos ( $V_{pico\pm}$ ,  $V_{max}$  e  $V_{min}$ );
- Valor eficaz do ripple; e
- Fator de ripple rms – Relação entre o valor eficaz do ripple e o valor médio.

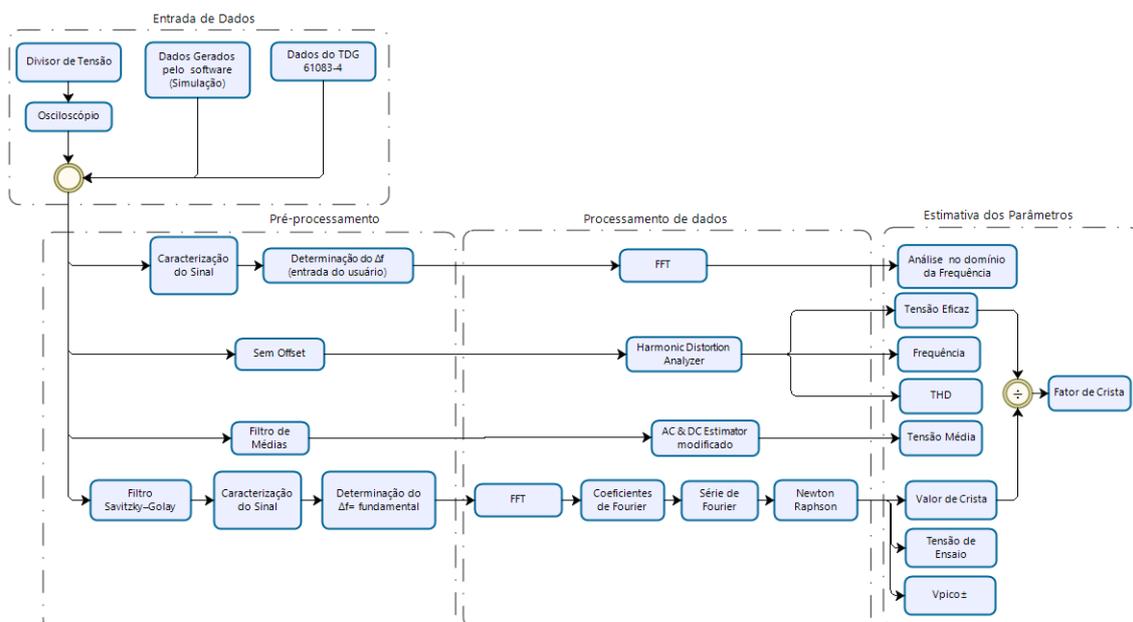


Figura 94 - Algoritmo utilizado no software para medição dos parâmetros de ensaio ATCA.

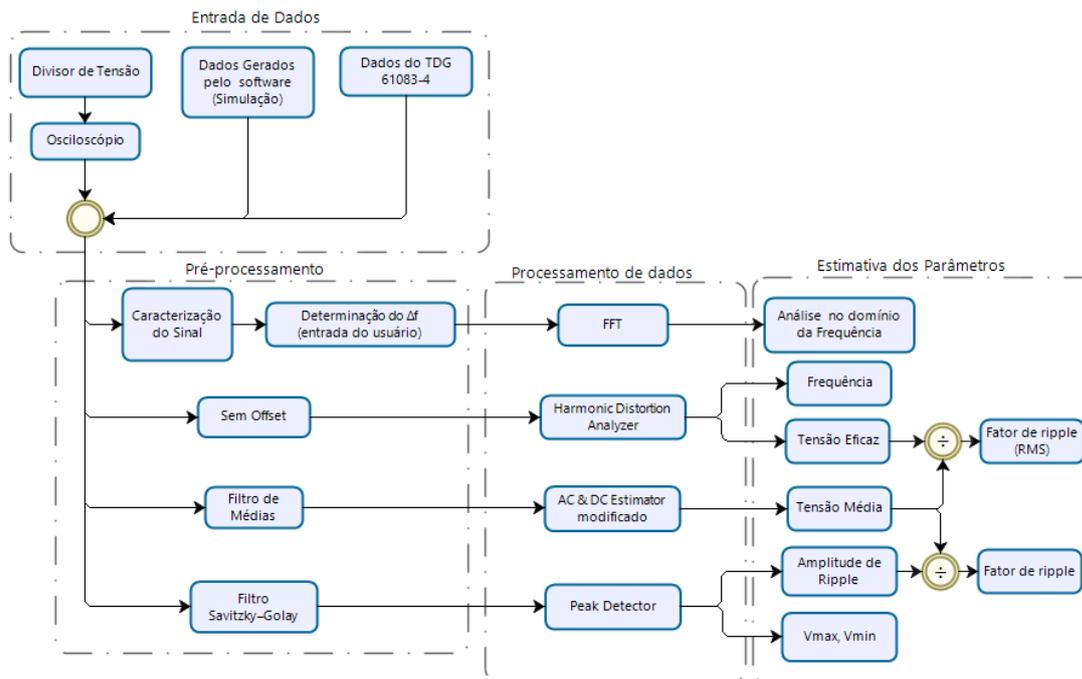


Figura 95 - Algoritmo utilizado no software para medição dos parâmetros de ensaio ATCC.

Logo, o HVAT AC-DC é um software dedicado que utiliza um osciloscópio Tektronix da família TDS 7000 como instrumento registrador e digitalizador. Entretanto, o sistema desenvolvido foi testado apenas nos modelos TDS 7104 e TDS 5104. O HVAT AC-DC possui 4 interfaces de navegação:

- Inicial;
- Informações;
- Configuração; e
- Análise.

### 5.3.1. Interface Inicial

Esta é a interface em que o programa é iniciado, conforme mostrado na Figura 96, sendo utilizada apenas para apresentação do programa. Entretanto, ao se pressionar o botão “Informações” o software muda para a interface de Informações. Nesta interface também é possível finalizar o programa por meio do botão com o respectivo nome.

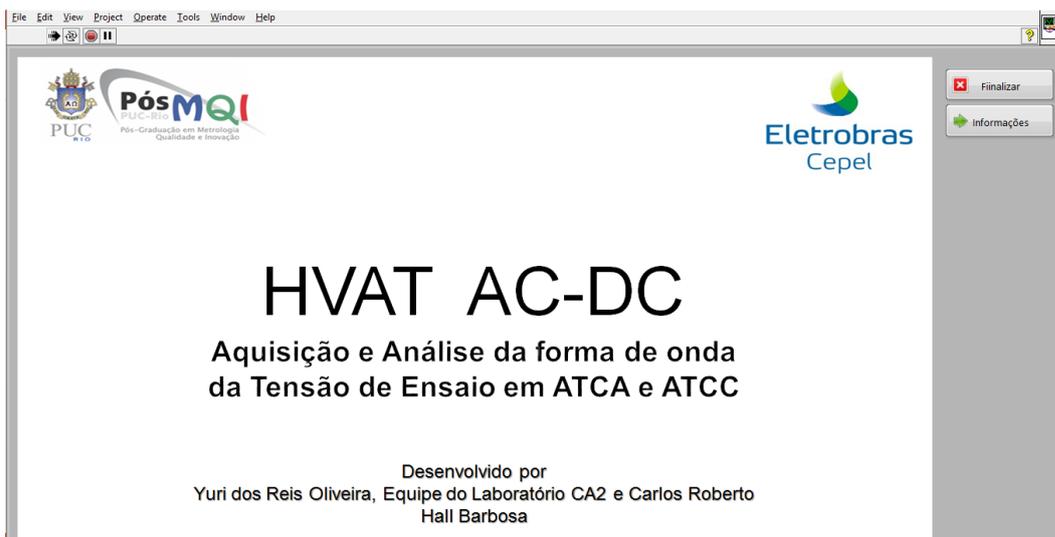


Figura 96 - Interface Inicial.

### 5.3.2. Interface de Informações

A interface de Informações, apresentada na Figura 97, solicita ao usuário que preencha os campos adequados com as informações relevantes do SM, ou seja, o Sistema de medição em alta tensão utilizado no ensaio, tais como fator de escala e nome do sistema de medição utilizado, além das informações sobre o SM. Nesta interface também é solicitado que seja informado ao software dados do equipamento ensaiado, o tipo de ensaio e o tipo de tensão utilizada, ATCA ou ATCC, além dos parâmetros que o algoritmo irá estimar.

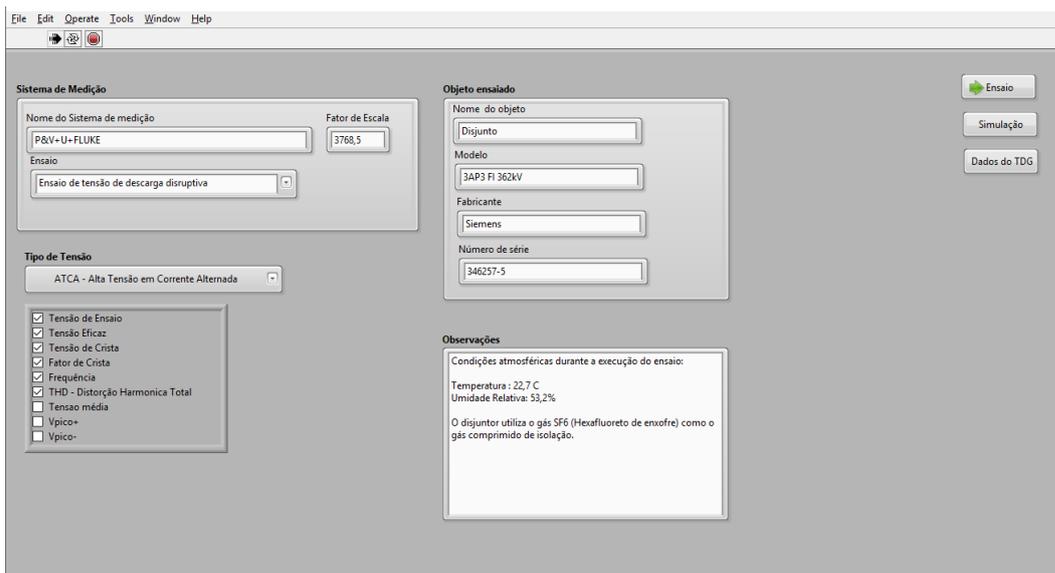


Figura 97 - Interface de Informações.

Nesta interface também se definem quais dados serão processados, sejam eles dados digitalizados pelo osciloscópio, dados gerados digitalmente pelo próprio software ou dados do TDG utilizados na sua validação. A seleção dos dados é feita mediante os botões da Figura 98.

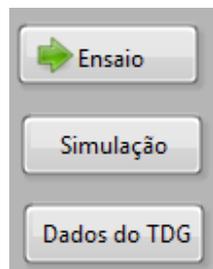
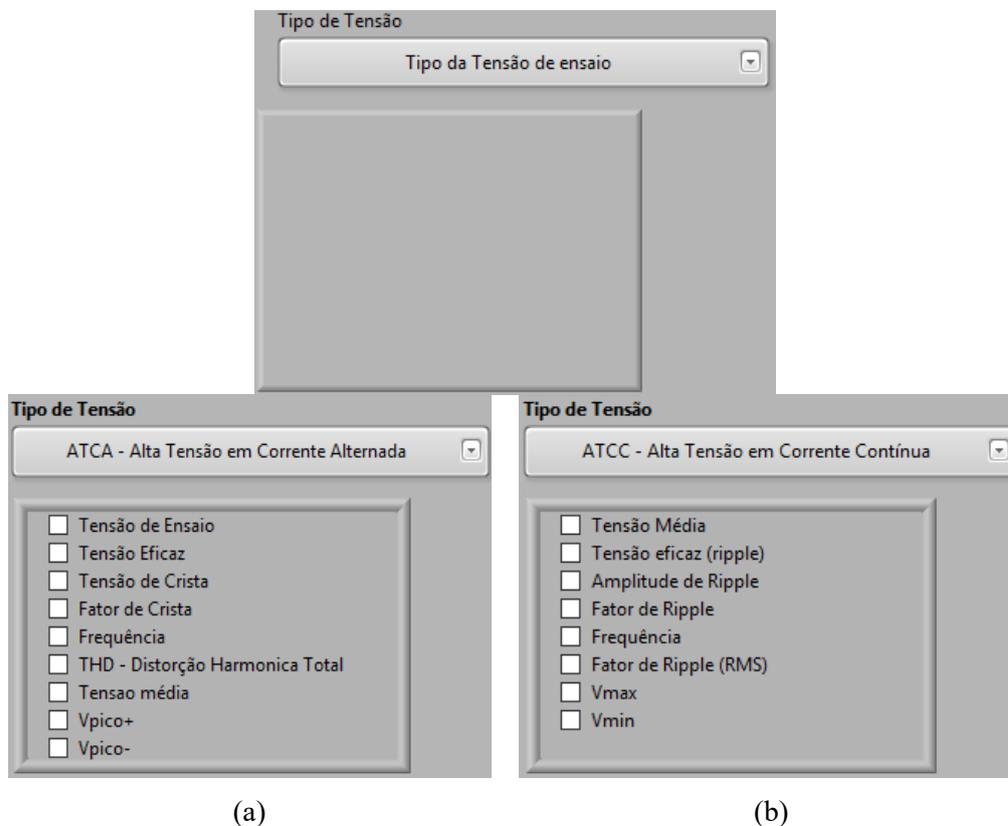


Figura 98 - Botões para escolha de processamento.

Além de escolher quais dados serão processados, nesta interface também deverá ser determinado qual o tipo de tensão que será analisada, ATCA ou ATCC, assim com os seus respectivos parâmetros, como mostra a Figura 99.



(a)

(b)

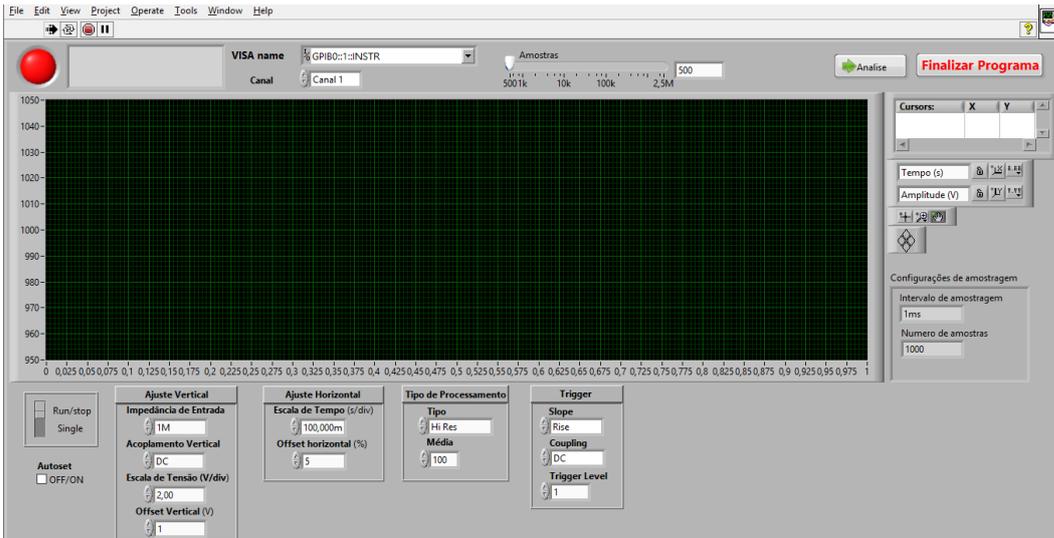
Figura 99 - Menu de seleção do tipo da tensão do ensaio e os respectivos parâmetros que os algoritmos são capazes de medir. (a) Parâmetros de ensaios em ATCA. (b) Parâmetros de ensaios em ATCC.

### **5.3.3. Interface de Configuração**

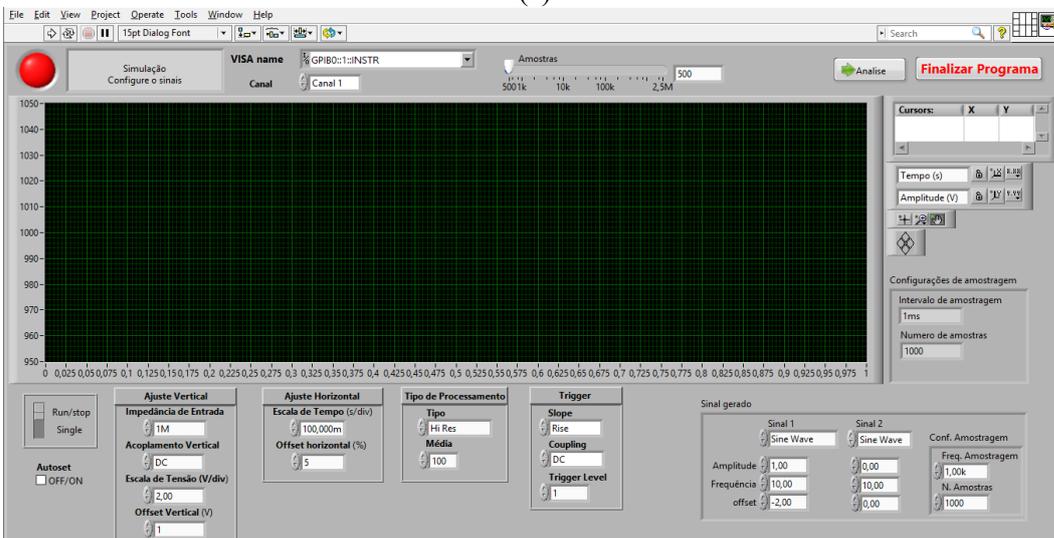
A interface de Configuração, apresentada na Figura 100, permite que o usuário ajuste adequadamente as configurações do osciloscópio, que deverá estar conectado ao computador por uma porta USB, visando adquirir o sinal de tensão proveniente do ensaio realizado. A forma de onda adquirida é visualizada em tempo real na tela do computador.

Nesta interface também é possível configurar os dados digitais que podem ser gerados pelo programa, caso seja selecionada a opção de Simulação na interface de Informações.

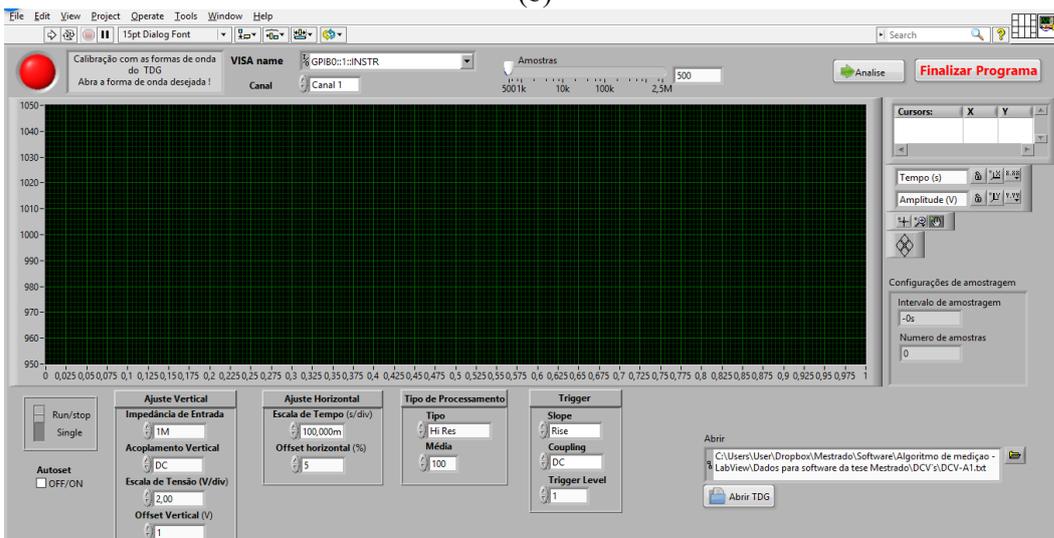
Também nesta interface é possível selecionar arquivos em formato texto para processamento, como é o caso dos dados do TDG.



(a)



(b)



(c)

Figura 100 - Interface de Configuração. (a) Para processamento dos dados do osciloscópio. (b) Para processamento dos dados simulados. (c) Para processamento dos dados do TDG.

### 5.3.4. Interface de Análise

A interface de Análise, apresentada na Figura 101, indica todos os parâmetros que foram previamente selecionados na interface de Informações. Assim, os algoritmos desenvolvidos são aplicados especificamente nesta interface. Além da estimativa dos parâmetros, na interface de Análise é possível verificar o sinal no domínio da frequência e registrar os parâmetros e salvá-los em formato de arquivo texto. Porém o valor expresso na análise do domínio da frequência, corresponde a magnitude dos números complexos obtidos mediante a Vi “Medi. FFT”.

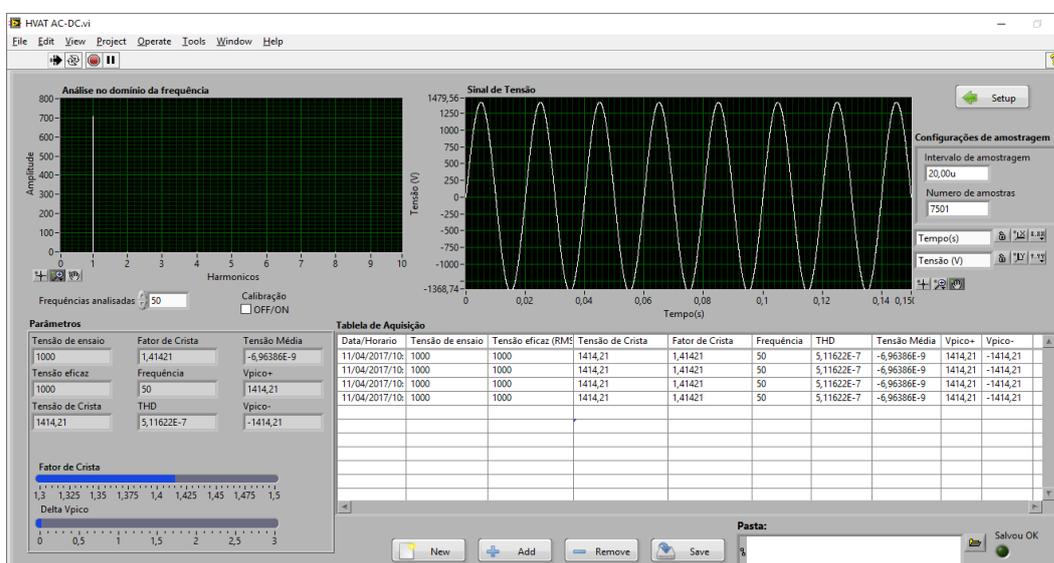


Figura 101 - Interface de Análise.

## 5.4. Ensaio em Alta Tensão (AT)

Os experimentos em alta tensão foram realizados a partir de um ensaio de determinação de fator de escala de um sistema de medição em alta tensão (SM), composto por um divisor resistivo de alta impedância (Figura 102) associado ao osciloscópio TDS 5104B e ao software desenvolvido HVAT AC-DC. Que foi descrito como SM1.

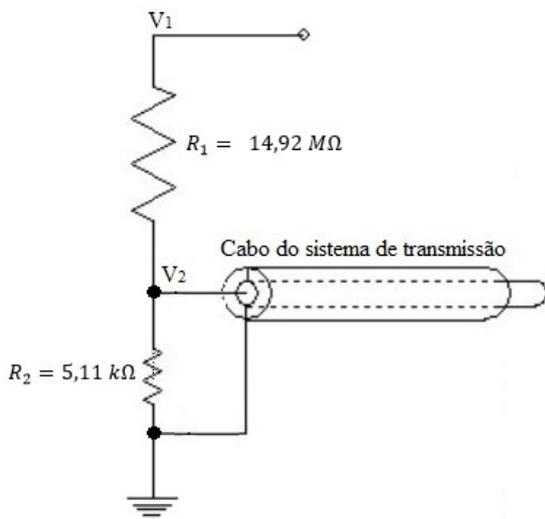


Figura 102 - Diagrama elétrico e foto do divisor de tensão de alta impedância com tensão nominal de 15 kV que compõe o SM1.

Por ser um divisor de tensão resistivo de alta impedância com tensão nominal igual a 15 kV, foi possível determinar o fator de escala em ATCA e ATCC, sem a necessidade de inserir atenuadores ou qualquer outro elemento no sistema de medição proposto. O divisor utilizado pertence ao Laboratório de Referência em Medição de Alta Tensão (CA2), fazendo parte do sistema de medição de referência SMR7, que é atualmente utilizado como padrão de calibração em ATCA e ATCC em níveis de até 10 kV, possuindo os fatores de escala 2936,4 V/V e 2930 V/V, respectivamente, além de uma rastreabilidade metrológica em laboratórios como o LAMAT do Inmetro e o MIKES, laboratório Finlandês que é referência mundial em calibração de alta tensão. Isso garante a determinação do fator de escala com níveis de incerteza muito baixos e assim uma análise mais precisa.

O fator de escala é definido por comparação com um sistema de medição de referência (SMR) e seu procedimento foi realizado conforme as normas [1, 2].

A Figura 103 mostra o diagrama simplificado do arranjo de ensaio utilizado na calibração por comparação em alta tensão de um sistema de medição a ser aprovado (SMA) com um SMR.

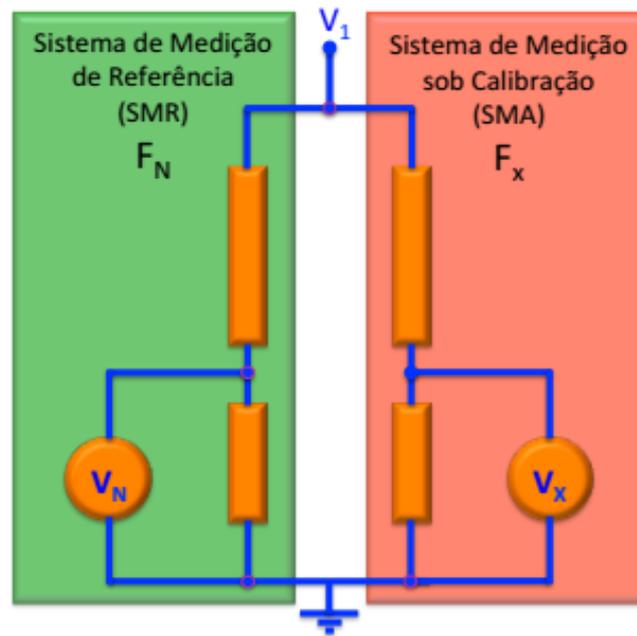


Figura 103 - Diagrama de um arranjo de ensaio para calibração por comparação.

Nos experimentos em AT, considera-se SM1 como sistema de medição a ser aprovado (SMA) e como sistema de medição de referência o SMR2 do laboratório CA2, que é composto por um divisor universal (Figura 104) e um multímetro *Agilent* 3458, que possui uma resolução vertical de 24 bits.

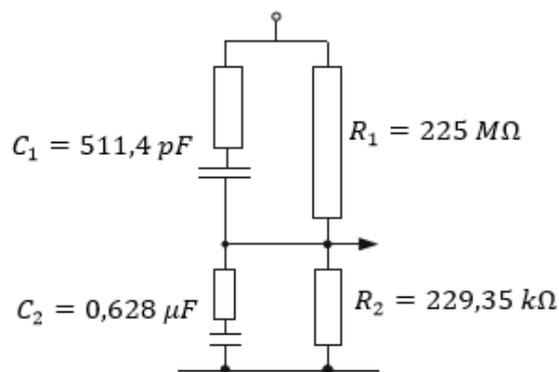


Figura 104 - Diagrama elétrico e foto do divisor universal SMR2.



Figura 105 - Multímetro Agilent 3458.

Segundo a norma [2], o fator de escala em um nível de tensão pode ser definido mediante a comparação com um SMR que deve ser conectado em paralelo ao sistema de medição a ser aprovado (SMA). Assim, medições simultâneas são realizadas com os dois sistemas. O valor de baixa tensão obtido para cada medição feita pelo SMR ( $V_N$ ) é multiplicado pelo seu fator de escala ( $F_N$ ) e então dividido pelo valor de baixa tensão medido pelo instrumento do SMA ( $V_x$ ), a fim de se obter o valor  $F_{i,x}$  do fator de escala, ou seja,

$$F_{i,x} = \frac{V_N \cdot F_N}{V_x}, \quad (66)$$

Essas medições são repetidas  $n$  vezes, obtendo-se  $n$  leituras independentes, para se determinar o valor médio do fator de escala  $F_x$  do SMA em um determinado nível de tensão, não sendo necessário realizar mais do que 10 leituras independentes [2]. O valor médio  $F_x$  é dado por:

$$F_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{i,x} \quad (67)$$

#### 5.4.1. Determinação do fator de escala em ATCA

A determinação do fator de escala em ATCA foi realizada por comparação em alta tensão com um SMR devidamente calibrado. O arranjo deste ensaio pode ser visto na Figura 106.

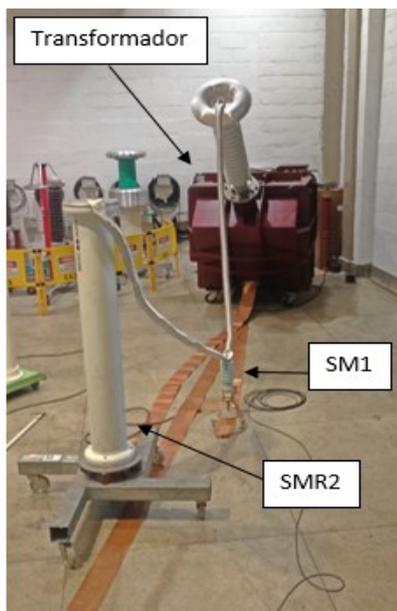


Figura 106 - Arranjo de ensaio para determinação do fator de escala em ATCA.

Após o arranjo ser submetido a uma tensão alternada em um nível de aproximadamente 10 kV, foram realizadas 10 leituras simultâneas nos instrumentos de medição em cada SM.

A Tabela 14 mostra as medidas do valor eficaz obtidas durante o ensaio de determinação do fator de escala, assim como o fator de escala médio e suas amostras. O fator de escala foi definido no nível de 10 kV para tensão em corrente alternada.

Tabela 14 - Valores obtidos durante o ensaio de determinação do fator de escala do SM1 para ATCA.

SMR		SMA	
$V_N$	$V_N F_N$	$V_X$	$F_{ix}$
(V)	(kV)	(V)	$(F_N V_N)/V_X$
8,25849	10,101124	3,43521	2940,5
8,23812	10,076209	3,43739	2931,4
8,25477	10,096574	3,43765	2937,1
8,25086	10,091792	3,43957	2934,0
8,26639	10,110787	3,43430	2944,1
8,27270	10,118505	3,44403	2938,0
8,26716	10,111729	3,44910	2931,7
8,26990	10,115080	3,44523	2936,0
8,23575	10,073311	3,44280	2925,9
8,24246	10,081518	3,43116	2938,2
<b>Média:</b>			<b>2936,5</b>
<b><math>\sigma</math>:(%)</b>			<b>0,1757</b>

#### 5.4.2. Determinação do fator de escala em ATCC

Assim como para a determinação do fator de escala em ATCA, foi utilizado o SMR2 como padrão devidamente calibrado no ensaio de determinação do fator de escala em ATCC. O arranjo deste ensaio pode ser visto na Figura 107.

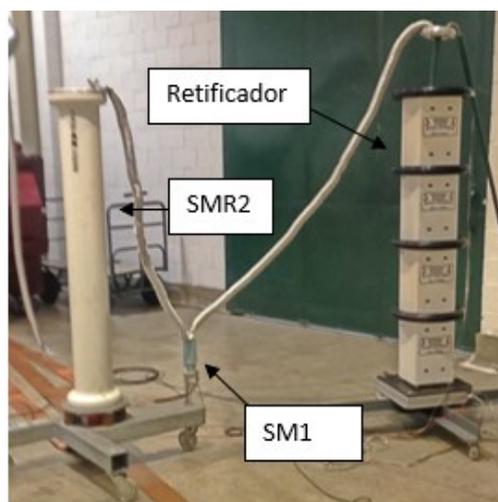


Figura 107 - Arranjo do ensaio para determinação do fator de escala.

Inicialmente aplicou-se uma tensão contínua no nível de 1 kV, mantida por 10 minutos, de modo a ser possível a estabilização térmica, sendo este procedimento exclusivamente necessário em ensaios de determinação do fator de escala em ATCC. Após a estabilização térmica, o arranjo foi submetido a uma tensão contínua no nível de aproximadamente 10 kV e então efetuadas as 10 leituras simultâneas nos instrumentos de medição do SM.

A Tabela 15 mostra o valor médio de leitura dos instrumentos juntamente com o fator de escala correspondente a essa leitura e também o fator de escala médio, que é atribuído ao nível de 10 kV em ATCC.

Tabela 15 - Valores obtidos durante o ensaio de determinação do fator de escala do SM1 para ATCC.

SMR		SMA	
V <sub>N</sub>	V <sub>N</sub> F <sub>N</sub>	V <sub>X</sub>	F <sub>i,x</sub>
(V)	(kV)	(V)	(F <sub>N</sub> V <sub>N</sub> )/V <sub>X</sub>
9,918958	-9,693798	-3,29715	2940,1
9,917566	-9,692437	-3,29599	2940,7
9,911129	-9,686146	-3,29525	2939,4
9,919832	-9,694652	-3,29436	2942,8
9,909712	-9,684762	-3,29237	2941,6
9,910636	-9,685665	-3,29521	2939,3
9,914529	-9,689469	-3,2927	2942,7
9,930831	-9,705401	-3,29236	2947,9
9,917391	-9,692266	-3,29410	2942,3
9,920345	-9,695153	-3,29816	2939,6
Média:			2941,1
σ:(%)			0,0875

### 5.4.3. Resultados comparativos

Os resultados dos fatores de escala médios em ATCA e ATCC no nível de 10 kV correspondente ao SM, obtidos pelo algoritmo de medição, foram comparados com os fatores de escala do SMR7, obtidos nos laboratórios MIKES (certificado M-13E067) e CA2 (certificado CA2-247/2013). Com esta análise foi possível observar a influência do sistema HVAT AC-DC no sistema de medição, já que é característico que multímetros de bancada tenham uma impedância de entrada igual a 10 MΩ, enquanto os osciloscópios apresentam uma impedância igual a 1 MΩ.

Segundo a norma [2], somente é obrigatório alterar o fator de escala determinado em novas calibrações, se a diferença percentual entre os fatores de escala for maior que 1%. Assim, em situações onde a diferença for menor do que 1% o valor atual ainda é válido. Com base nessa informação, esta diferença foi determinada após essa análise. A Tabela 16 mostra a diferença entre os fatores de escala.

Tabela 16 - Comparação entre os fatores de escala.

Tipo de Tensão	Fator de escala		Erro (%)
	SMR7	SM1	
ATCA	2936,4	2936,5	0,0034
ATCC	2930	2941,1	0,3797

Mesmo o fator de escala tendo apresentado uma diferença maior em ATCC, pode-se verificar que o conjunto osciloscópio e algoritmo não possui grande influência no sistema de medição, caso venha a substituir os multímetros de bancada.

Os outros parâmetros registrados nos ensaios podem ser vistos no apêndice C, onde pode ser observado que a determinação do fator de escala em ATCC foi realizado com um elevado fator de ondulação na tensão aplicada nos divisores, devido a impedância do divisor SM1 de  $15\text{ M}\Omega$  ser uma carga elevada para o retificador do laboratório CA2. Assim, o erro entre os fatores de escala em ATCC pode ter sido provocado pelo fato da qualidade da tensão (apêndice C) utilizada não estar dentro das especificações requeridas pela norma [1] para o ensaio de determinação do fator de escala em ATCC. Logo, esta análise qualitativa da tensão de ensaio só pode ser concluída com a utilização do software.

## 6 Discussão e conclusão

Para que um ensaio seja executado de forma normalizada de modo a garantir a reprodutibilidade do mesmo, é necessário que os laboratórios utilizem procedimentos e atendam a todos os requisitos da norma referente ao ensaio executado, já que os requisitos solicitados pela mesma são propostos por grupos de especialistas e referências mundiais no assunto ao qual a norma se refere.

Atualmente nos laboratórios de ensaio e calibração em alta tensão, a norma que define todos os requisitos e procedimentos do ensaio é a IEC 60060-1:2010 [41], que possui a versão brasileira ABNT NBR IEC 60060-1:2013 [1]. Dentre todos os requisitos atendidos pelos laboratórios, a medição de todos os parâmetros da tensão de ensaio não é observada integralmente, já que a maioria dos laboratórios realizam apenas a avaliação quantitativa da tensão aplicada no equipamento ensaiado.

Focado nessa problemática, essa dissertação visou aos ensaios de alta tensão em corrente alternada e corrente contínua, e mais precisamente à medição dos parâmetros que são solicitados pela norma ABNT NBR IEC 60060-1:2013, de modo a desenvolver e validar um software dedicado capaz de medir todos os parâmetros solicitados por norma, permitindo a avaliação da tensão de ensaio de forma quantitativa e qualitativa.

Assim, por meio dos conceitos teóricos apresentados nos capítulos 2 e 3, que abordam os elementos dos ensaios em ATCA e ATCC, como os sistemas de medição utilizados e os respectivos parâmetros avaliados na tensão de ensaio, os algoritmos e software de medição foram desenvolvidos nos capítulos 4 e 5. O capítulo 5 apresenta os resultados em baixa e alta tensão, dentre outras análises.

Porém, para que o software pudesse ser utilizado como parte integrante do instrumento de medição, foi necessária a validação com as formas de onda do rascunho da norma IEC 61083-4, conforme é apresentado no capítulo 4. Como o desenvolvimento do algoritmo, ou seja, a seleção dos VIs e elementos de pré-processamento, foi baseado no menor erro encontrado ao processar as formas de

onda do rascunho da norma e compará-los com seus valores de referência, ao final de todos os experimentos práticos, o algoritmo final desenvolvido atende aos requisitos do rascunho da norma IEC 61083-4.

Como conclusão deste trabalho pode-se afirmar que:

- O software HVAT AC-DC atende aos requisitos e especificações das normas ABNT NBR IEC 60060-1 e futura IEC 61083-4;
- Os resultados obtidos mostraram-se adequados na maioria dos ensaios realizados via TDG, assim como nos ensaios experimentais em baixa tensão e alta tensão;
- A avaliação qualitativa da tensão de ensaio permitirá uma análise mais criteriosa das possíveis falhas em equipamentos;
- É possível implantar o HVAT AC-DC nos laboratórios de ensaio do Cepel; e
- Com a utilização do sistema dedicado HVAT AC-DC o Cepel garante sua vanguarda na execução de ensaios já que seus sistemas de medição estejam adequados para realizar as medições de todos os parâmetros conforme solicitado pelas mais recentes normas.

Como proposta para trabalhos futuros tem-se:

- Avaliar qual a influência da variação do fator de ripple nos ensaios de descargas parciais;
- Implementar um novo algoritmo para os ensaios em equipamentos de potência com transitórios de curta duração;
- Realizar o processamento das formas de onda da norma IEC 61083-4, após sua publicação;
- Determinar a incerteza do novo SMAT (Divisor + osciloscópio + HVAT AC-DC); e
- Avaliar a influência do fator de ripple e ripple na calibração de SMRs em ATCC.

## 7 Referências bibliográficas

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR IEC 60060 “Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão, Parte 1: Definições gerais e requisitos de ensaio”, 2013.
2. \_\_\_\_\_, ABNT NBR IEC 60060 “Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão, Parte 2: Sistemas de medição”, 2016.
3. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, IEC 61083 Ed. 1 (draft): “Instruments and software used for measurements in high-voltage and high-current tests - Part 4: Requirements for software for tests with alternating and direct currents and voltages”, July 2011.
4. CASTRO, L. F. Rastreabilidade Metrológica de Impulsos de corrente elétrica no Brasil. Dissertação (Mestrado) – Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
5. FERREIRA, L. S. Novo método para estimativa de parâmetros de impulsos atmosféricos cortados na cauda. 2016. 105 f. Dissertação (Mestrado) – Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
6. SILVA, M. T. F. 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, Rio de Janeiro, 2011
7. KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. High Voltage Engineering - FUNDAMENTALS. 2 ed. OXFORD - NEWNES, 2000
8. SALLES, C.; CORIOLANO, D. L.; NETO, E. T. W. Técnica em alta tensão, LAT-EFEL, Fupai.
9. HAUSCHILD, W.; LEMKE, E. High Voltage Test and Measuring Techniques. 1 ed. Germany- Springer. 2014.

10. FILHO, O. B. O.; SILVA, M. T. F. Técnicas de medição em ensaios de alta tensão. Rio de Janeiro, Eletrobrás CEPEL, 1996, 110p. Relatório Técnico.
11. VIM. Vocabulário internacional de metrologia – Conceitos fundamentais e gerais e termos associados. INMETRO 1ª edição Luso-Brasileira, 2012.
12. LUCAS J. R. High Voltage Engineering. 2 ed. Sri Lanka - Department of Electrical Engineering. University of Moratuwa. 2001.
13. ABDEL-SALAM, M. et al. High Voltage Engineering - Theory and Practice. 2 ed. New York, Basel - Marcel, Dekker, Inc. 2000.
14. WADHWA, C. L. HIGH VOLTAGE ENGINEERING. 2 .ed. New Delhi - New Age International. 2007.
15. PESENTE, J. R. Fundamentos de técnicas de alta tensão. Universidade estadual do oeste paraná. Centro de engenharias e ciências exatas. Foz do Iguaçu, 2004, 135p.
16. FONSECA. M. P; FERREIRA, U. L. Construção e calibração de um divisor de tensão capacitivo para medição de tensão alternada com amplitude de 2 a 30 kV. Volta Redonda, 2015. 84p. Monografia (Graduação) - Engenharia Elétrica, Centro Universitário de Volta Redonda
17. OLIVEIRA. Y. R. Gerador de Impulso – Modelagem computacional. Volta Redonda, 2014. 120p. Monografia (Graduação) - Engenharia Elétrica, Centro Universitário de Volta Redonda.
18. FILHO, O. B. O. Treinamento para técnico: Divisores de Tensão. Rio de Janeiro, Eletrobrás CEPEL, 1986. 25p. Relatório Técnico.
19. ARINOS, J. T. J. Divisor resistivo para ensaios de frente de onda em isoladores. 1994. 149p. Dissertação (Mestrado) – Física, Setor de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
20. TEIXEIRA, D. A. Análise das distorções harmônicas estudo de caso de um sistema industrial. 2009. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais.
21. ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. Power System Harmonic. 2 ed. ENGLAND - JOHN WILEY. 2003

22. CHAPMAN, S. J. Fundamentos de Maquinas Elétricas. 5 ed. New York, The McGraw-Hill Companies, 2012.
23. NAIDU, M.; KAMARAJU, V. High Voltage Engineering. 2 ed. United States of America- McGraw-Hill, 1996
24. BOWDLER, G. W. Measurements in high-voltage test circuits. Oxford, Pergamon Press, 1973.
25. BARBOSA, C. R. H. et al. Validation of a System for Evaluation of High-Voltage Impulses According to IEC 60060-1:2010, *IEEE Trans. Inst. Meas.*, June 2015, vol. 64, nº. 6, pp. 1378–1382, 2015
26. CELINO, R. A. Integrando o LabVIEW na Engenharia. Aracaju, 2009. 208p. Monografia (Graduação) - Engenharia Elétrica, Faculdade Pio Decimo, Sergipe.
27. INTRODUÇÃO a programação ao LabVIEW. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica Núcleo de Pesquisas em Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014. 74p.
28. SATO, S.; SAIKAWA, Y.; OKAMOTO, Y. Parameters Determination for a.c. Voltage and Current Waveforms: IEC 61083-4 TDG Waveform analyses, *10th International Power and Energy Conference*, IPEC, 578-582, 2012
29. JUNIOR, O. R. Desenvolvimento de um programa computacional para o tratamento de sinais obtidos pela ressonância paramagnética eletrônica na dosimetria de doses altas. 2003. 150p. Tese (Doutorado) – Física, Ciências na área de Tecnologia Nuclear- Aplicações, Universidade de São Paulo, São Paulo.
30. YIN, L. et al. Weighted median filters: a tutorial, *IEEE Trans. Circuit and Systems II; Analog and Digital Signal Processing*, vol. 43, no. 3, pp. 157-192, March 1996.
31. SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedure, *Analytical Chemistry*, vol. 36, pp. 1627-1639, 1964.
32. CERQUEIRA, E. O.; POPPI, R. J.; KOBUTA, L.T. Utilização de filtro de transformada de Fourier para a minimização de ruídos em sinais analíticos, *Química Nova*, pp. 690-698, Maio 2000.

33. NAKASHIMA, K. Valor médio e eficaz. Universidade Federal de Itajubá. Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologias da Informação, 2013.
34. OLIVEIRA, Y. R. et al. Instrumento virtual de medição em ensaios de alta e ultra alta tensão em corrente alternada, 17<sup>a</sup> ERIAC, 2017.
35. FRANCO, N. B. Cálculo numérico, São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2006.
36. MUNEM, M. A.; FOULIS, D.J. Cálculo Volume 1, Rio de Janeiro, LTC-Livros Técnicos e Científicos, 1982.
37. OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R.W. Discrete-Time Signal Processing. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1999.
38. IEC 61083-2 Digital records for measurements in high-voltage impulse test – Part 2: Evaluation of software used for determination of the parameters of impulse waveforms, 2013.
39. USER MANUAL. TDS7000 Series Digital Phosphor Oscilloscopes. Tektronix. Inc.
40. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, IEC 61083 “Digital records for measurements in high-voltage impulse test, Part 2: Evaluation of software used for determination of the parameters of impulse waveforms”, 2013.
41. \_\_\_\_\_, IEC 60060 “High-voltage test techniques, Part 1: General definitions and test requirements”, 2010.

## APÊNDICE A – Resultados dos ensaios com TDG

Este apêndice apresenta as tabelas e figuras resultantes dos experimentos com as formas de onda do TDG, às quais foi adicionado ruído de distribuição gaussiana, na escala de 0 a 10 %

- **Análise em ATCA**

Tabela 17 - Análise dos VIs que estimam o valor RMS, com pré-processamento na condição sem offset.

		Nível de Ruído (%)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Erro percentual dos VIs	Amplitude And L.	0,088	0,086	0,092	0,095	0,11	0,095	0,14	0,23	0,28	0,34	0,50
	Statistics	0,088	0,086	0,092	0,095	0,11	0,095	0,14	0,23	0,28	0,34	0,50
	Cycle Average And RMS	0,087	0,089	0,088	0,12	0,13	0,15	0,20	0,28	0,33	0,44	0,57
	Basic Average DC-RMS	0,084	0,086	0,088	0,10	0,13	0,15	0,20	0,28	0,35	0,43	0,52
	RMS	0,088	0,086	0,092	0,095	0,11	0,095	0,14	0,23	0,28	0,34	0,50
	AC & DC Estimator	0,058	0,060	0,063	0,074	0,10	0,13	0,17	0,24	0,31	0,38	0,46
	AC & DC Estimator modif.	0,058	0,060	0,063	0,074	0,10	0,13	0,17	0,24	0,31	0,38	0,46
	Cálculo	0,088	0,086	0,092	0,095	0,11	0,095	0,14	0,23	0,28	0,34	0,50
	Harmonic Dist. Anal.	0,058	0,061	0,053	0,063	0,056	0,071	0,076	0,079	0,071	0,087	0,13
	Medi. FFT	0,058	0,061	0,061	0,073	0,091	0,12	0,17	0,24	0,31	0,39	0,50
	Average DC-RMS	0,084	0,086	0,088	0,10	0,13	0,15	0,20	0,28	0,35	0,43	0,52
	Coeficientes de Fourier	0,083	0,081	0,086	0,083	0,10	0,082	0,11	0,16	0,14	0,22	0,25

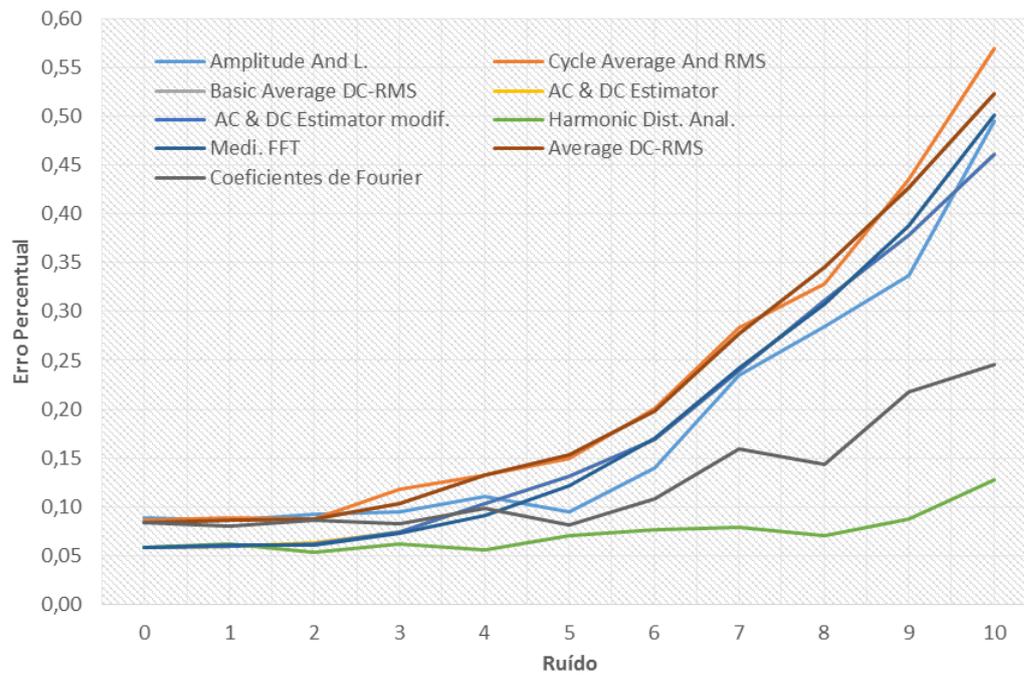


Figura 108 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o valor RMS, com pré-processamento na condição sem offset.

Tabela 18 - Análise dos VIs que estimam o valor RMS, com pré-processamento na condição com offset.

		Nível de Ruído (%)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Erro percentual dos VIs	Amplitude And L.	0,23	0,22	0,21	0,19	0,15	0,084	0,061	0,093	0,15	0,22	0,24
	Statistics	0,23	0,22	0,21	0,19	0,15	0,084	0,061	0,093	0,15	0,22	0,24
	Cycle Average And RMS	0,061	0,061	0,065	0,090	0,093	0,14	0,17	0,24	0,31	0,40	0,42
	Basic Average DC-RMS	0,068	0,074	0,070	0,10	0,10	0,15	0,18	0,24	0,31	0,39	0,43
	RMS	0,23	0,22	0,21	0,18	0,15	0,084	0,061	0,093	0,15	0,22	0,24
	AC & DC Estimator	0,058	0,065	0,062	0,10	0,095	0,14	0,16	0,23	0,30	0,38	0,42
	AC & DC Estimator modif.	0,058	0,065	0,062	0,10	0,095	0,14	0,16	0,23	0,30	0,38	0,42
	Cálculo	0,23	0,22	0,21	0,18	0,15	0,08	0,061	0,093	0,15	0,22	0,24
	Harmonic Dist. Anal.	0,058	0,063	,063	0,075	0,061	0,067	0,068	0,10	0,077	0,093	0,092
	Medi. FFT	0,058	0,06	0,06	0,09	0,11	0,15	0,16	0,22	0,29	0,38	0,43

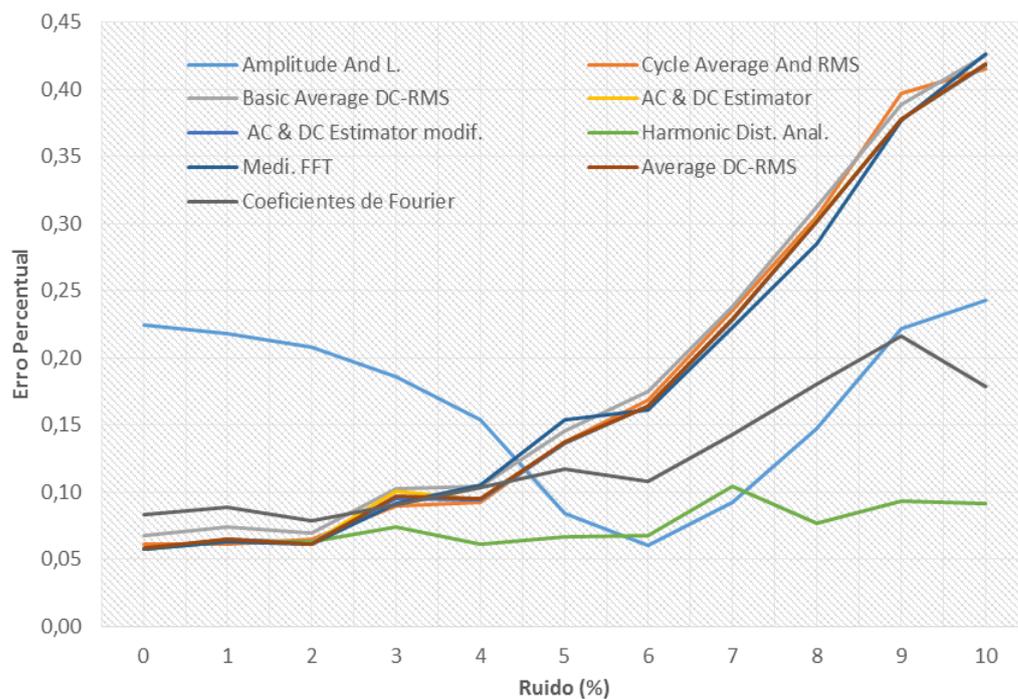


Figura 109 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o valor RMS, com pré-processamento na condição com offset.

Tabela 19 - Análise dos VIs que estimam o valor da tensão de ensaio, com pré-processamento na condição sem filtro.

		Nível de Ruído (%)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Erro percentual dos VIs	Amplitude and Levels	0,66	2,4	4,2	5,9	8,4	11	13	15	16	18	21
	Wavef. Peak Detection	0,66	3,4	3,6	3,6	3,6	3,6	3,5	3,3	3,5	3,3	3,4
	Peak Detector	0,66	1,7	1,3	2,1	2,8	3,1	3,2	3,3	3,4	3,4	3,4
	Coeficientes de Fourier	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,6	3,6	4,3	3,5	4,8	3,9
	Medi FFT.	3,2	3,4	3,6	3,9	4,3	4,7	5,0	5,7	6,0	6,4	6,8
	Harmonic Dist. Anal.	2,7	2,8	3,1	3,2	3,5	3,6	3,9	4,1	4,3	4,5	4,6
	Série de Fourier	0,70	0,71	0,71	0,70	0,41	0,62	0,50	0,53	0,41	0,66	0,65

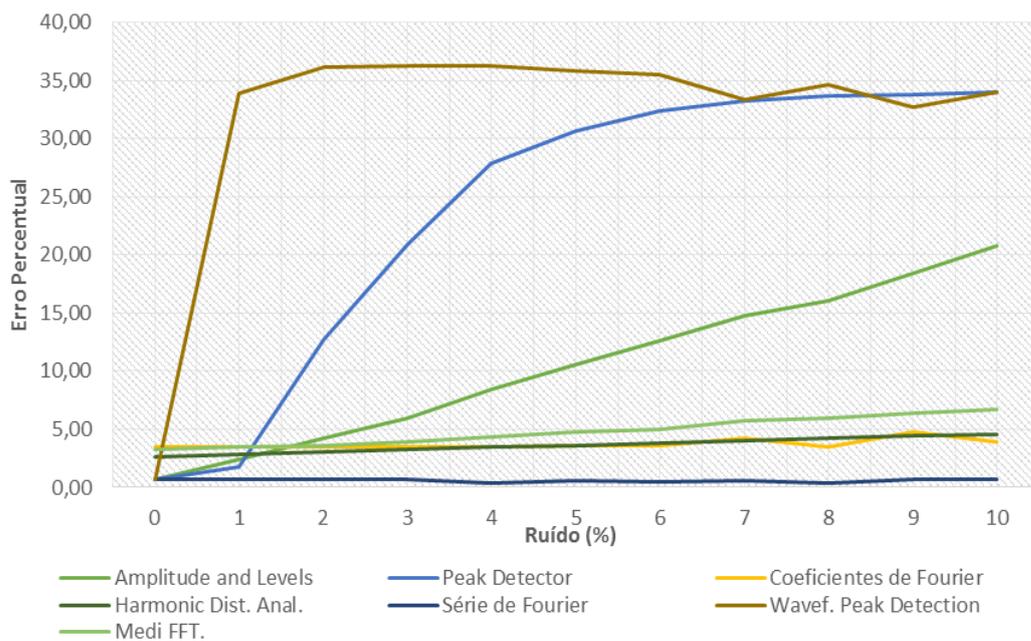


Figura 110 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o valor da tensão de ensaio com pré-processamento na condição sem filtro.

Tabela 20 - Análise dos VIs que estimam o valor da tensão de ensaio com pré-processamento na condição com filtro de médias.

		Nível de Ruído (%)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Erro percentual dos VIs	Amplitude and Levels	0,66	1,4	2,4	3,1	4,2	5,1	6,3	7,2	8,3	9,1	9,7
	Wavef. Peak Detection	0,40	17	33	36	37	37	37	37	37	37	35
	Peak Detector	0,66	0,74	7,02	14,55	22,66	27,07	29,47	31,08	31,90	32,80	33,42
	Coeficientes de Fourier	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,4	3,3	3,5	3,7	4,9
	Medi FFT.	3,2	3,4	3,7	3,9	4,5	4,8	5,2	5,7	6,4	7,0	6,9
	Harmonic Dist. Anal.	2,7	2,8	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,2	4,4	4,6	5,0
	Série de Fourier	0,70	0,70	0,67	0,72	0,27	0,75	0,14	0,82	0,20	0,34	0,69

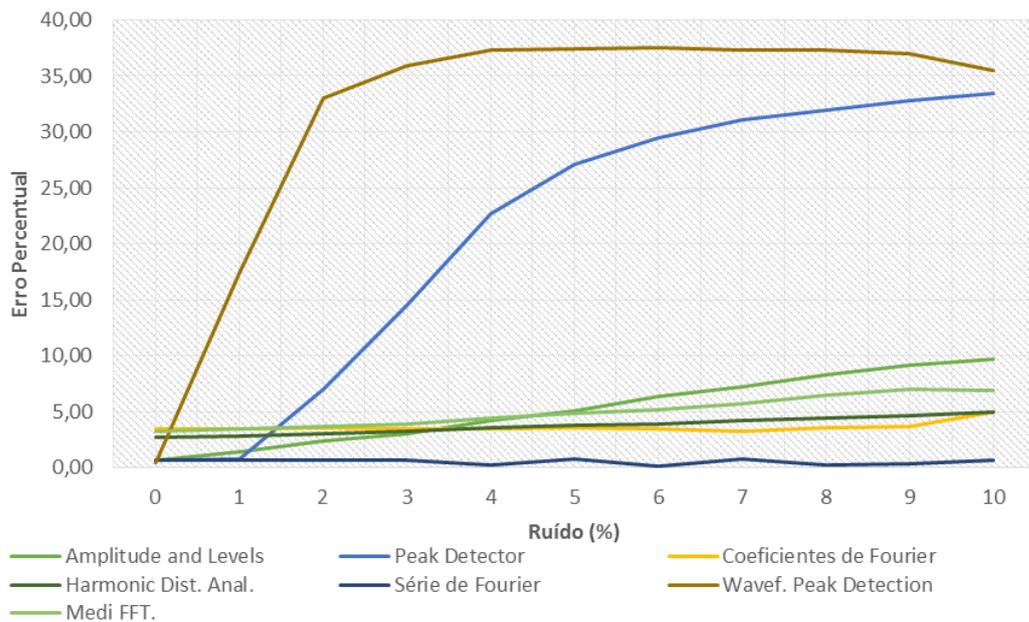


Figura 111 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o valor da tensão de ensaio com pré-processamento na condição com filtro de médias.

Tabela 21 - Análise dos VIs que estimam o valor da tensão de ensaio com pré-processamento na condição com filtro Savitzky-Golay.

		Nível de Ruído (%)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Erro percentual dos VIs	Amplitude and Levels	0,66	1,3	1,9	2,5	3,4	4,1	4,8	5,6	6,4	7,6	7,8
	Wavef. Peak Detection	0,66	2,4	14	23	29	32	34	34	35	34	35
	Peak Detector	0,66	0,51	2,7	8,5	16	22	25	27	29	31	32
	Coeficientes de Fourier	3,5	3,5	3,5	3,5	3,6	3,6	3,6	3,5	3,8	4,5	3,6
	Medi FFT.	3,2	3,4	3,6	3,9	4,3	4,6	4,9	5,5	5,9	6,0	6,9
	Harmonic Dist. Anal.	2,7	2,8	3,0	3,2	3,5	3,6	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6
	Série de Fourier	0,70	0,70	0,71	0,73	0,75	0,11	0,08	0,45	0,38	0,54	0,60

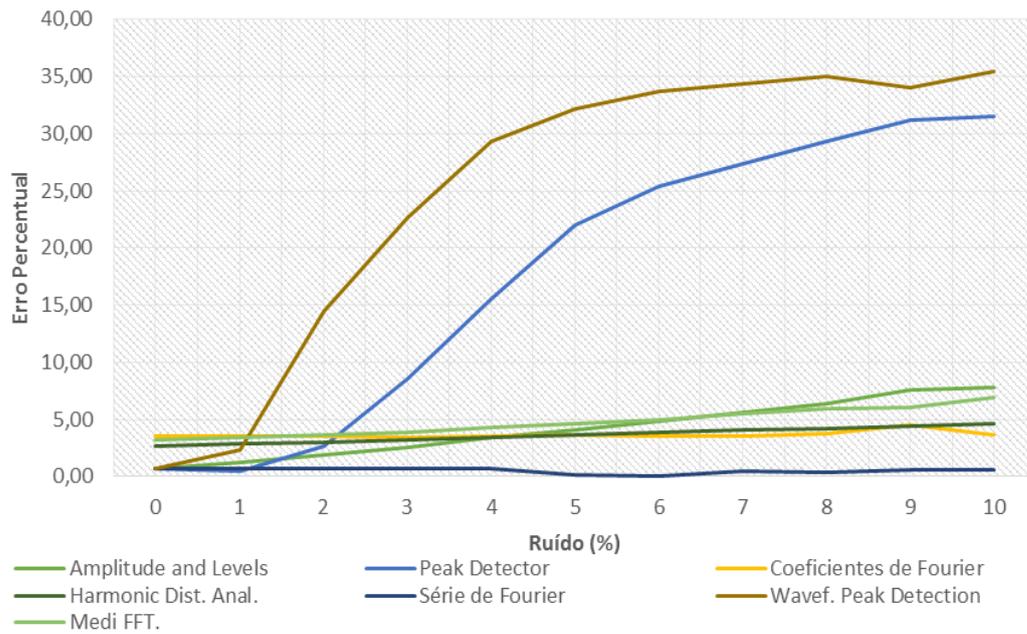


Figura 112 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o valor da tensão de ensaio com pré-processamento na condição com filtro Savitzky-Golay.

- **Análise em ATCC**

Tabela 22 - Análise dos VIs que estimam o valor médio com pré-processamento na condição e sem filtro.

		Nível de Ruído (%)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Erro percentual dos VIs	Medi FFT.	0,0	0,0041	0,010	0,018	0,023	0,033	0,028	0,052	0,031	0,059	0,051
	Harmonic Dist. Anal.	0,0	0,0032	0,011	0,013	0,013	0,017	0,017	0,019	0,038	0,026	0,088
	Basic Average DC-RMS	0,0	0,0026	0,005	0,014	0,016	0,016	0,022	0,034	0,024	0,040	0,049
	AC & DC Estimator	0,0	0,0032	0,011	0,013	0,013	0,017	0,017	0,019	0,038	0,026	0,088
	AC & DC Estimator modif.	0,0	0,0032	0,011	0,013	0,013	0,017	0,017	0,019	0,038	0,026	0,088
	Average DC-RMS	0,0	0,0054	0,014	0,016	0,020	0,018	0,015	0,019	0,047	0,040	0,12

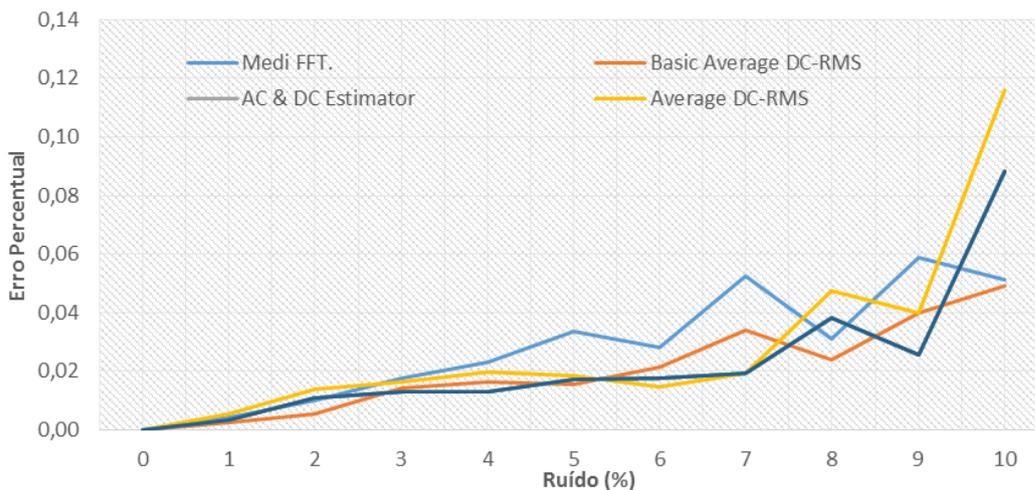


Figura 113 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o valor médio, com pré-processamento na condição e sem filtro.

Tabela 23 - Análise dos VIs que estimam o valor médio, com pré-processamento na condição, com filtro de médias.

		Nível de Ruído (%)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Erro percentual dos VIs	Medi FFT.	0,0	0,0038	0,010	0,033	0,014	0,017	0,063	0,028	0,029	0,023	0,064
	Harmonic Dist. Anal.	0,0	0,0010	0,0056	0,0045	0,0095	0,020	0,031	0,042	0,021	0,024	0,047
	Basic Average DC-RMS	0,0	0,0012	0,0037	0,0097	0,011	0,023	0,031	0,039	0,018	0,027	0,055
	AC & DC Estimator	0,0	0,0010	0,0056	0,0045	0,0095	0,020	0,031	0,042	0,021	0,024	0,047
	AC & DC Estimator modif.	0,0	0,0010	0,0056	0,0045	0,0095	0,020	0,031	0,042	0,021	0,024	0,047
	Average DC-RMS	0,0	0,0022	0,0059	0,0078	0,011	0,022	0,034	0,041	0,014	0,025	0,063

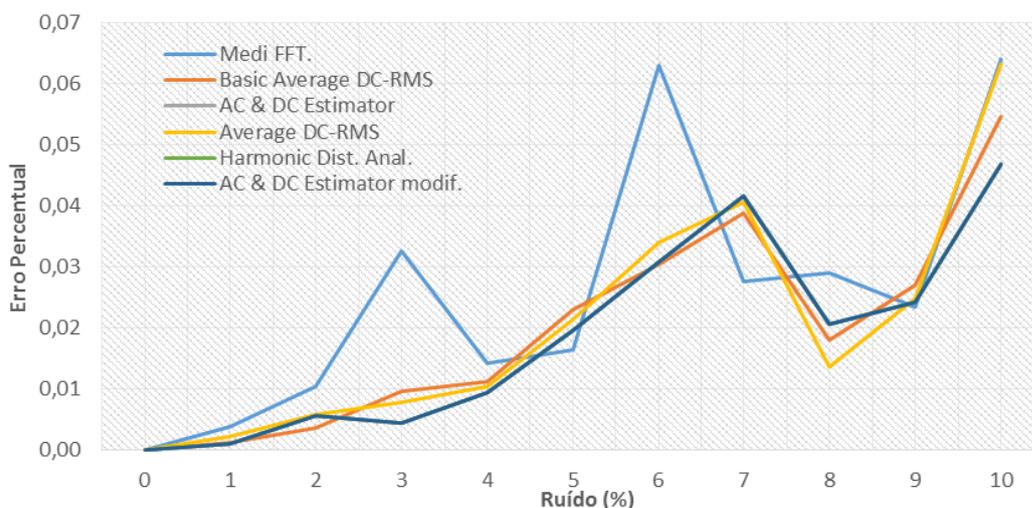


Figura 114 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o valor médio, com pré-processamento na condição e com filtro de médias.

Tabela 24 - Análise dos VIs que estimam o valor médio com pré-processamento na condição e com filtro Savitzky-Golay.

		Nível de Ruído (%)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Erro percentual dos VIs	Medi FFT.	0,0	0,0056	0,0056	0,0039	0,011	0,025	0,045	0,073	0,080	0,040	0,048
	Harmonic Dist. Anal.	0,0	0,0029	0,0048	0,015	0,0080	0,011	0,046	0,058	0,033	0,022	0,053
	Basic Average DC-RMS	0,0	0,0022	0,0051	0,011	0,0090	0,0074	0,057	0,041	0,036	0,0084	0,037
	AC & DC Estimator	0,0	0,0029	0,0048	0,015	0,0080	0,011	0,047	0,058	0,033	0,022	0,053
	AC & DC Estimator modif.	0,0	0,0029	0,0048	0,015	0,0080	0,011	0,046	0,058	0,033	0,022	0,053
	Average DC-RMS	0,0	0,0029	0,0057	0,017	0,015	0,012	0,037	0,062	0,026	0,016	0,062

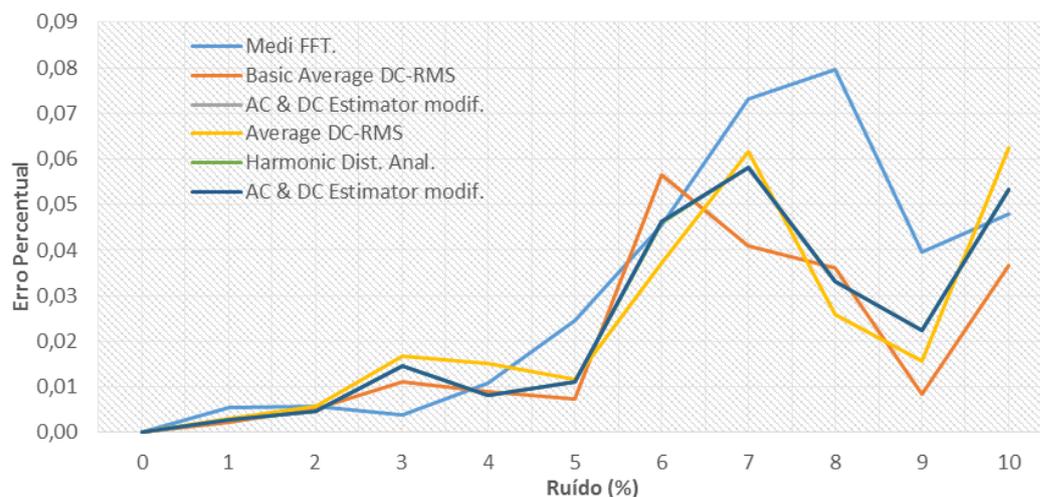


Figura 115 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o valor médio, com pré-processamento na condição, com filtro Savitzky-Golay.

Tabela 25 - Análise dos VIs que estimam o fator de ripple com pré-processamento na condição e sem filtro.

		Nível de Ruído (%)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Erro percentual dos VIs	Amplitude and Levels	2,0	4,7	8,0	12	16	18	23	26	29	35	37
	Wavef. Peak Detection	0,42	0,30	0,32	1,1	1,9	2,9	3,8	4,7	5,8	6,8	7,8
	Peak Detector	0,42	0,51	0,17	0,20	0,59	1,1	1,6	2,2	2,8	3,4	4,0
	Série de Fourier	2,0	1,7	1,9	1,7	2,0	2,2	1,7	2,8	2,1	2,5	3,1

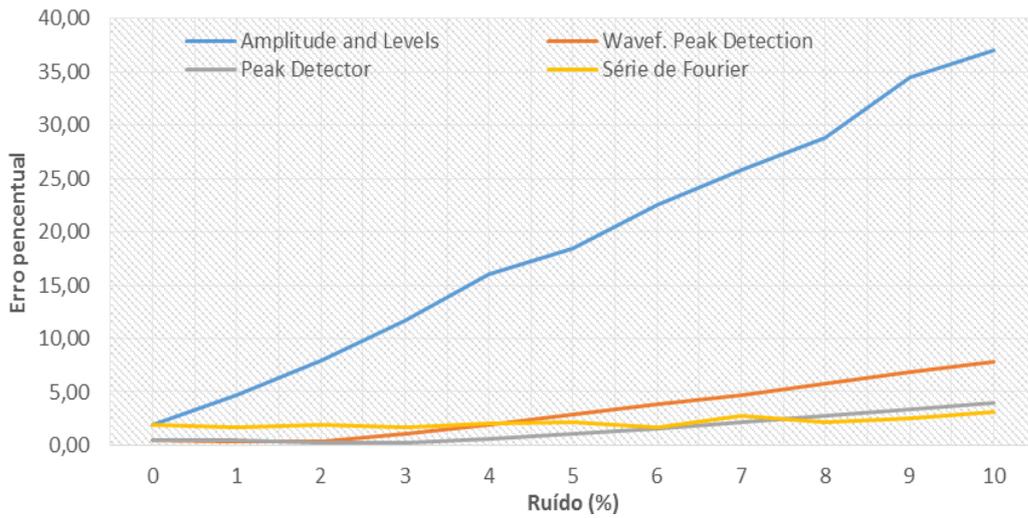


Figura 116 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o fator de ripple, com pré-processamento na condição e sem filtro.

Tabela 26 - Análise dos VIs que estimam o fator de ripple com pré-processamento na condição e com filtro de médias.

		Nível de Ruído (%)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Erro percentual dos VIs	Amplitude and Levels	2,0	3,4	5,2	7,0	8,5	10	12	13	16	19	21
	Wavef. Peak Detection	0,42	0,60	0,37	0,11	0,23	0,60	1,0	1,5	1,9	2,4	2,9
	Peak Detector	0,42	0,54	0,28	0,0090	0,37	0,73	1,2	1,6	2,0	2,5	3,2
	Série de Fourier	2,0	1,8	1,9	1,6	2,0	2,0	1,5	2,9	2,4	3,3	3,2

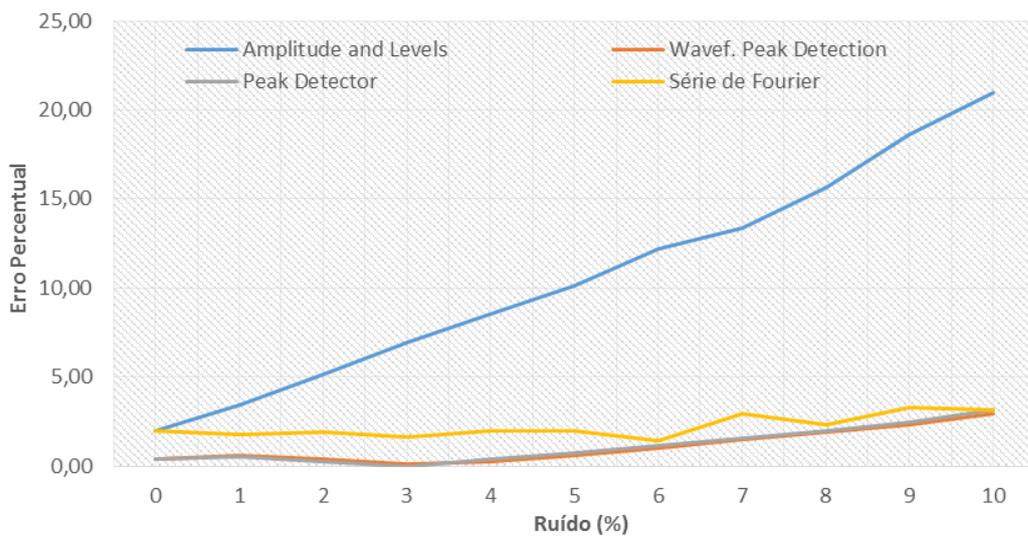


Figura 117 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o fator de ripple, com pré-processamento na condição, com filtro de médias.

Tabela 27 - Análise dos VIs que estimam o fator de ripple com pré-processamento na condição e com filtro Savitzky-Golay.

		Nível de Ruído (%)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Erro percentual dos VIs	Amplitude and Levels	2,0	3,0	4,2	5,6	6,9	8,2	9,3	11	12	14	15
	Wavef. Peak Detection	0,42	0,66	0,53	0,36	0,14	0,14	2,2	0,66	0,94	1,3	1,6
	Peak Detector	0,42	0,59	0,36	0,16	0,11	0,44	0,60	1,0	1,4	1,8	2,1
	Série de Fourier	2,0	1,8	1,9	1,8	2,3	2,2	3,0	2,4	2,4	2,1	2,6

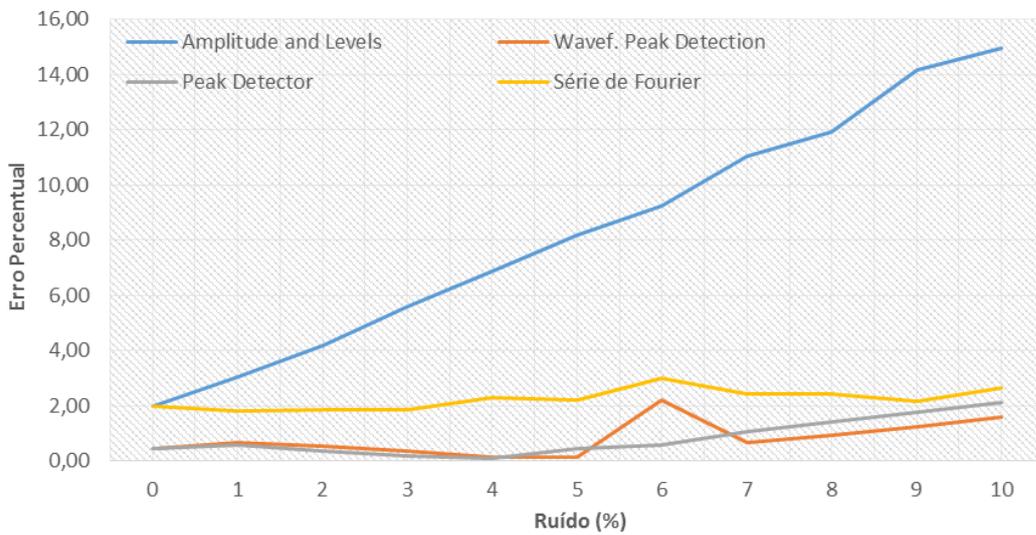


Figura 118 - Gráfico do erro percentual dos VIs que estimam o fator de ripple com pré-processamento na condição e com filtro Savitzky-Golay.

## APÊNDICE B – Resultados dos ensaio em BT

Este apêndice apresenta os resultados obtidos durante os ensaios em baixa tensão considerando as diferentes configurações do osciloscópio.

- CA Offset

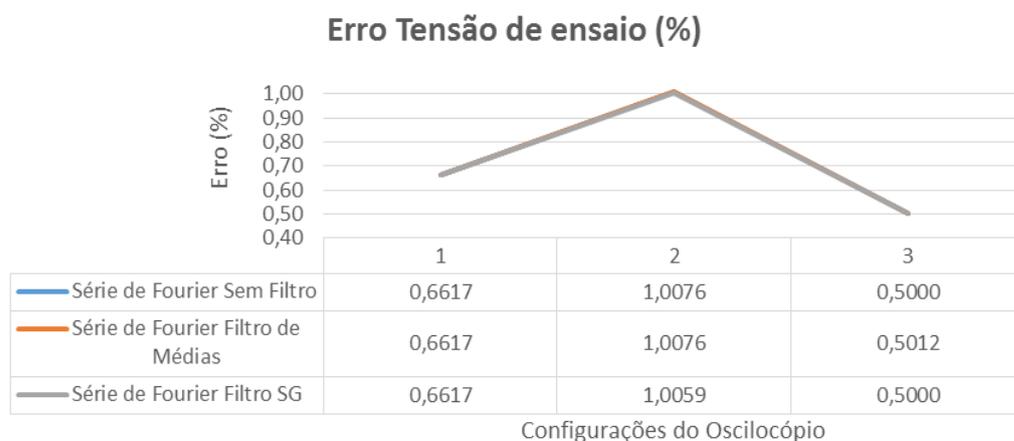


Figura 119 - Gráfico de erros da tensão de ensaio para análise da configuração do osciloscópio.

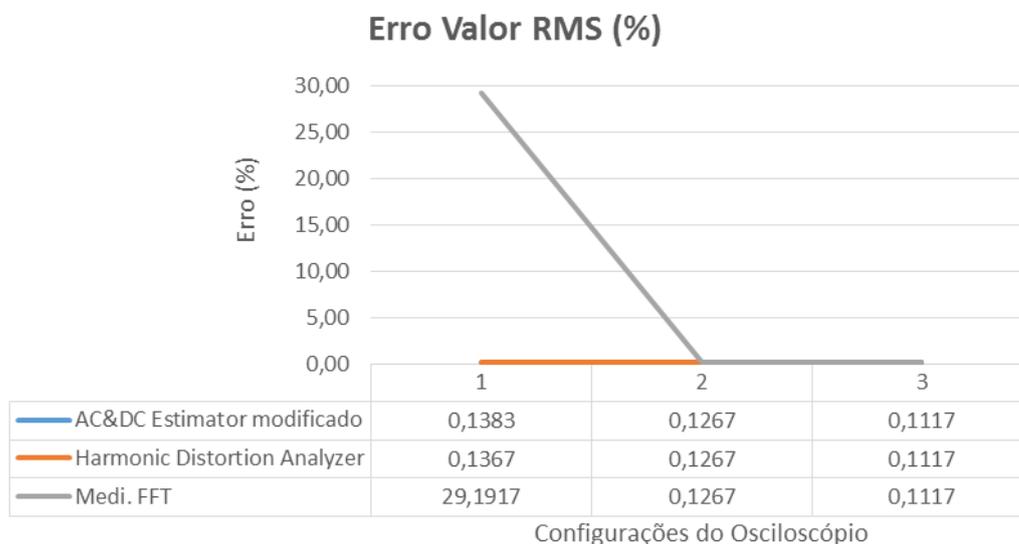


Figura 120 - Gráfico de erros da tensão RMS para análise da configuração do osciloscópio.

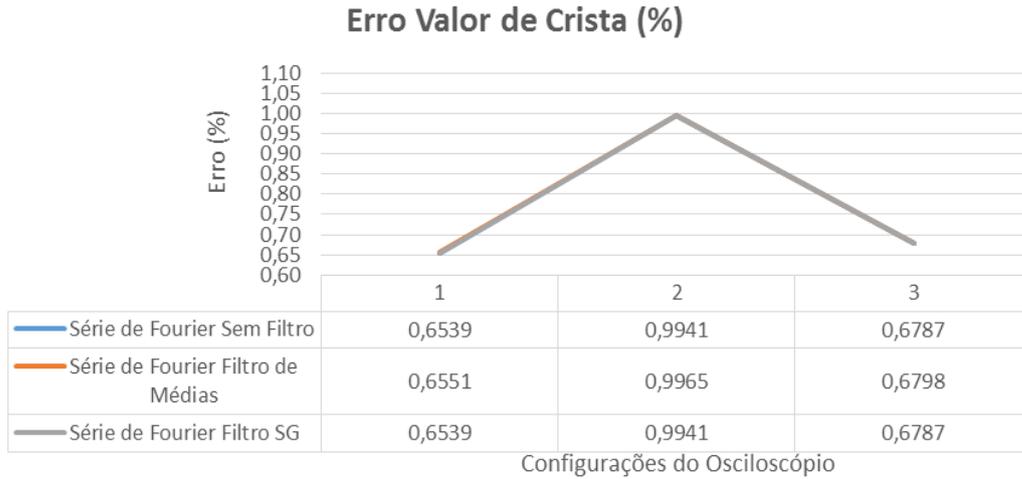


Figura 121 - Gráfico de erros da tensão de crista para análise da configuração do osciloscópio.

- **CA Frequência**

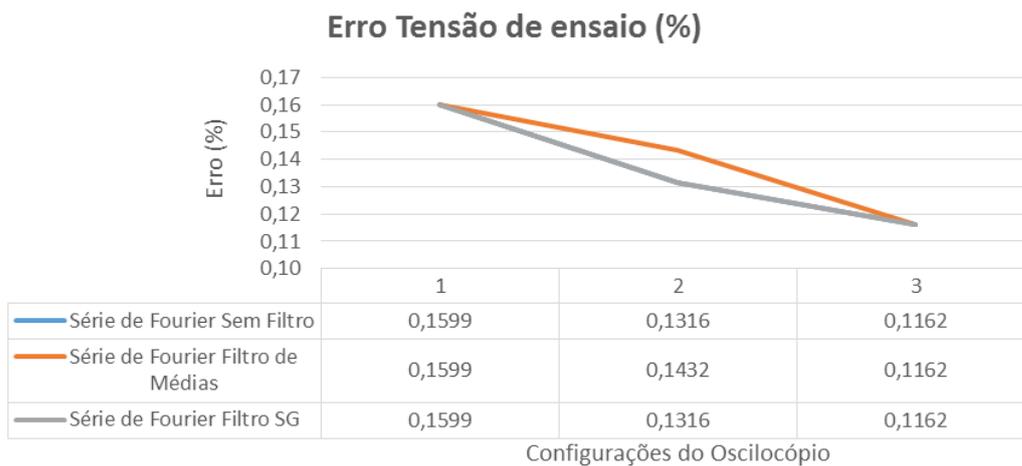


Figura 122 - Gráfico de erros da tensão de ensaio para análise da configuração do osciloscópio.

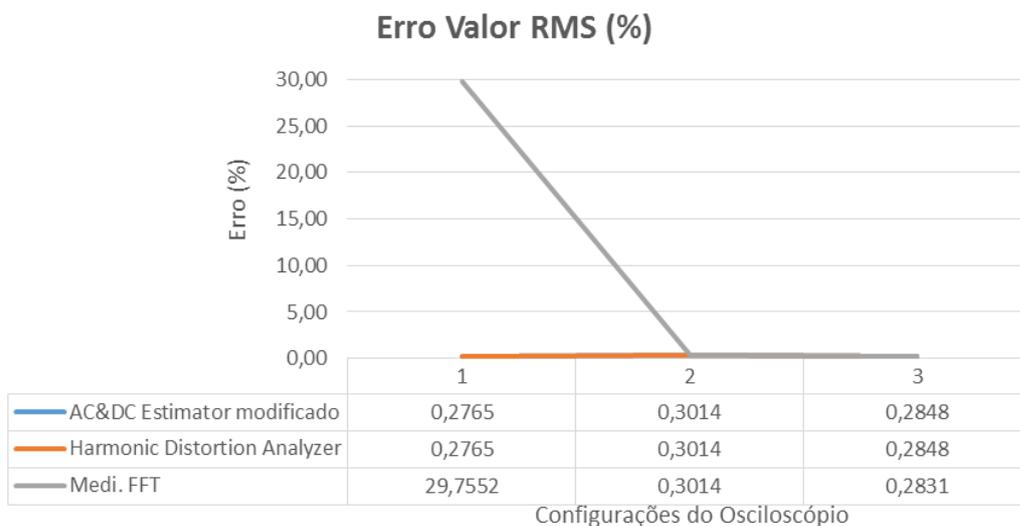


Figura 123 - Gráfico de erros da tensão RMS para análise da configuração do osciloscópio.

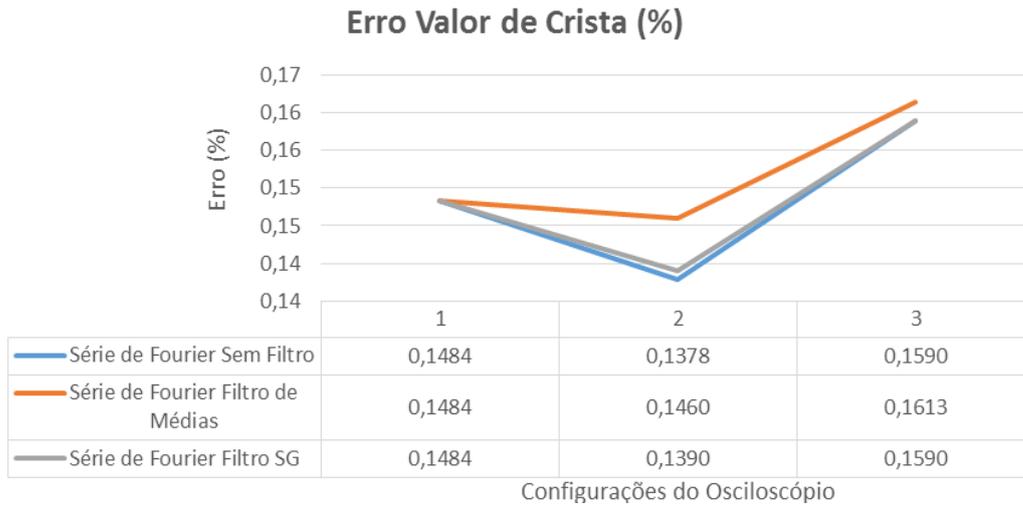


Figura 124 - Gráfico de erros da tensão de crista para análise da configuração do osciloscópio.

- **DC Ripple positivo**

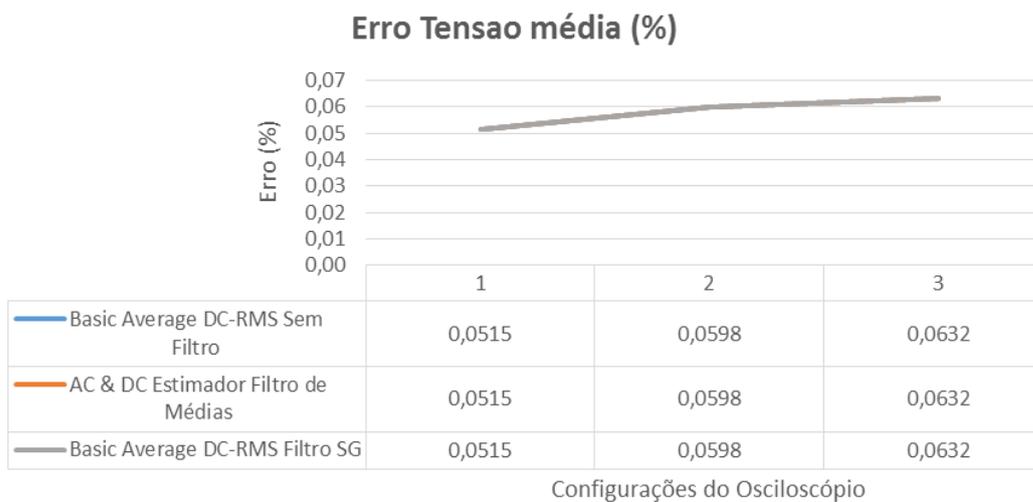


Figura 125 - Gráfico de erros da tensão média para análise da configuração do osciloscópio na polaridade positiva.

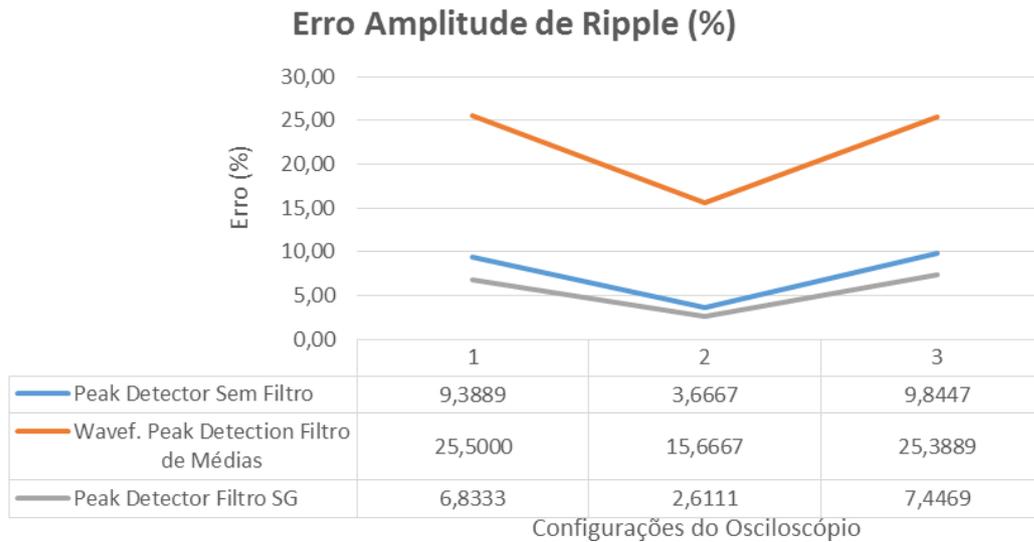


Figura 126 - Gráfico de erros da amplitude de ripple para análise da configuração do osciloscópio na polaridade positiva.

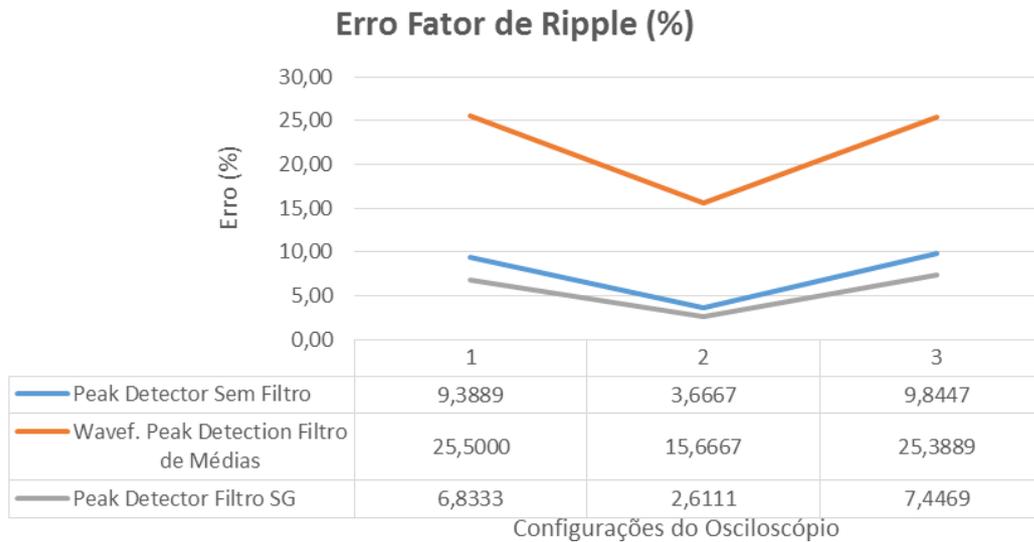


Figura 127 - Gráfico de erros do fator de ripple para análise da configuração do osciloscópio na polaridade positiva.

- **DC Ripple negativo**

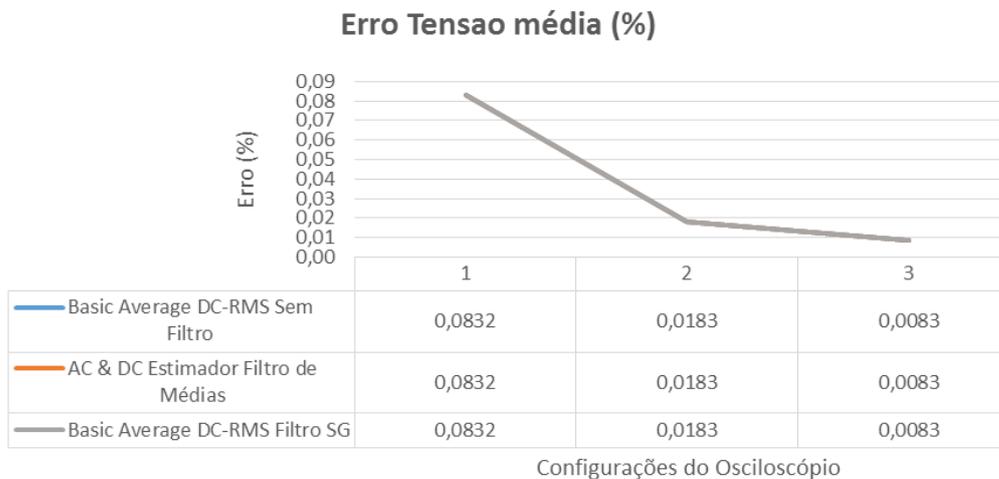


Figura 128 - Gráfico de erros da tensão média para análise da configuração do osciloscópio na polaridade negativa.

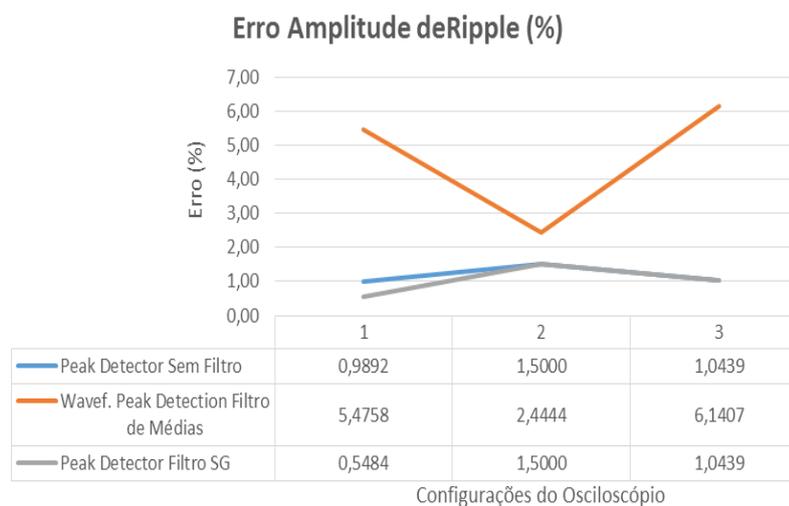


Figura 129 - Gráfico de erros da amplitude de ripple para análise da configuração do osciloscópio na polaridade negativa.

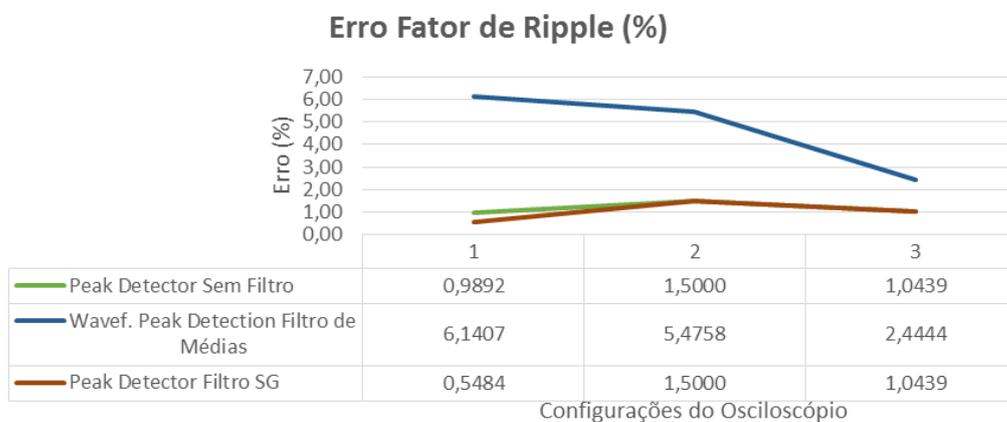


Figura 130 - Gráfico de erros do fator de ripple para análise da configuração do osciloscópio na polaridade negativa.

## APÊNDICE C – Resultados dos ensaios em AT

Este apêndice apresenta o registro de todos os parâmetros das aplicações utilizadas na determinação do fator de escala por comparação com um SMR para o nível de 10 kV em ATCA e ATCC.

Tabela 28 - Parâmetros medidos pelo HVAT AC-DC nos ensaios em alta tensão em ATCA.

Data/ Horário	Tensão de ensaio	Tensão RMS	Tensão de Crista	Fator de Crista	Freq. (Hz)	TDH (%)	Tensão Média	Vpico+	Vpico-
09/02/2017 /14:25:16	3,40008	3,43521	4,80843	1,39975	59,9491	1,19797	-0,02227	4,80843	-4,85732
09/02/2017 /14:25:30	3,39325	3,43739	4,79878	1,39605	59,9508	1,2396	-0,02276	4,79878	-4,85587
09/02/2017 /14:25:47	3,39546	3,43765	4,80191	1,39686	59,9403	1,25362	-0,02231	4,80191	-4,8585
09/02/2017 /14:26:03	3,39694	3,43957	4,804	1,39669	59,9322	1,27756	-0,02363	4,804	-4,85758
09/02/2017 /14:26:20	3,38925	3,4343	4,79313	1,39566	59,9609	1,24188	-0,02293	4,79313	-4,85771
09/02/2017 /14:26:33	3,39968	3,44403	4,80787	1,396	59,9768	1,22208	-0,02338	4,80787	-4,87102
09/02/2017 /14:26:45	3,40675	3,4491	4,81787	1,39685	59,9777	1,21775	-0,02323	4,81787	-4,87156
09/02/2017 /14:27:00	3,39912	3,44523	4,80708	1,39529	59,9789	1,23729	-0,0233	4,80708	-4,86974
09/02/2017 /14:27:11	3,39785	3,4428	4,80528	1,39575	59,9656	1,26687	-0,02279	4,80528	-4,86205

Tabela 29 - Parâmetros medidos pelo HVAT AC-DC nos ensaios em alta tensão em ATCC.

Data/ Horário	Tensão Média	Tensão RMS	Amplitude de Ripple	Fator de ripple (%)	Freq. (Hz)	Fator de ripple (RMS)	Vmax	Vmin
09/02/2017 /15:23:01	-3,29715	0,0864952	0,1228	3,72442	120,044	-2,58671	-3,16872	-3,41432
09/02/2017 /15:23:17	-3,29599	0,0863586	0,122737	3,72384	120,09	-2,58709	-3,16771	-3,41319
09/02/2017 /15:23:30	-3,29525	0,0863519	0,122715	3,72401	120,077	-2,587	-3,16694	-3,41237
09/02/2017 /15:23:53	-3,29436	0,0864278	0,122726	3,72535	120,005	-2,59089	-3,16612	-3,41157
09/02/2017 /15:24:37	-3,29237	0,0863664	0,122645	3,72512	119,929	-2,59184	-3,16409	-3,40938
09/02/2017 /15:24:58	-3,29521	0,0866409	0,123094	3,73556	119,944	-2,59556	-3,16658	-3,41276
09/02/2017 /15:25:13	-3,2927	0,0863536	0,122647	3,7248	120,011	-2,59371	-3,16449	-3,40978
09/02/2017 /15:25:26	-3,29236	0,0863661	0,122666	3,72578	119,97	-2,59375	-3,1642	-3,40954
09/02/2017 /15:25:45	-3,2941	0,0864855	0,122848	3,72934	119,967	-2,59447	-3,1657	-3,4114
09/02/2017 /15:26:11	-3,29816	0,0865903	0,123056	3,73105	120,051	-2,59112	-3,16961	-3,41572